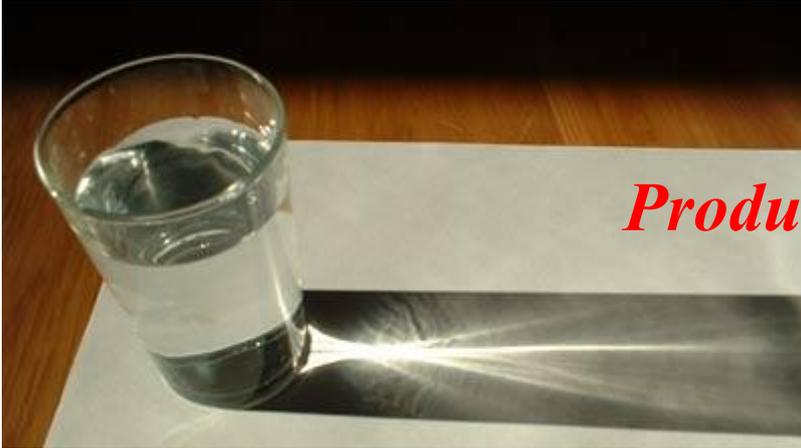


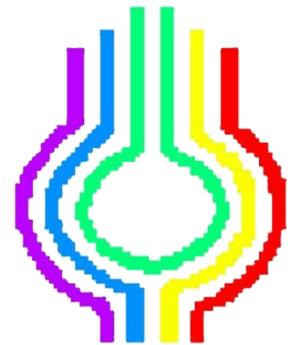
# Spécialité terminale S



*Produire des images,  
observer.*

PHYSIQUE  
COURS

Jallu L.



# Optique géométrique

# 1. Former une image

## 1.1. Les lentilles sphériques minces

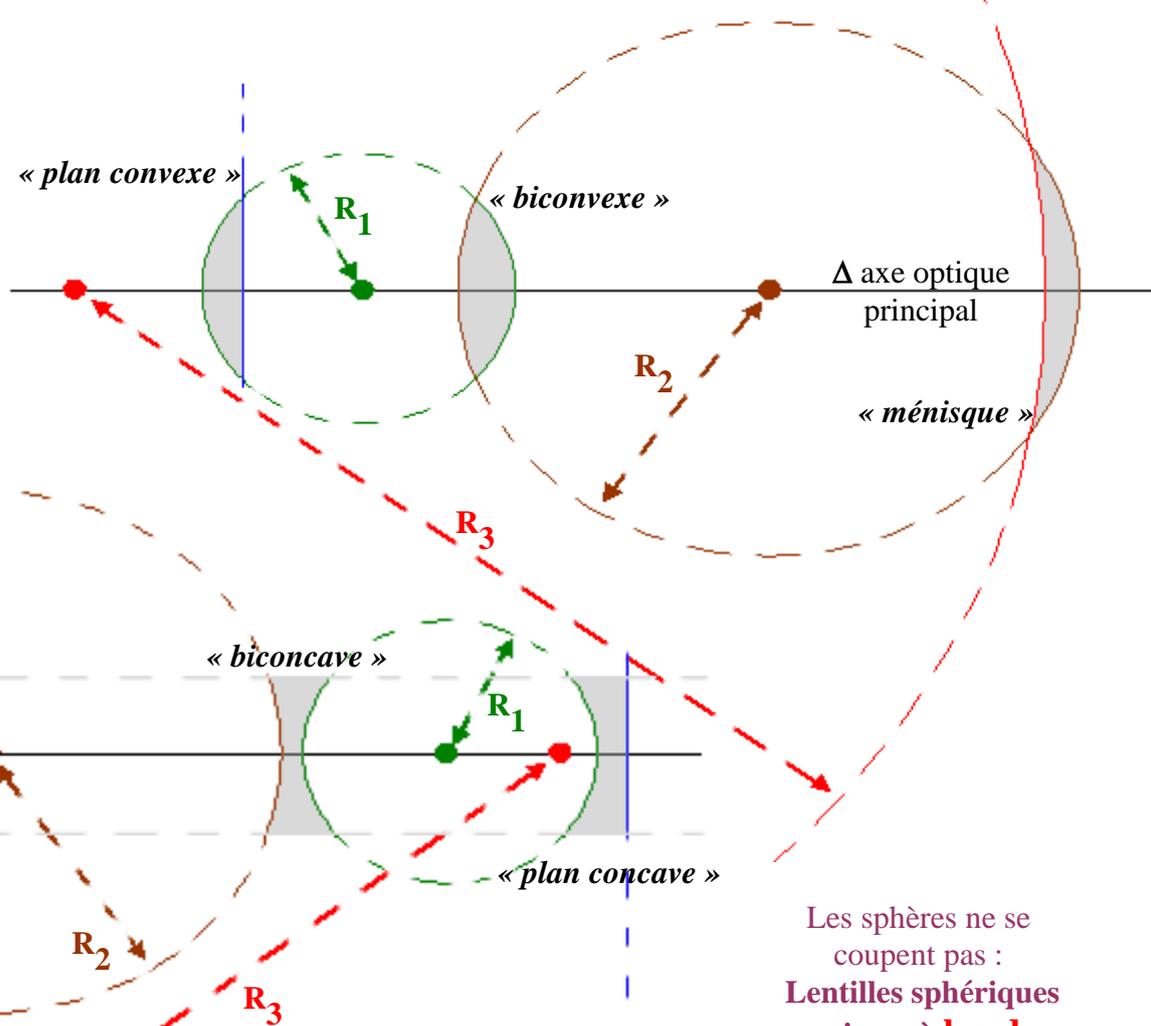
### 1.1.1. Présentation

⇒ Une **lentille sphérique mince**, est un milieu transparent à la lumière, découpé selon des sphères et dont l'épaisseur au centre est faible devant les courbures des faces.



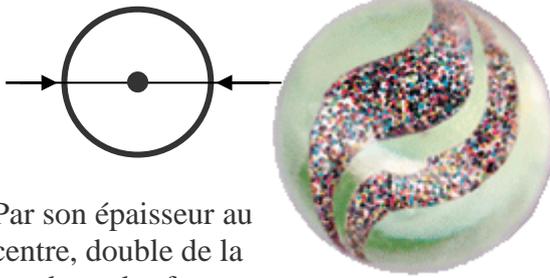
Ainsi :

Les sphères se coupent :  
**Lentilles sphériques minces à bord mince.**



Les sphères ne se coupent pas :  
**Lentilles sphériques minces à bord épais.**

Remarque :



Par son épaisseur au centre, double de la courbure des faces, UNE BILLE N'EST PAS « lentilles mince ».

Parce que ses deux faces sont planes et parallèles, UNE VITRE N'EST PAS « lentilles mince ».



## ⇒ Lentille sphérique mince et lois de Snell-Descartes

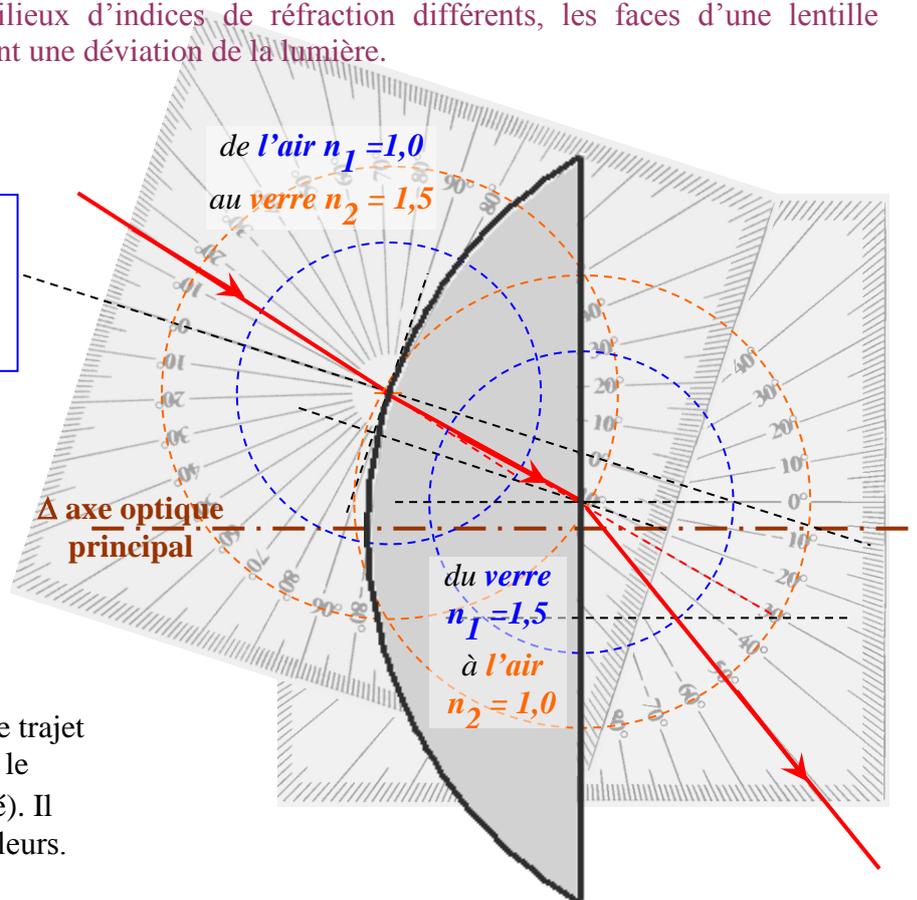
Tels 2 dioptries séparant des milieux d'indices de réfraction différents, les faces d'une lentille sphérique mince (LSM) provoquent une déviation de la lumière.

$$n_1 \sin i = n_2 \sin t$$

2<sup>de</sup> loi de Snell-Descartes, loi de la réfraction

### Attention

- On ne tient pas compte de la réflexion (1<sup>ère</sup> loi  $i = r$ ).
- En **optique géométrique**, le trajet de la lumière est représenté par le « **rayon lumineux** » (orienté). Il n'y a pas de dispersion des couleurs.



Couleur	longueur d'onde dans le vide (en nm)	Indice du verre ordinaire n	Vitesse de propagation (en m.s <sup>-1</sup> )
Ultraviolet proche	361	1,539	$1,94\ 797 \times 10^8$
Bleu sombre	434	1,528	$1,96\ 198 \times 10^8$
Bleu-vert	486	1,523	$1,96\ 840 \times 10^8$
<b>Jaune</b>	<b>589</b>	<b>1,517</b>	<b><math>1,97\ 621 \times 10^8</math></b>
Rouge moyen	656	1,514	$1,98\ 013 \times 10^8$
Rouge sombre	768	1,511	$1,98\ 406 \times 10^8$

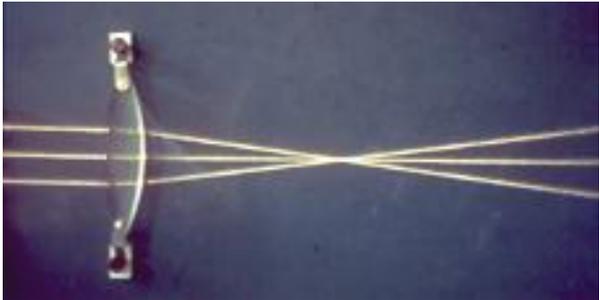
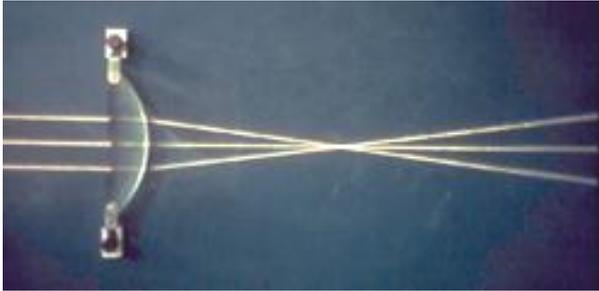
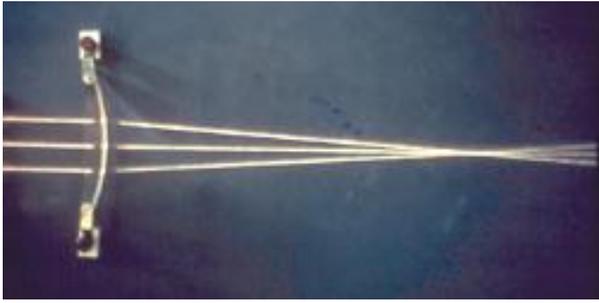
L'indice de réfraction,

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^8} = 1,5$$

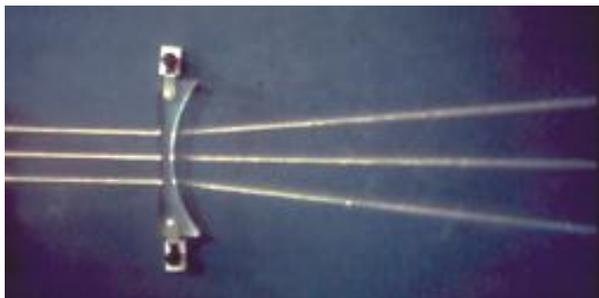
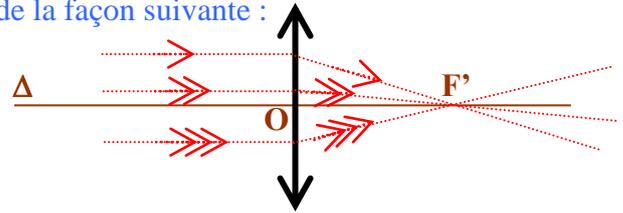
pour le verre, est commun à toute longueur d'onde de la lumière blanche. *Ce n'est pas le cas en toute rigueur !*

⇒ Schéma d'une LSM convergente

**Observations**



- On constate que *les Lentilles à bord mince sont toutes convergentes* : Elles transforment un faisceau incident parallèle à  $\Delta$  axe principal optique, en un faisceau émergent convergent.
- Pour des raisons de symétrie cylindrique autour de cet *axe D optique principal* passant par son *centre optique O* et perpendiculaire aux faces de la lentille, ce *Foyer principal de convergence appartient également à  $\Delta$* .
- Elles diffèrent les unes des autres par la distance de leur centre optique à leur foyer principal. Ce sont l'indice de réfraction et la géométrie qui font varier cette « *distance focale* ».
- Pour ne conserver que ces seules caractéristiques, on convient du schéma représentant la *famille des lentilles convergentes sphériques minces à bord mince*, de la façon suivante :



La famille « des bords épais » est une famille de lentilles sphériques minces *divergentes*.

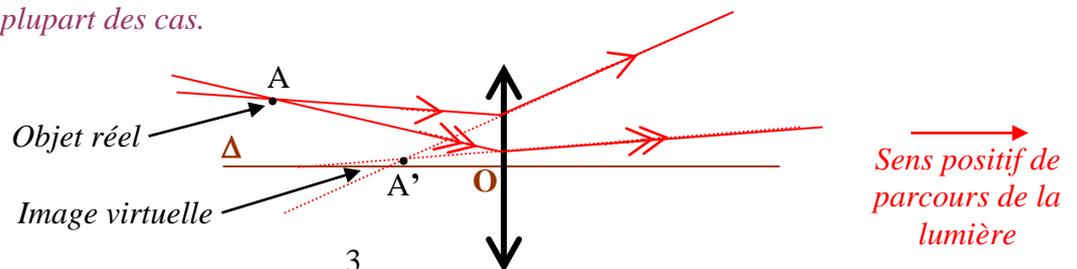
Cette famille ne fera donc pas l'objet de notre étude !

⇒ Définitions

- L'intersection de rayons incidents est « **un point objet** ».
- L'intersection de rayons émergents est « **un point image** ».

Il s'agit donc de situer cette intersection de rayons lumineux par rapport au système optique, dans le sens de parcours de la lumière choisi conventionnellement positif de la gauche vers la droite dans la plupart des cas.

Exemple :



- Ce point est « **réel** » s'il est traversé par la lumière. Il est « **virtuel** » dans le cas contraire d'un prolongement géométrique.
- Dans leur typologie, on distingue les objets « A » et de leurs images « A' » par l'assertion du caractère « ' ».
- Seule l'image A', « **conjuguée** » de l'objet A par le système optique est observée (vue). « Observer un objet A » n'a pas de sens puisqu'il ne résulte pas d'un traitement optique par une lentille.

- Les **images réelles** s'observent par **projection sur un écran**, tandis que les **images virtuelles** sont vues à travers le système optique.

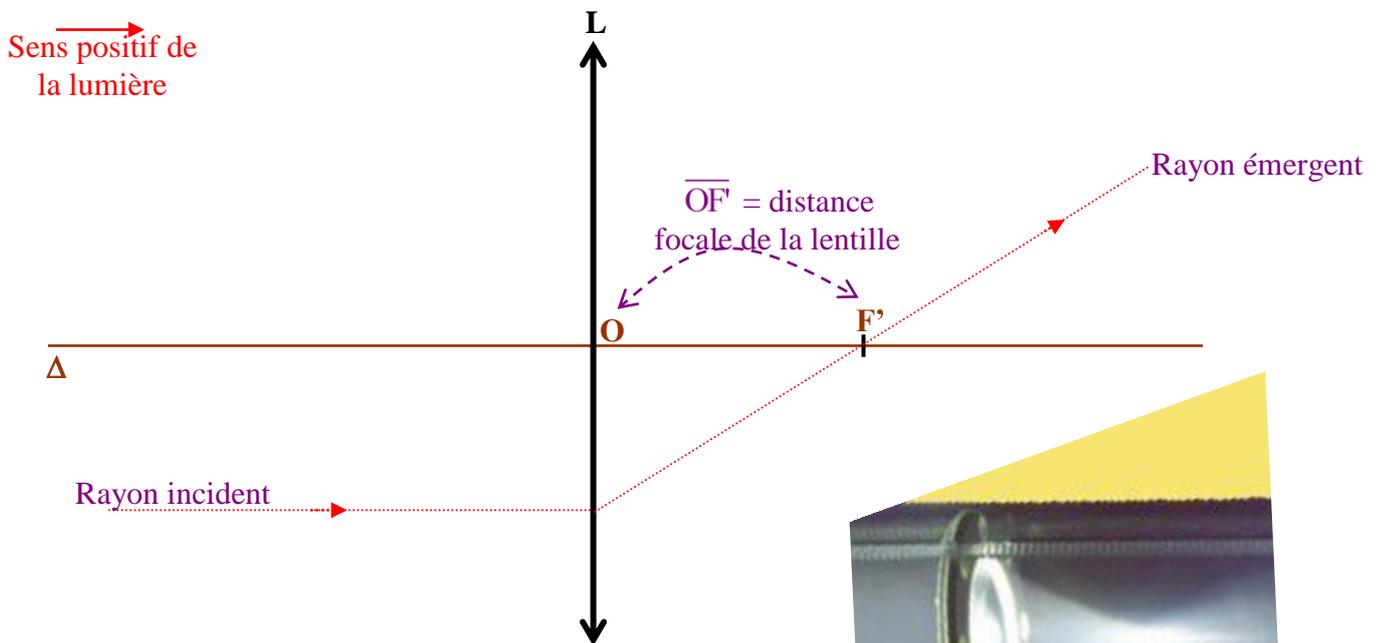


**Réel ou virtuel ?**



## ⇒ Conclusions

Fort de ce qui vient d'être exposé, on adopte les conventions suivantes afin de représenter un élément quelconque de la famille des lentilles sphériques minces convergentes :



Avec :

- $\Delta$  : Axe principal optique,
- O : Centre optique,
- F' : Foyer principal image

- $\overline{OF'}$  : La distance algébrique (positive une convergente) est « **la focale** » de la lentille. Elle se mesure en mètre (m).

*Des LSM convergentes, c'est la seule caractéristique qui les distingue les unes des autres.*

Exemple :  $\overline{OF'} = + 100 \text{ mm}$  ;  $\overline{OF'} = + 50 \text{ mm}$  ;  $\overline{OF'} = + 200 \text{ mm}$  ...

– Les opticiens utilisent cette autre unité qu'est « **la vergence** » de la lentille :

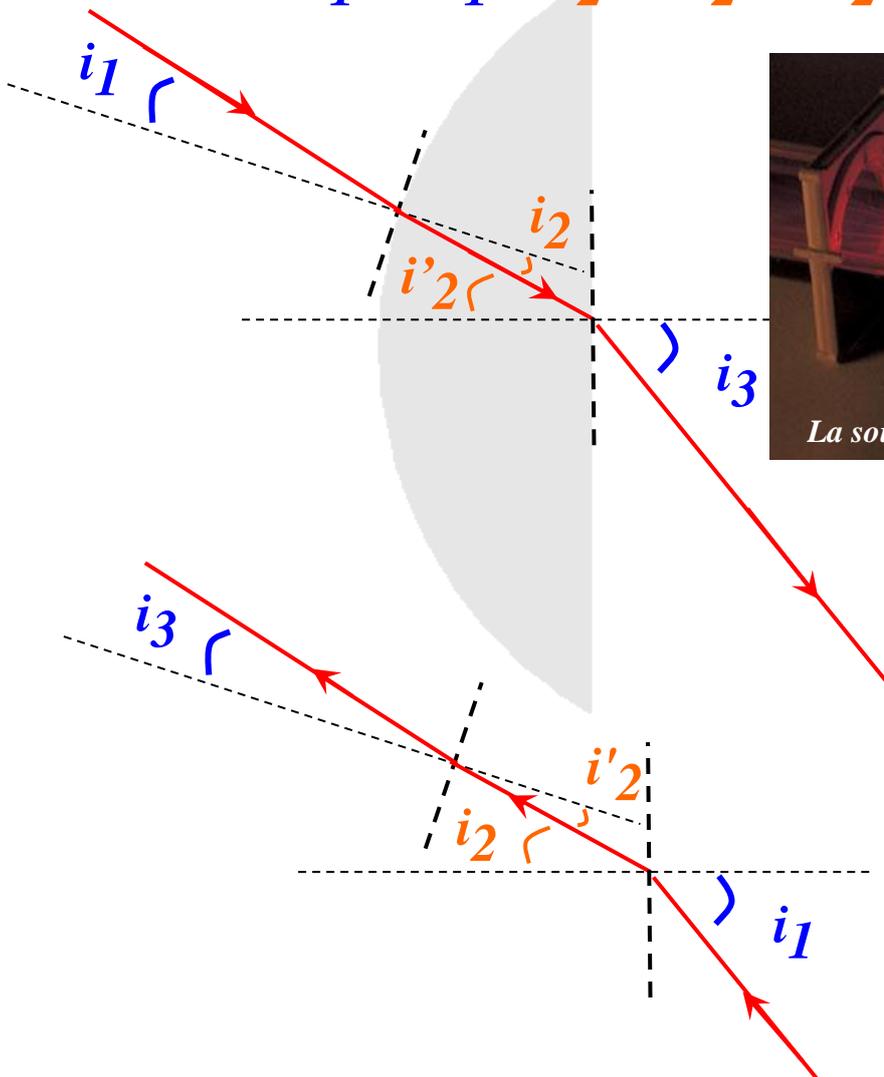
$$C = \frac{1}{\overline{OF'}}$$
, mesurée en « **dioptrie** ( $\delta$ ) » avec  $\overline{OF'}$  en mètre.

Une LSM de  $+ 8 \delta$  à une focale de  $+ 0.125 \text{ m} = 125 \text{ mm}$  ( $1/8$ ).

## 1.1.2. Propriétés

### ⇒ Retour inverse de la lumière

La réfraction du rayon incident en rayon émergent résulte donc des deux réfractions sur les faces (dioptries) de la LSM :  $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$  puis,  $n_2 \sin i'_2 = n_1 \sin i_3$ .



La symétrie de cette 2<sup>ème</sup> loi de Snell-Descartes autorise sa lecture dans les deux sens :

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

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

Quel est alors l'incident, quel est alors l'émergent, si la source lumineuse est masquée ?

Ces deux rayons sont en effet « conjugués », l'un est le réfracté de l'autre.

**Par un principe « d'inversion », sur le trajet de la conjugaison (incident - émergent), la lumière peut parcourir dans les deux sens.**

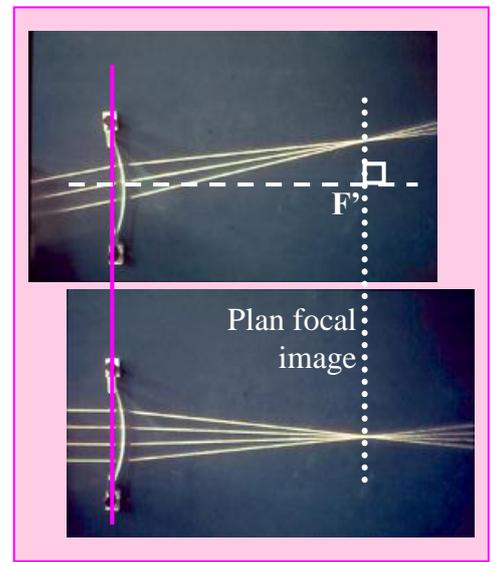
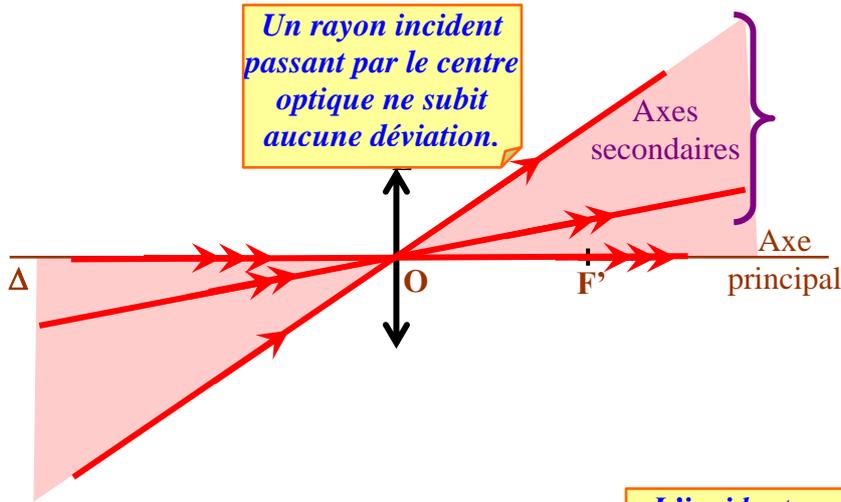
### ⇒ Propriétés

Existe-t-il alors des conjugaisons « remarquables », communes à toute LSM convergente (donc à bord mince), quelle que soit leur géométrie (plan-convexe, biconvexe, ménisque convergent) ?

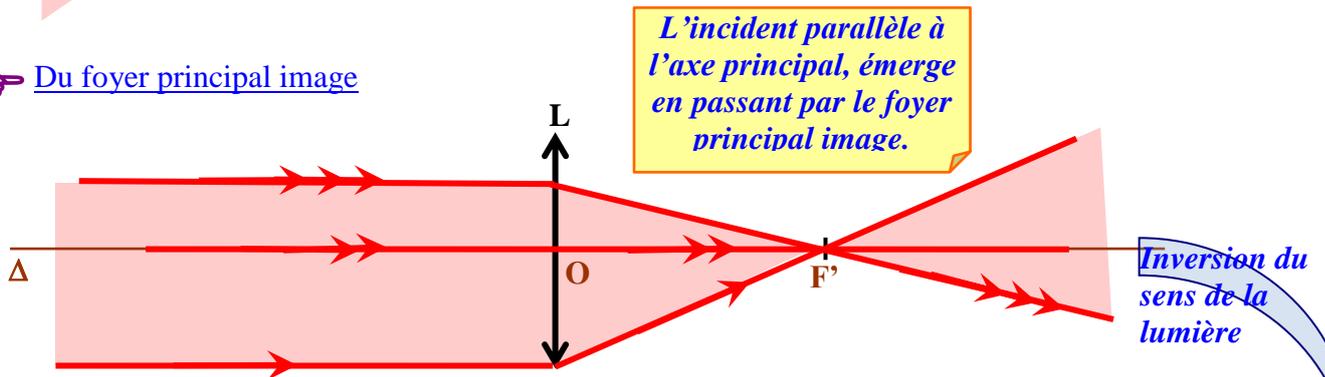


Ces conjugaisons constituent les « Propriétés des Lentilles sphériques minces » qu'il est nécessaire d'avoir constamment en mémoire lors des tracés de l'optique géométrique.

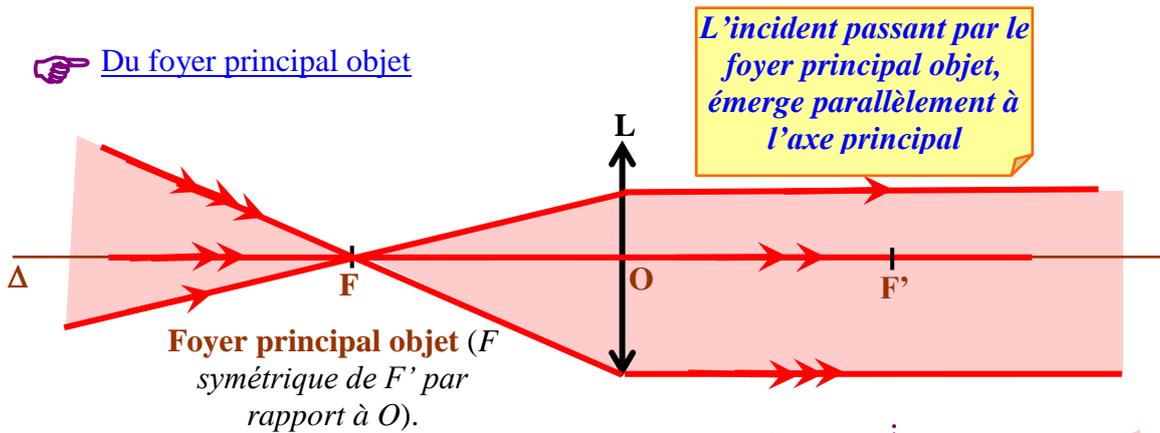
**Du centre optique**



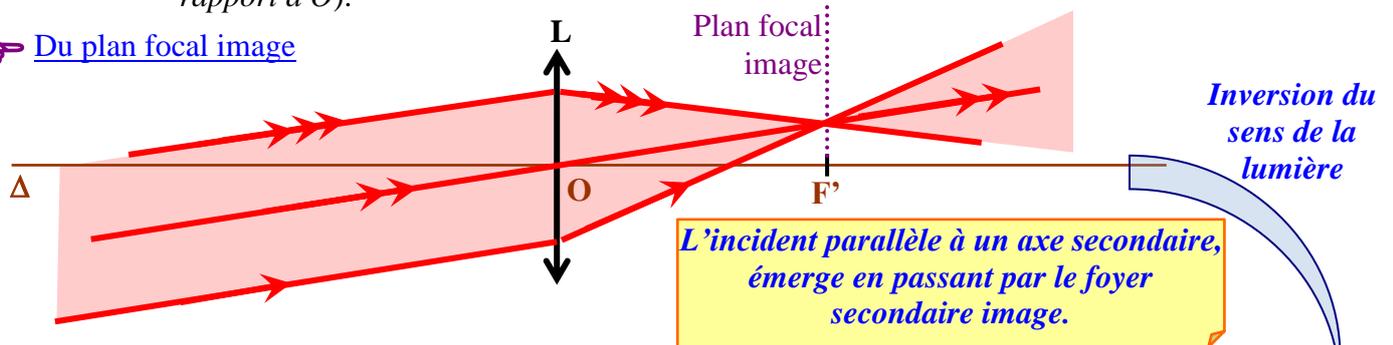
**Du foyer principal image**



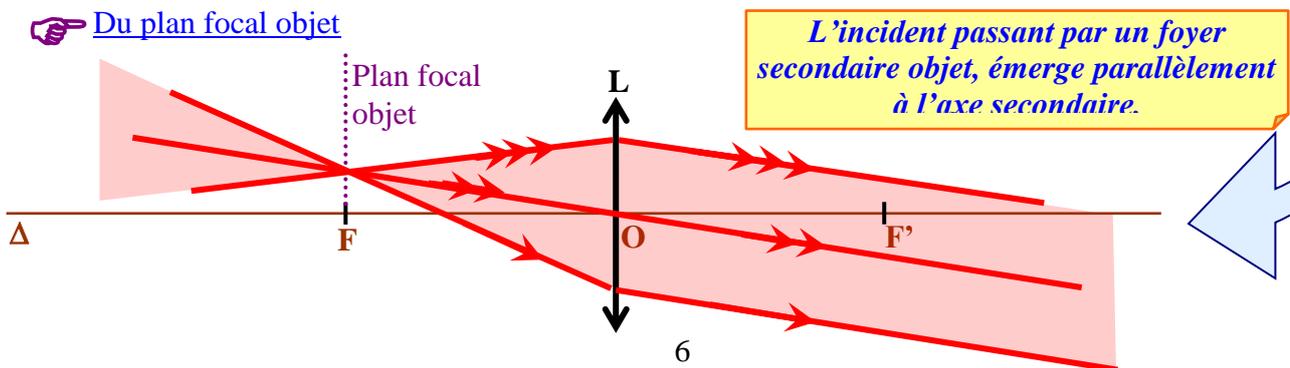
**Du foyer principal objet**



**Du plan focal image**

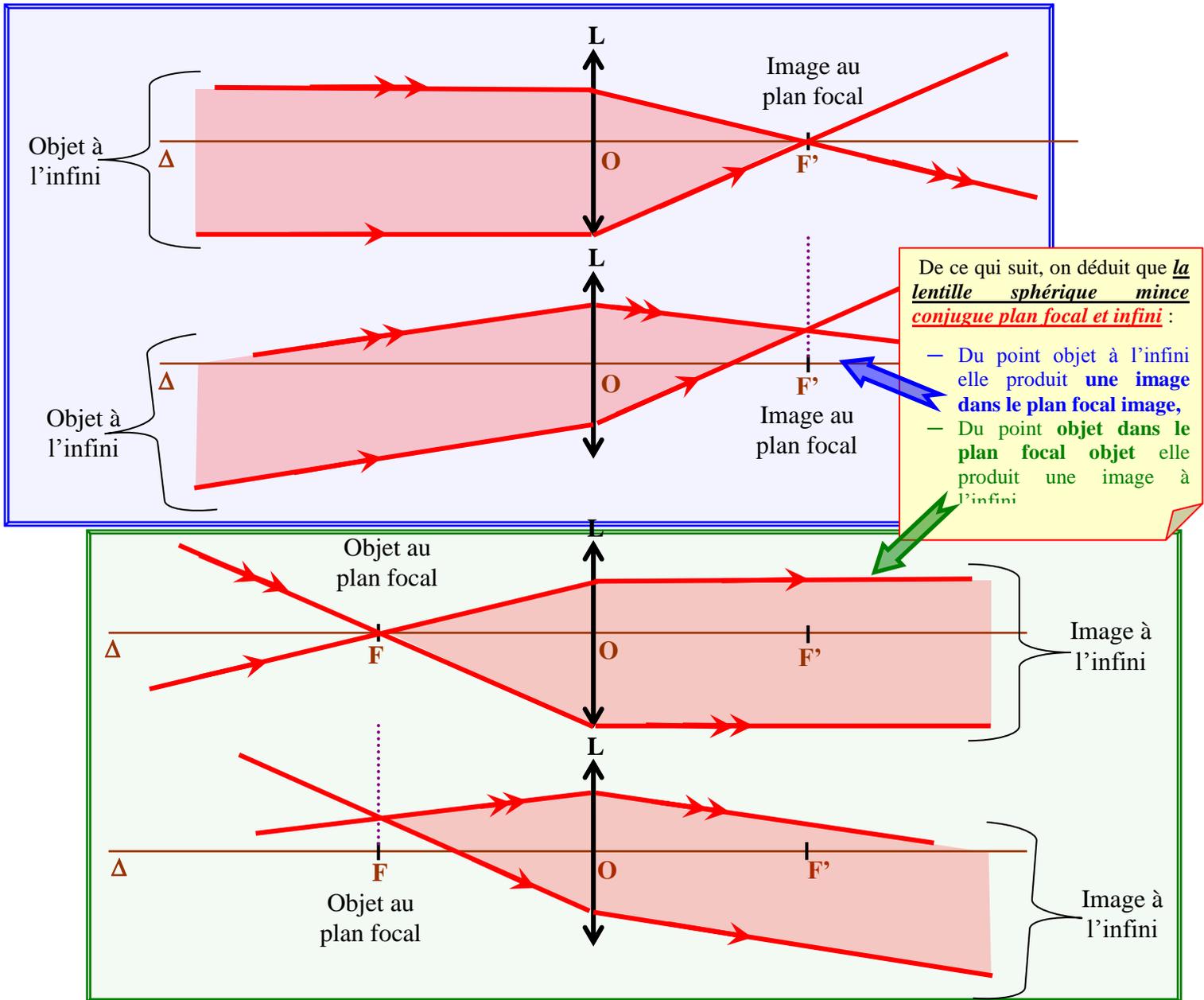


**Du plan focal objet**

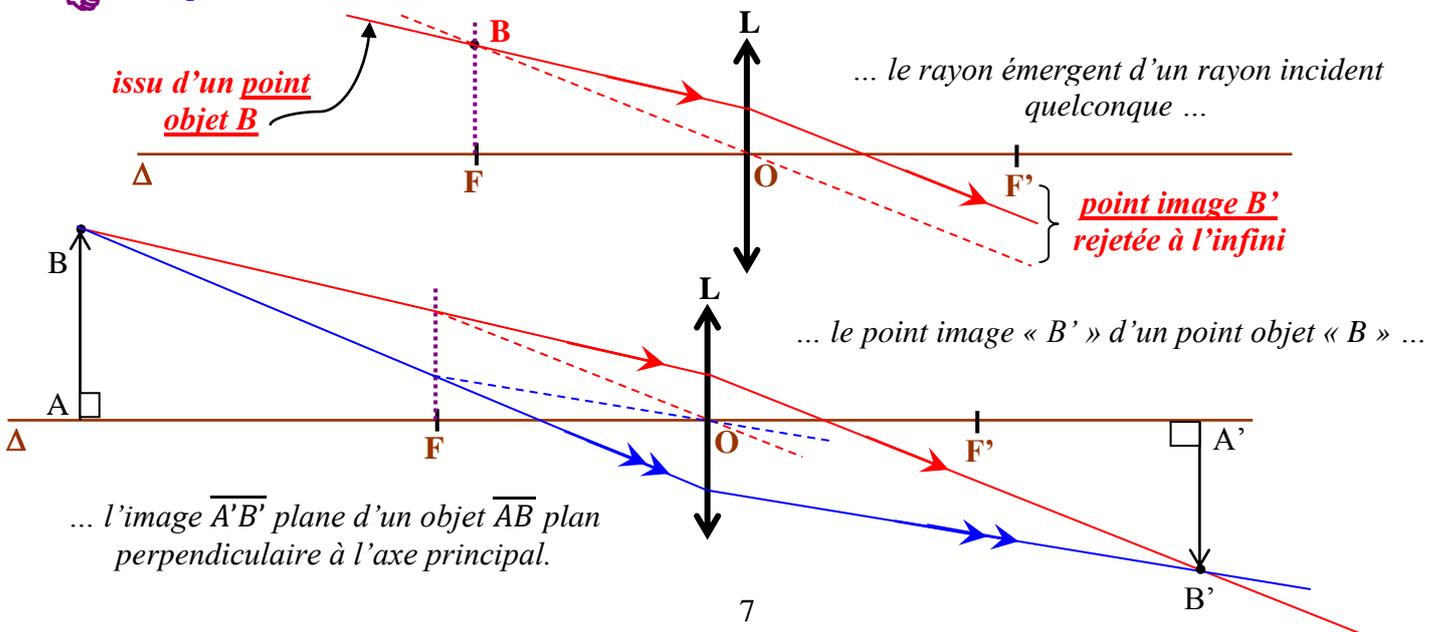


## ⇒ Conjugaison

En remarquant que comme dans tout « système focal », **infini et plans focaux sont conjugués** :

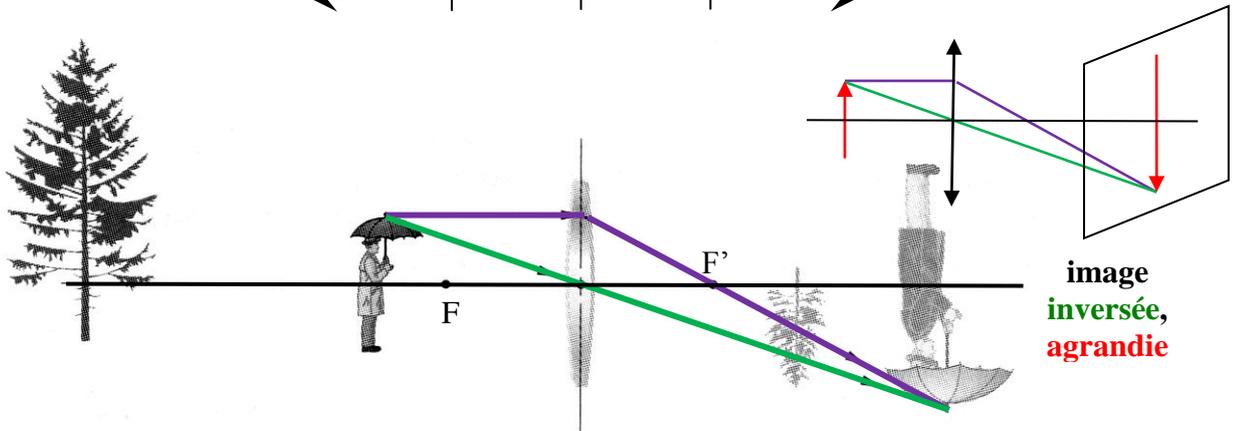
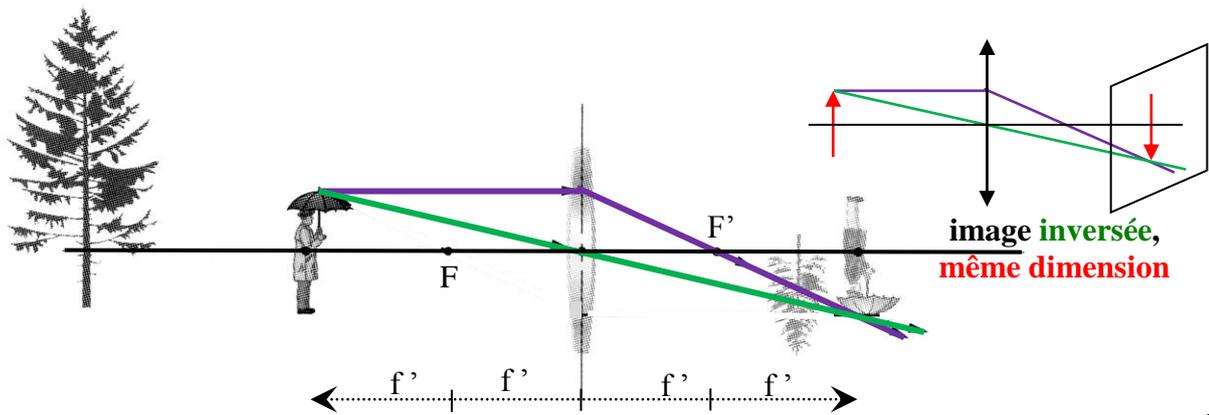
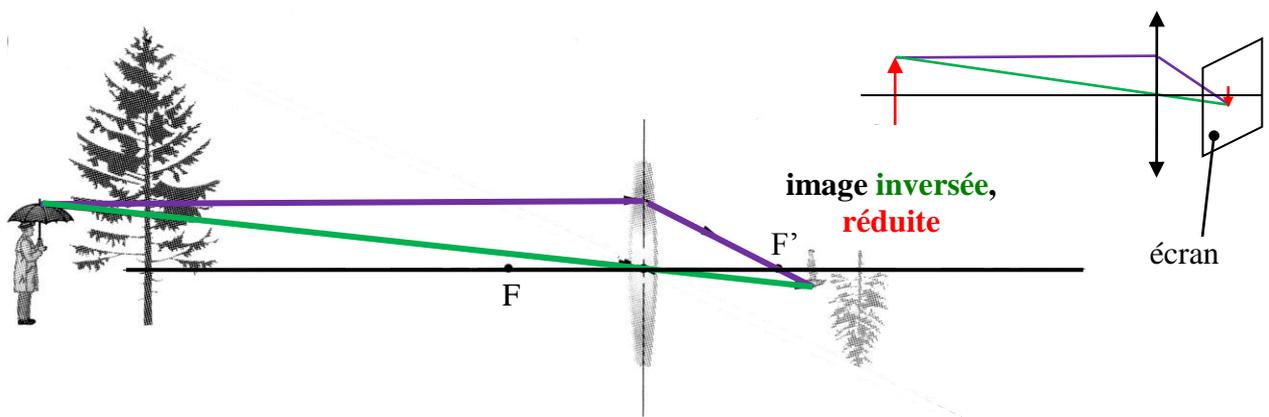


👉 On peut désormais tracer ...

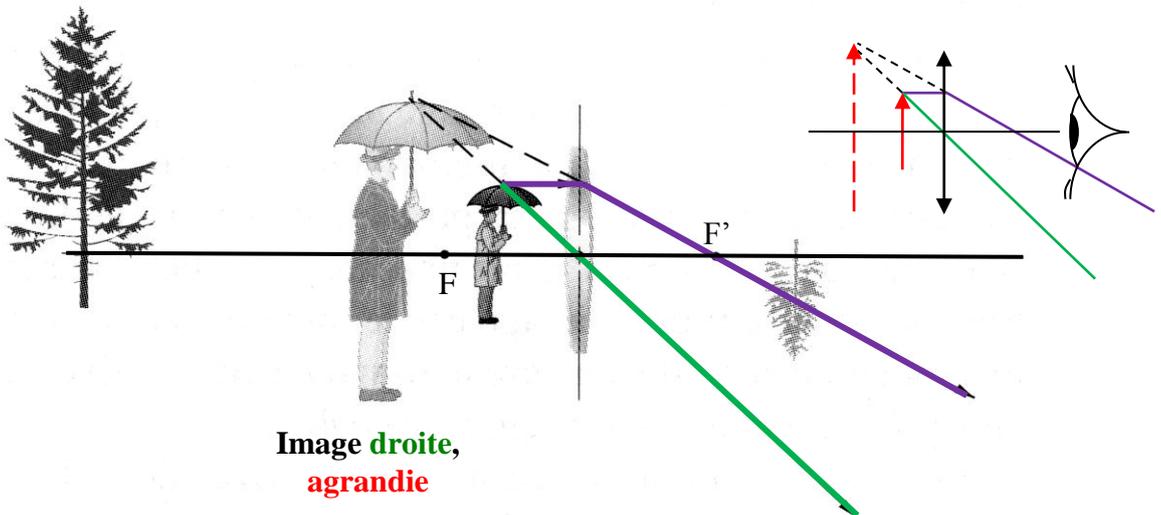


### 1.1.3. Objets-Images conjugués

Objets et images réels



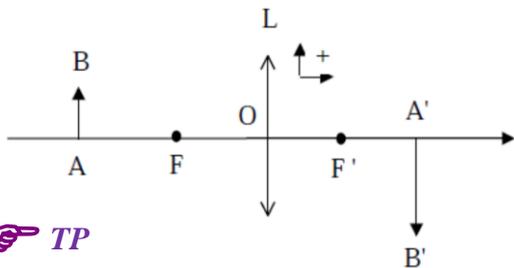
Objet réel et image virtuelle



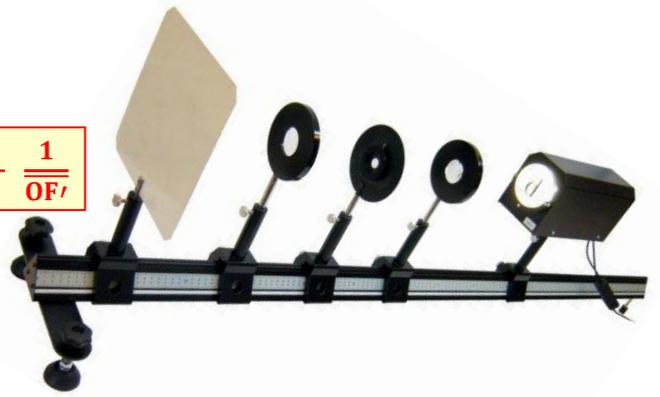
## 1.1.4. Focométrie

⇒ Méthode de la conjugaison

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



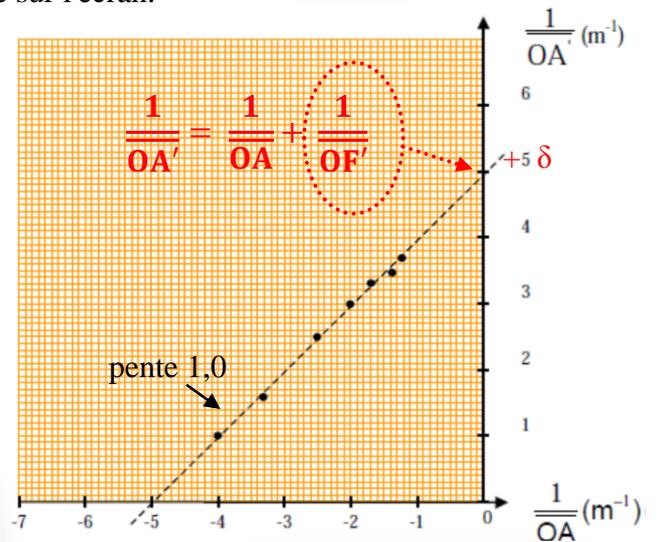
TP



Avec les conventions du schéma :  $\overline{OA} < 0$  et  $\overline{OA'} > 0$ .  
L'objet AB (la lettre **d**) mesure 3,5 cm.

Pour différentes positions de la lentille L sur le banc optique, on cherche l'image A'B' la plus nette possible formée sur l'écran.

$\overline{OA}$	$\overline{OA'}$	$\frac{1}{\overline{OA}}$	$\frac{1}{\overline{OA'}}$	$\overline{A'B'}$	$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$	$\frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$
m	m	m <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>	cm		
-0,25	1,0	-4,0	0,99	-15	-4,3	-4,0
-0,30	0,60	-3,3	1,7	-7,0	-2,0	-1,9
-0,40	0,40	-2,5	2,5	-3,6	-1,0	-1,0
-0,50	0,33	-2,0	3,0	-2,5	-0,71	-0,67
-0,60	0,31	-1,7	3,3	-1,8	-0,51	-0,52
-0,70	0,28	-1,4	3,5	-1,5	-0,43	-0,40
-0,80	0,27	-1,3	3,7	-1,2	-0,34	-0,35



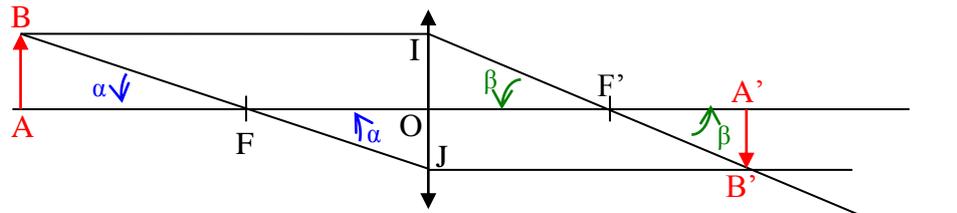
TP



Le grandissement de l'image est  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$  ou  $\overline{A'B'} = \gamma \times \overline{AB}$

On remarque que  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$ .

 **Démonstration de la formule de conjugaison**



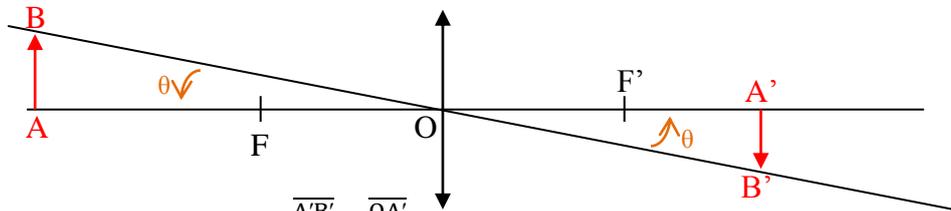
•  $\tan \alpha = \frac{\overline{AB}}{\overline{AF}} = \frac{\overline{JO}}{\overline{FO}} = \frac{\overline{B'A'}}{\overline{FO}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OF}}$  (1)

•  $\tan \beta = \frac{\overline{B'A'}}{\overline{F'A'}} = \frac{\overline{OI}}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A'F'}}$  (2)

$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OF}}{\overline{AF}}$  d'après (1)      et       $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'F'}}{\overline{OF'}}$  d'après (2)      d'où       $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OF}}{\overline{AF}} = \frac{\overline{A'F'}}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{OF'}}{\overline{FA}}$

$\Leftrightarrow \overline{OF'}^2 = \overline{A'F'} \times \overline{FA} = \overline{F'A'} \times \overline{AF} = (\overline{OA'} - \overline{OF'}) \times (\overline{AO} - \overline{FO}) = (\overline{OA'} - \overline{OF'}) \times (\overline{AO} - \overline{OF'})$   
 $\overline{OF'}^2 = (\overline{OA'} \times \overline{AO}) - (\overline{OF'} \times \overline{AO}) - (\overline{OA'} \times \overline{OF'}) + \overline{OF'}^2$   
 $0 = (\overline{OA'} \times \overline{AO}) - (\overline{OF'} \times \overline{AO}) - (\overline{OA'} \times \overline{OF'}) = \frac{(\overline{OA'} \times \overline{AO}) - (\overline{OF'} \times \overline{AO}) - (\overline{OA'} \times \overline{OF'})}{\overline{OA'} \times \overline{OA} \times \overline{OF'}}$   
 $0 = \frac{-1}{\overline{OF'}} + \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}}$       Enfin,  $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OF'}}$ .

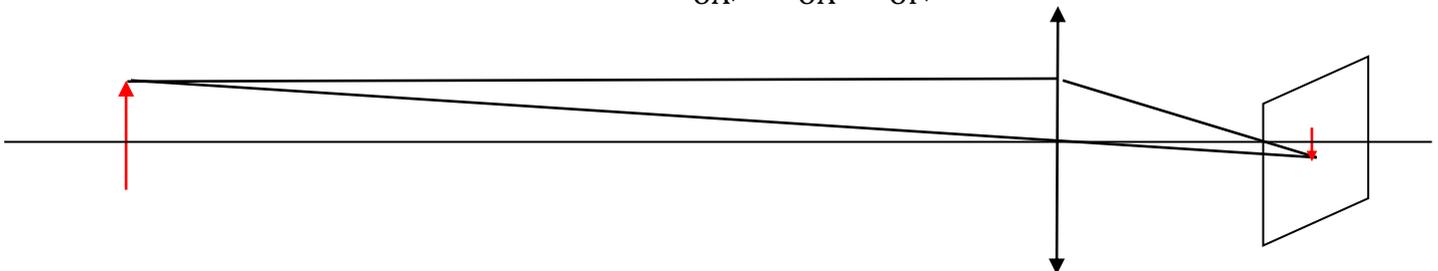
 **Démonstration du grandissement**



Bien entendu selon *Thales*  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

**⇒ Méthode de l'objet éloigné**

Que devient cette formule de conjugaison  $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OF'}}$  si « l'objet A » est à l'infini ?



(Sur un banc d'optique l'objet est considéré éloigné de la lentille au delà de 4 fois sa distance focale).

Alors la distance lentille écran devient la distance focale :

$\lim_{\overline{OA} \rightarrow \infty} \frac{1}{\overline{OA}} = 0$ , alors la formule de conjugaison devient  $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$  soit  $\overline{OA'} = \overline{OF'}$

## ⇒ Autocollimation

Sur un banc d'optique, on place un objet lumineux, la lentille à étudier et dans un plan parallèle à celui de la lentille un miroir plan. La distance entre le miroir et la lentille est quelconque.

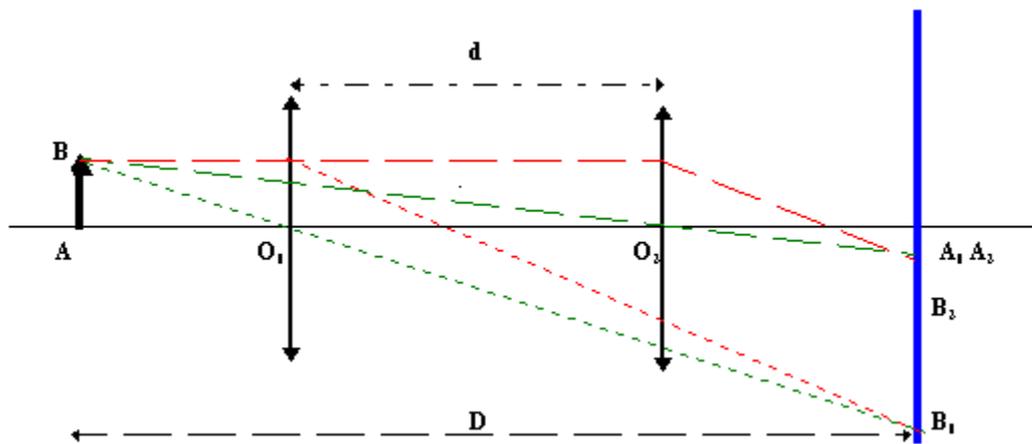
Si la source est confondue avec le foyer de la lentille, tout rayon émerge de la lentille parallèlement à l'axe optique, frappe le miroir et revient sur lui-même : l'image (réelle) se forme dans le plan focal avec un grandissement égal à -1.



## ⇒ Bessel

Sur un banc d'optique, on place un objet lumineux et un écran situé à la distance  $D$  de la source. Il existe deux positions de la lentille qui permettent d'obtenir une image nette de l'objet sur l'écran. Ces deux positions sont séparées par la distance  $d$ . Alors

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$$

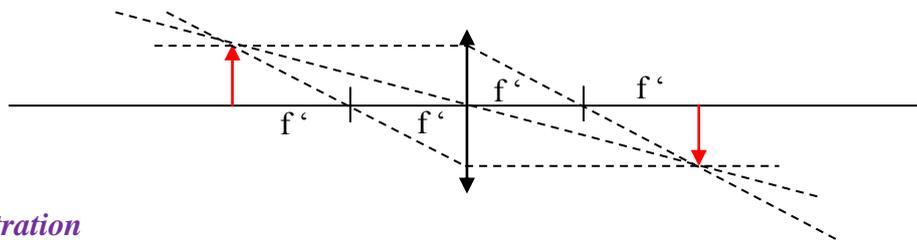


## ⇒ Silberman

Cette méthode dérivée de la méthode de Bessel. On diminue la valeur de  $D$  jusqu'à ce que ces deux positions soient confondues ( $d = 0$ ). On mesure alors sur le banc d'optique la distance  $D$  objet-image et on déduit

$$f' = \frac{D^2}{4D} = \frac{D}{4} \quad \text{On peut remarquer qu'alors le grandissement est égal à } -1.$$

On recherche donc le grandissement égal à  $-1$ , la distance objet – écran est 4 fois la distance focale  $f'$ .



### 👉 Démonstration

$$\text{Si } \gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -1 \quad \text{alors } \overline{OA'} = -\overline{OA} \quad \text{et } \frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OF'}} = \frac{-1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OF'}}$$

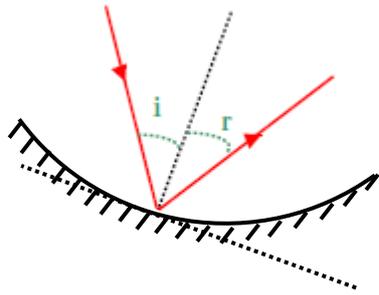
$$\text{ou } \frac{-2}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \quad \text{soit } \overline{OA} = -2\overline{OF'}, \overline{OA'} = 2\overline{OF'} \quad \text{et } \overline{AA'} = \overline{AO} + \overline{OA'} = 2\overline{OF'} + 2\overline{OF'}$$

$$D = \overline{AA'} = 4\overline{OF'}$$

# 1.2. Le miroir sphérique concave

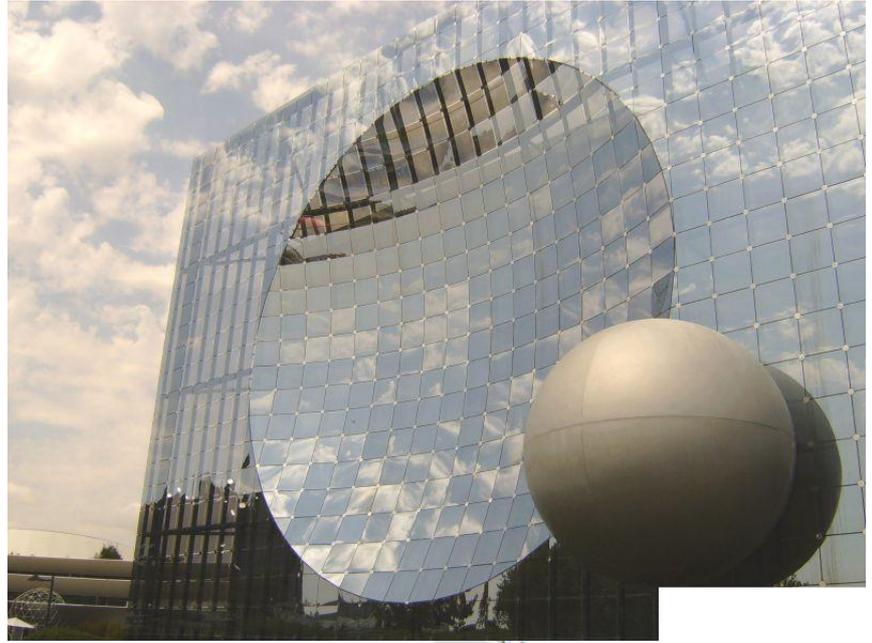
## 1.2.1. Présentation

- Un miroir est constitué d'une surface qui réfléchit la lumière.
- Tout rayon lumineux, réfléchi par un miroir, suit **les lois de Descartes à la réflexion** :
  - L'angle d'incidence **i** du rayon incident est égal à l'angle de réflexion **r** du rayon réfléchi :



$$i = r$$

- Le rayon incident, la normale et le rayon réfléchi sont situés dans un même plan appelé plan d'incidence.

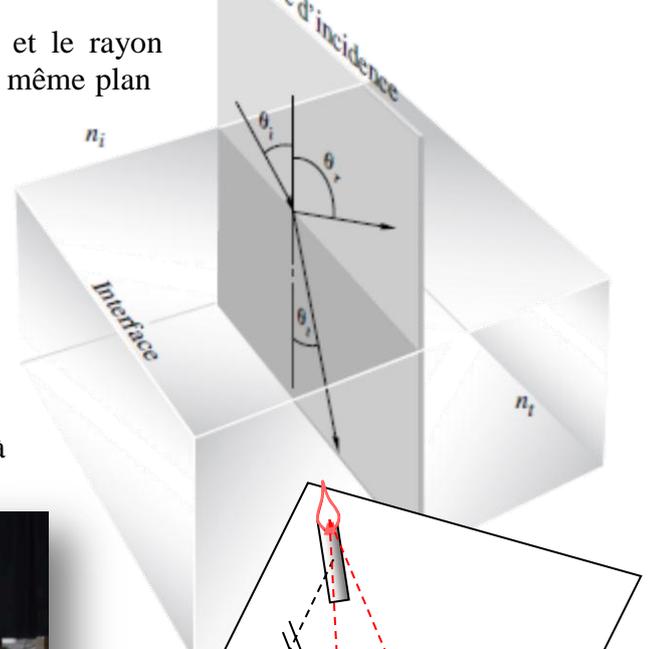


### Miroirs plans

Un miroir plan est constitué d'une surface réfléchissante plane.

### ⇒ Expérience des deux bougies

Deux bougies sont placées symétriquement par rapport à une vitre qui fait office de miroir plan. La vitre réfléchit une partie de la lumière émise par la bougie 1.

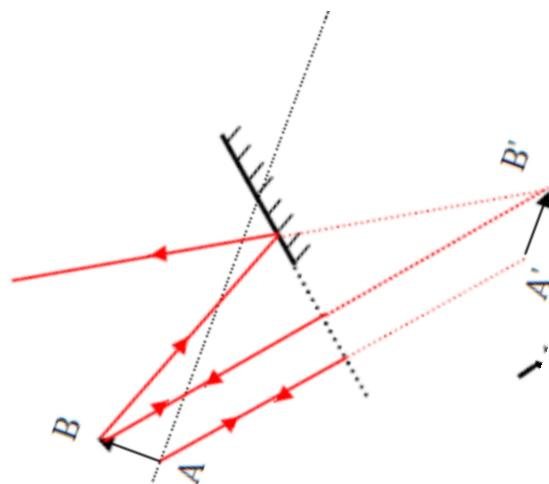
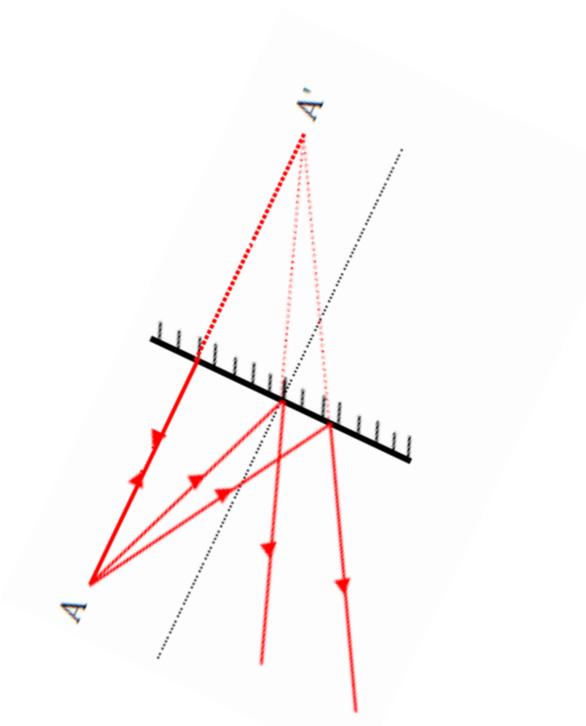


La bougie n°2 n'est pas allumée. On l'observe cependant à travers la vitre coiffée d'une flamme !



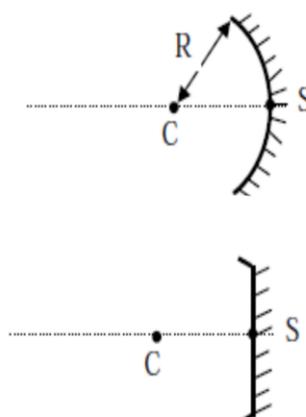
Un miroir plan donne d'un point objet A, un point image A' symétrique par rapport au plan du miroir.

L'image A'B' est le symétrique de l'objet AB par rapport au miroir.

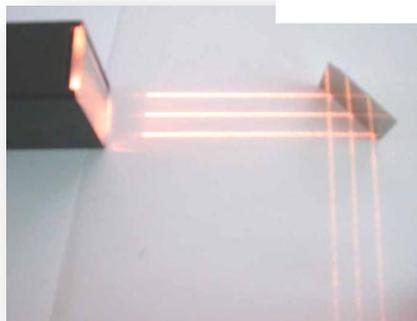


### Miroirs sphériques convergents

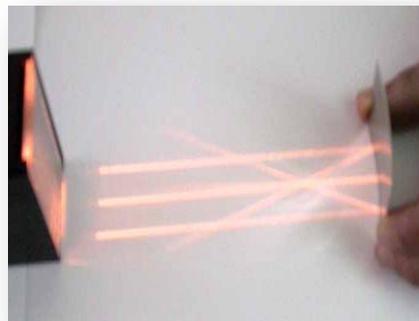
- **Un miroir sphérique convergent est une portion de sphère dont la face intérieure est réfléchissante.**
- Le miroir sphérique est caractérisée par :
  - son centre  $C$
  - son sommet  $S$
  - son rayon  $R = CS$
  - ses foyers objet  $F$  et  $i$
- L'axe optique est la droite  $CS$  qui est l'axe de symétrie de la portion de sphère.
- Un miroir plan est un miroir sphérique convergent de rayon infini.



Miroir primaire d'un télescope



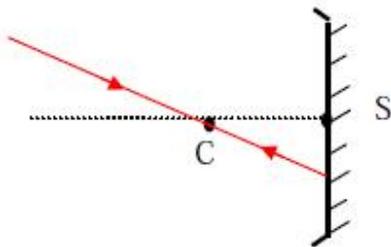
Miroir plan



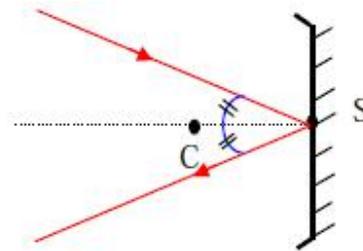
Miroir convergent

## 1.2.2. Propriétés

⇒ Centre C et sommet S

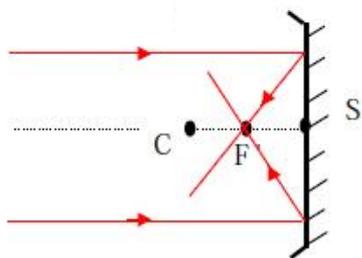


*Tout rayon incident passant par le centre C du miroir est réfléchi sur lui-même.*

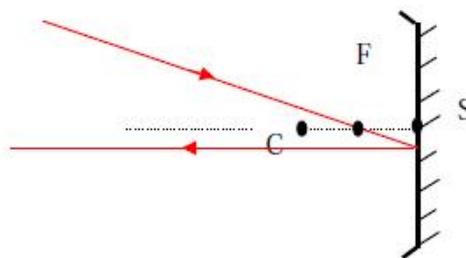


*Tout rayon incident passant par le sommet S du miroir est réfléchi avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence.*

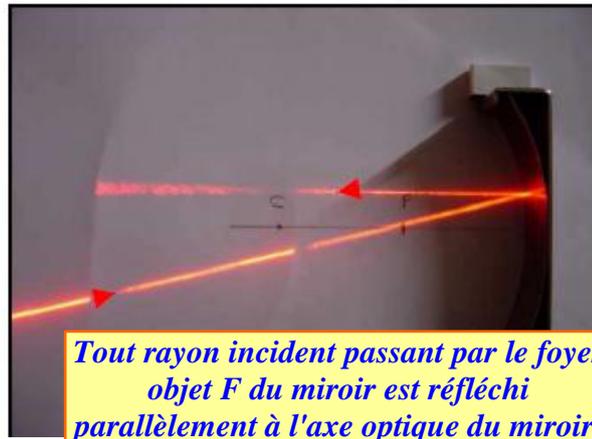
⇒ Foyers et distance focale



TP



*Tout rayon incident parallèle à l'axe optique du miroir est réfléchi en passant par le foyer image F' du miroir.*

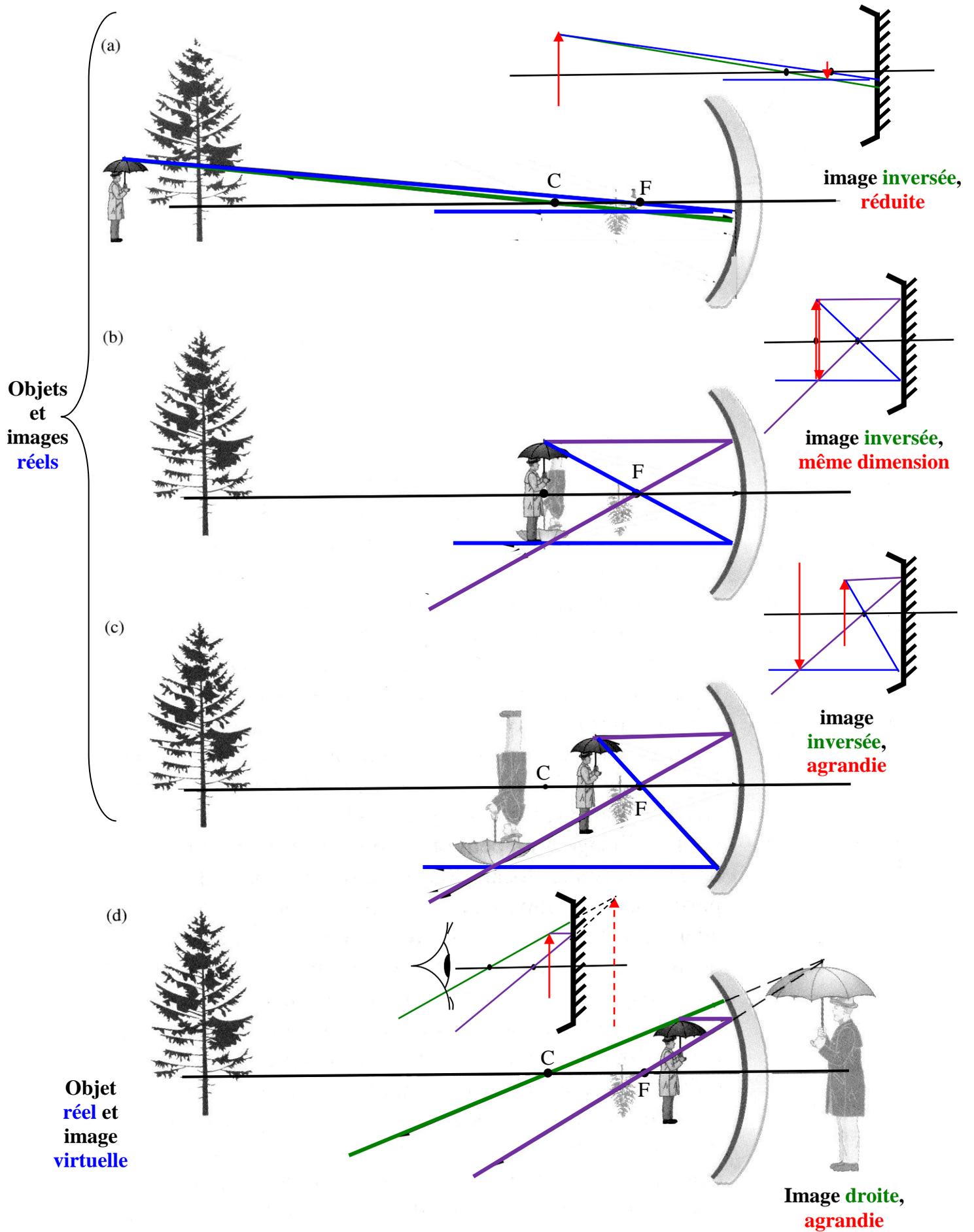


*Tout rayon incident passant par le foyer objet F du miroir est réfléchi parallèlement à l'axe optique du miroir.*

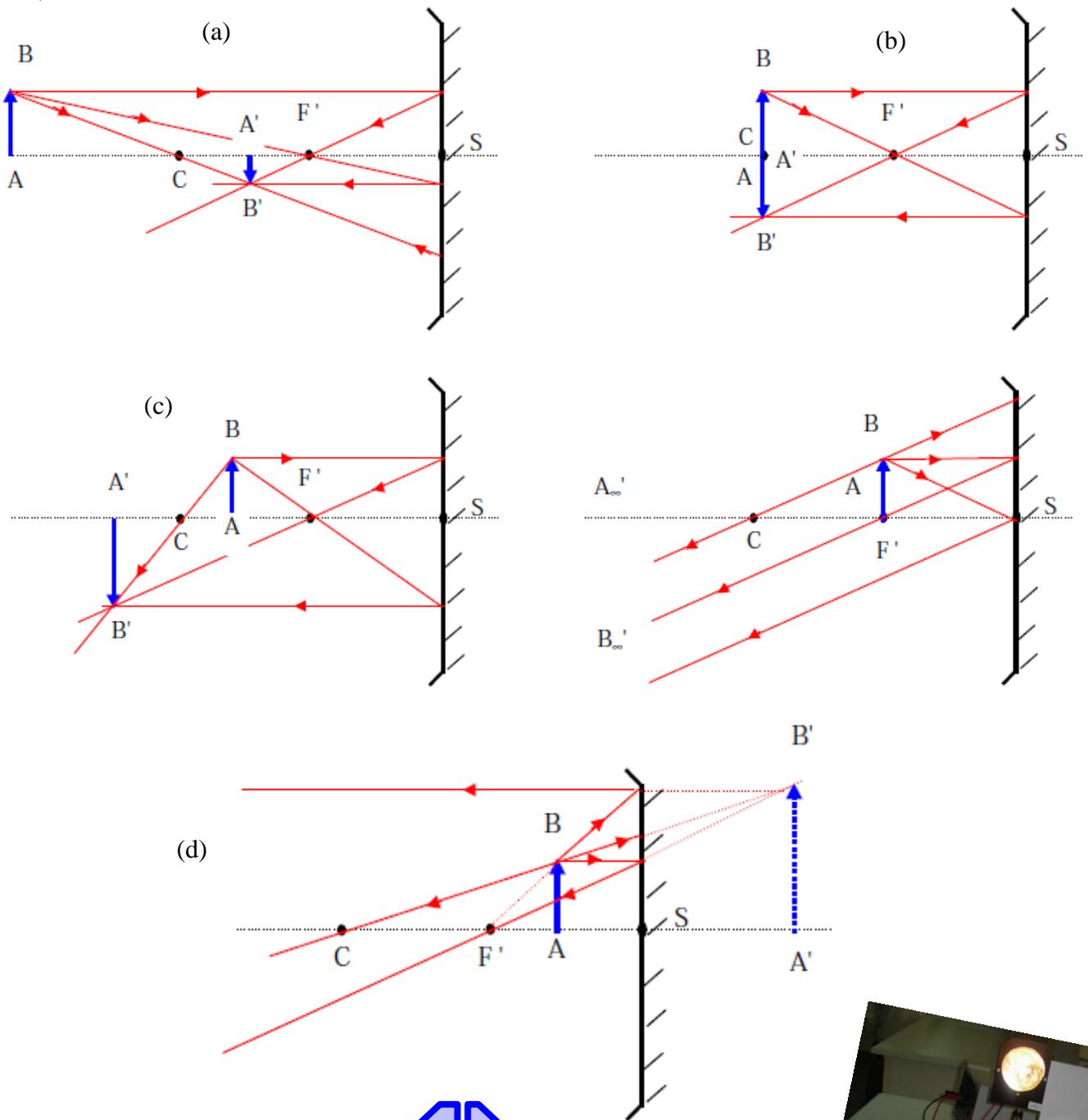
- Les foyers objet F et image F' d'un miroir sphérique convergent sont confondus.
- On constate expérimentalement que  $\overline{CS} = 2 \times \overline{CF}$  d'où l'on déduit *la focale du miroir sphérique concave* :

$$f' = \overline{CF} = \overline{CS} / 2 = \frac{R}{2}$$

### 1.2.3. Objets-images conjugués



Soient,

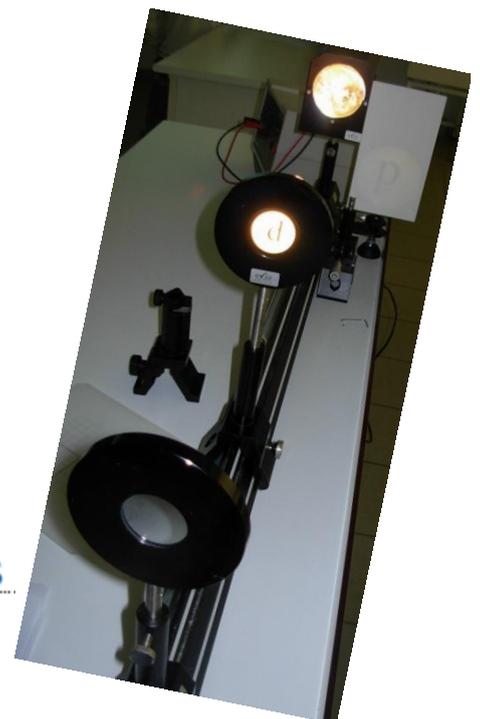
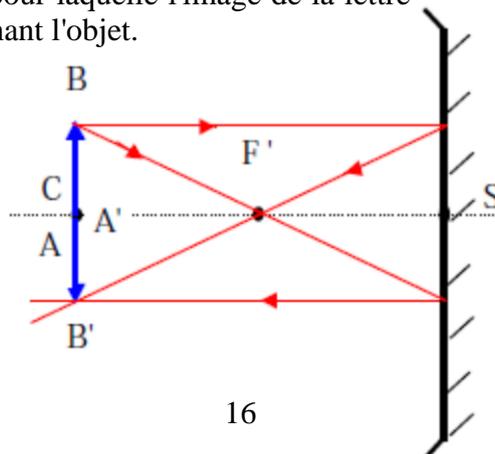


### 1.2.4. Focométrie

⇒ « Silbermann »

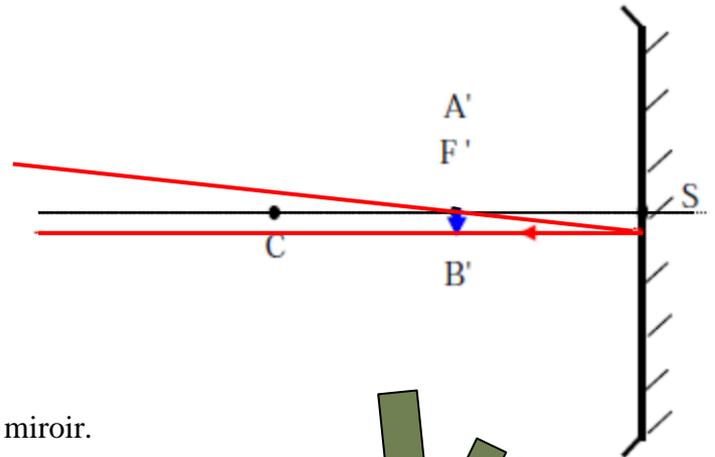
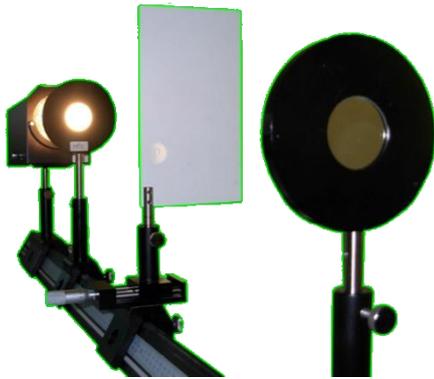


L'objet est la lettre **d** placée sur la graduation 0 cm du banc optique. On place le miroir sphérique sur le support et on cherche la position du miroir sur le banc pour laquelle l'image de la lettre **p** est renversée dans le plan contenant l'objet.



## ⇒ Objet « à l'infini »

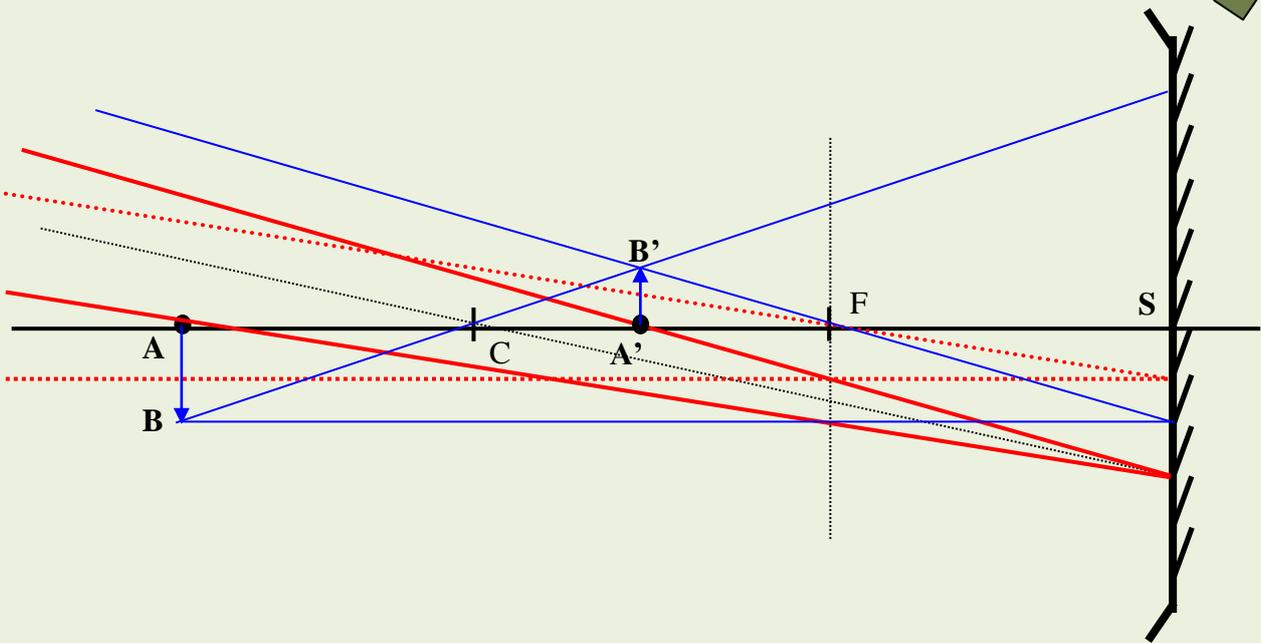
Pour déterminer la distance focale du miroir, il faut que l'objet soit situé « à l'infini » (*on place le miroir à l'extrémité du banc optique*). Avec le demi-écran on recherche une image nette de l'objet qui se forme alors proche du plan focal du miroir.



Cette distance représente la **distance focale  $f' = \overline{CF}$**  du miroir.

## ⇒ Conjugaison

Info



On démontre la formule des miroirs pour des rayons proches de l'axe optique (paraxiaux),

$$\frac{1}{\overline{A'S}} = \frac{1}{\overline{AS}} + \frac{1}{\overline{FS}}$$

## 2. Instruments d'optique

### 2.1. Le microscope optique

#### 2.1.1. Présentation

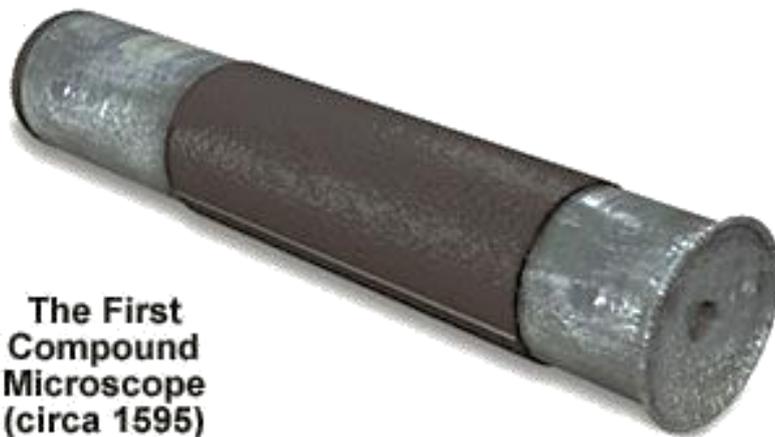
Il y a 4 siècles, le monde extraordinaire de l'infiniment petit était totalement inconnu de l'Homme. Vers l'an 1600, on découvrit que la combinaison de plusieurs lentilles convergentes permettait d'obtenir un instrument d'observation optique.

« En 1674, le Hollandais Antonie Van Leewenhoek découvrit, grâce à l'un de ses microscopes, un nouvel univers. Il observait de la vase recueillie dans un lac lorsqu'il découvrit des organismes inconnus... Il ouvrait ainsi par inadvertance la voie de la microbiologie. Il fabriqua lui-même plus de cinquante microscopes...; son premier microscope ne comporte qu'une seule lentille de forme convexe, ce qui l'apparente purement et simplement à une loupe ».

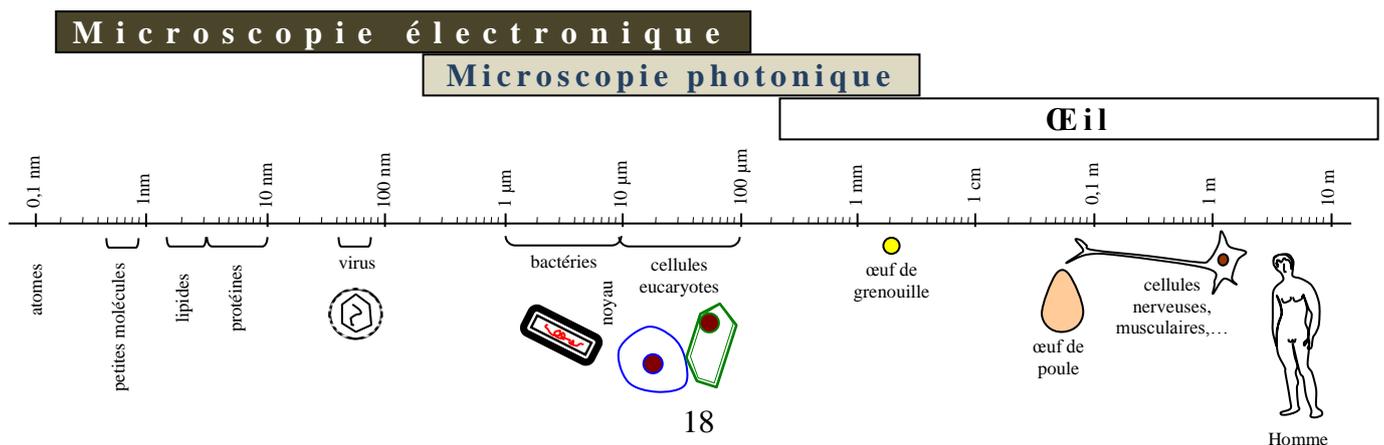
Revue **Pour la Science** - Juillet 1998 - Brian Ford, biologiste anglais

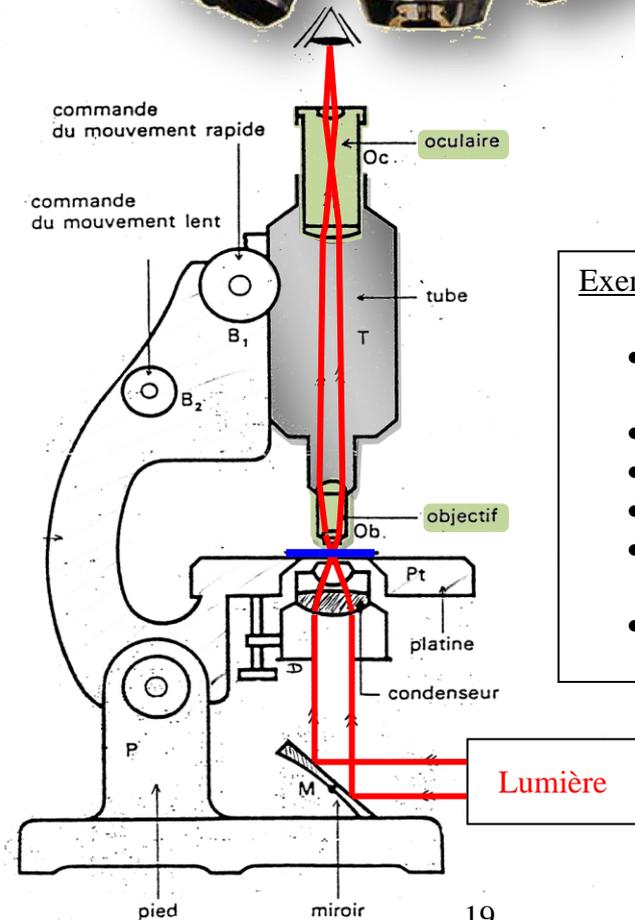
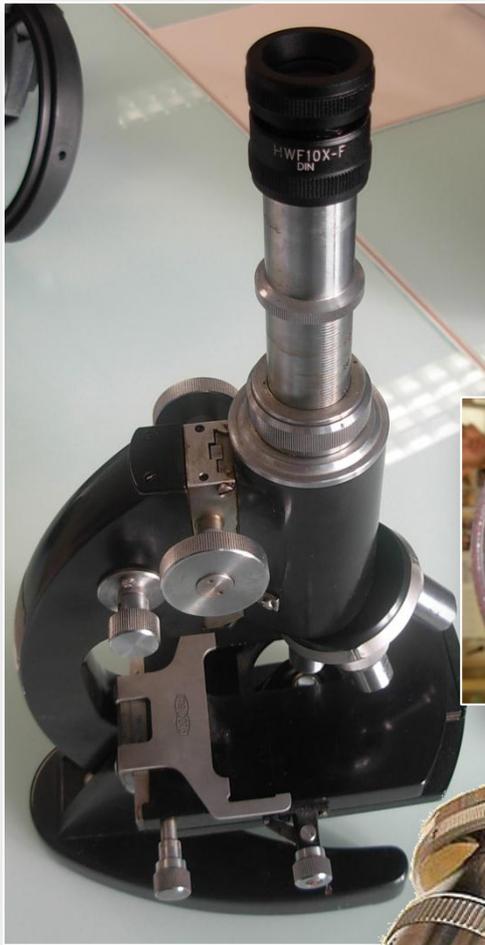
En 1619, le microscope de Jansen est décrit en partie par W. Boreel, ambassadeur de France en Hollande, de la manière suivante : « ... la base était constituée d'un disque d'ébène, sur lequel on plaçait des objets minuscules que l'on regardait d'en haut et qui étaient presque miraculeusement grossis »

Les grandes inventions - Michel Rival



Les premiers observateurs virent des images très déformées à cause de la médiocre qualité du verre et des lentilles. Celles-ci se perfectionnèrent beaucoup au cours du XIX<sup>e</sup> siècle et le microscope se développa.





- Exemple
- Tube monoculaire droit ; potence inclinable
  - Mouvement rapide par crémaillère
  - Mise au point par vis micrométrique
  - Diaphragme à iris
  - Objectifs : focales 40 mm et 16 mm, diamètre 4 mm
  - Oculaire : focale 2,5 cm.

Un microscope comprend deux systèmes optiques :

- **L'objectif**, placé devant **l'objet**, est constitué de plusieurs lentilles assimilables à une seule lentille convergente de très courte distance focale (de l'ordre du millimètre).

Le **grandissement  $\gamma_1$**  est gravé sur l'objectif.

(Par exemple  $\times 4$ ,  $\times 10$ ,  $\times 40$ )



- **L'oculaire**, placé devant **l'œil** de l'observateur, de distance focale (de l'ordre du cm). L'oculaire est assimilable à une lentille convergente et joue le rôle d'une **loupe**.

Le **grossissement  $G_2$**  est gravé sur l'oculaire.

(Par exemple  $\times 10$ )



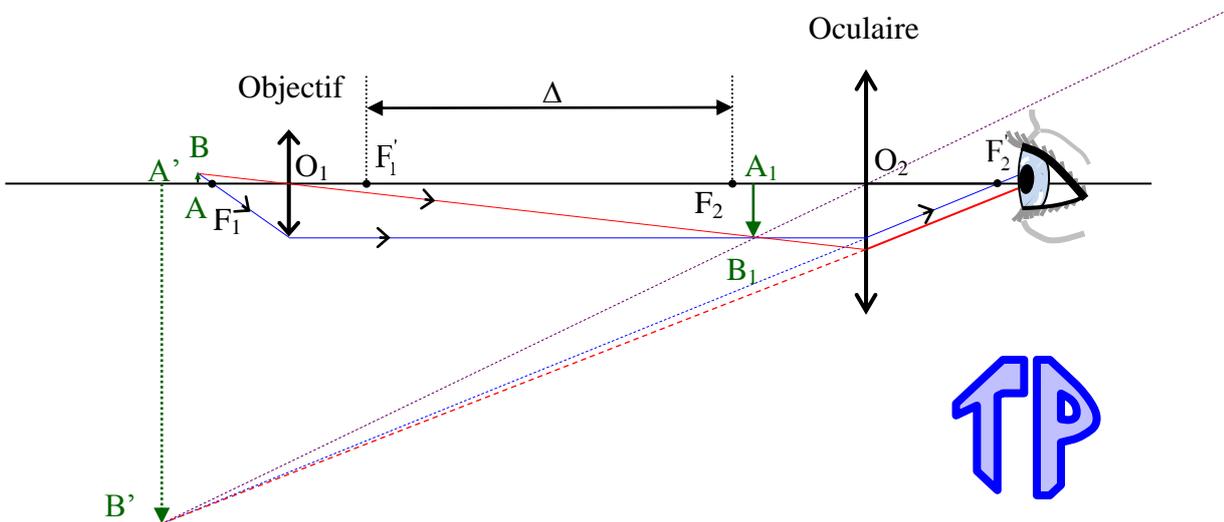
La distance entre le foyer image  $F'_1$  de l'objectif et le foyer objet  $F_2$  de l'oculaire, appelée **intervalle optique  $\Delta$** , est invariable :  **$\Delta = F'_1 F_2$** . ( $\Delta \approx 16$  à  $18$  cm).

Le bloc objectif-oculaire se déplace à l'aide du bouton de crémaillère et de la vis micrométrique et permet d'effectuer la mise au point pour avoir une image nette.

L'éclairage de l'objet est assuré par un dispositif comprenant un miroir et un condenseur.

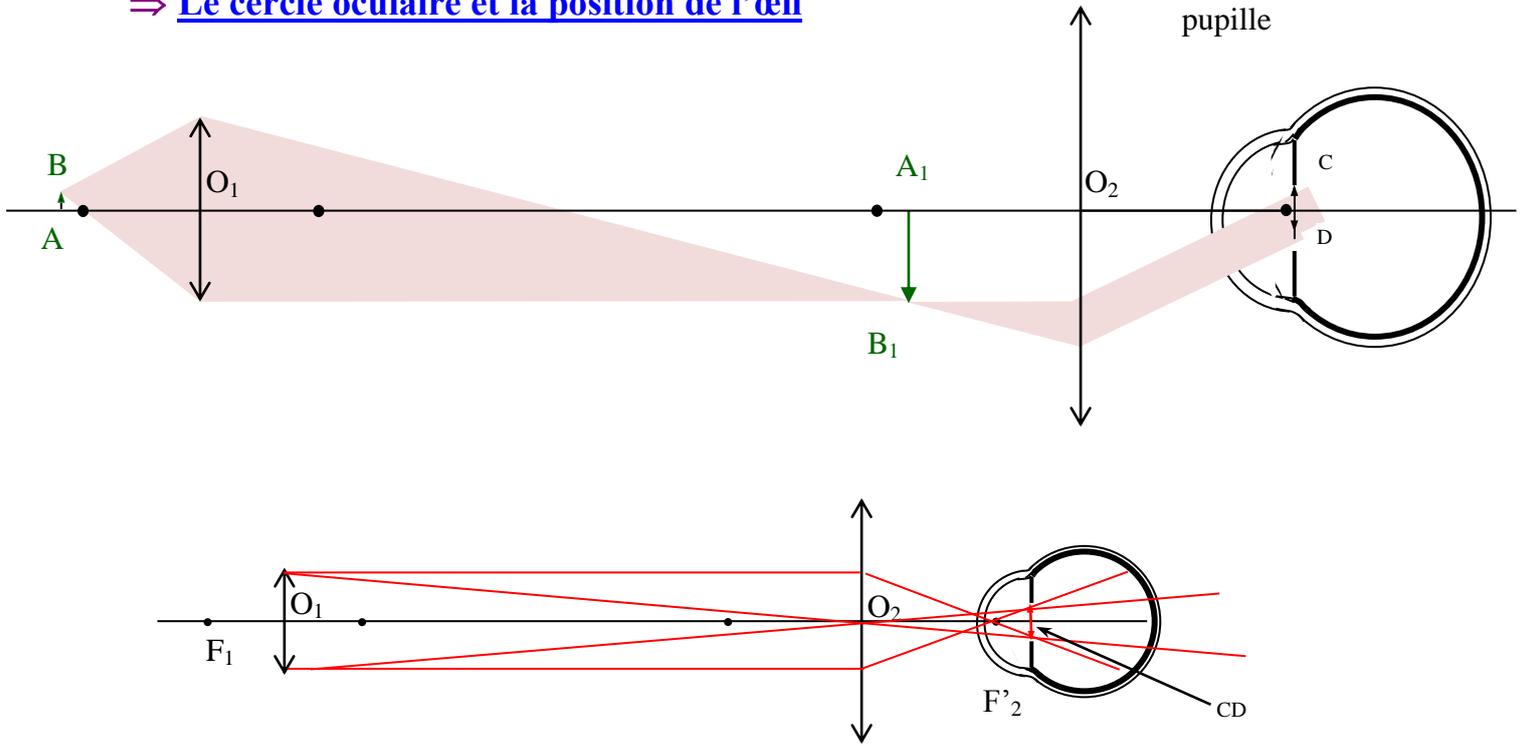
### 2.1.2. Microscope simplifié

⇒ ... par 2 lentilles sphériques minces



L'objectif est de très petite distance focale (quelques mm). L'image intermédiaire  $\overline{A_1B_1}$  donnée par l'objectif est objet pour l'oculaire. L'image finale  $\overline{A'B'}$  qu'observe l'œil est virtuelle, inversée et agrandie.

⇒ Le cercle oculaire et la position de l'œil

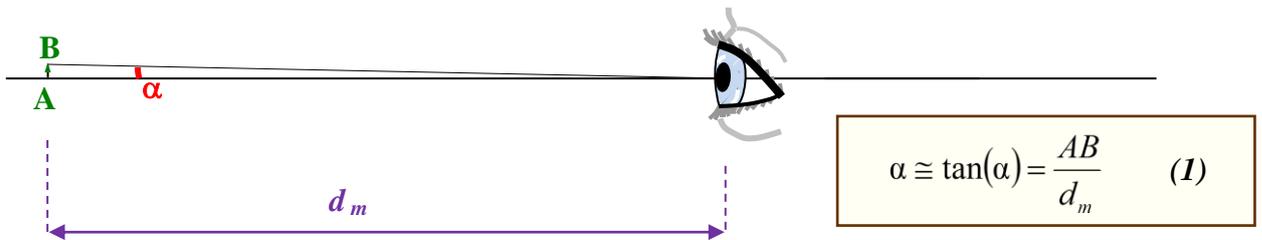


Tous les rayons lumineux issus de l'objet et qui traversent le microscope passent, à la sortie, à l'intérieur d'un cercle de diamètre CD que l'on appelle le **cercle oculaire**. Son diamètre est toujours inférieur à celui de la pupille de l'œil. L'œil dont la pupille est dans le plan de ce cercle reçoit toute la lumière qui traverse le microscope.

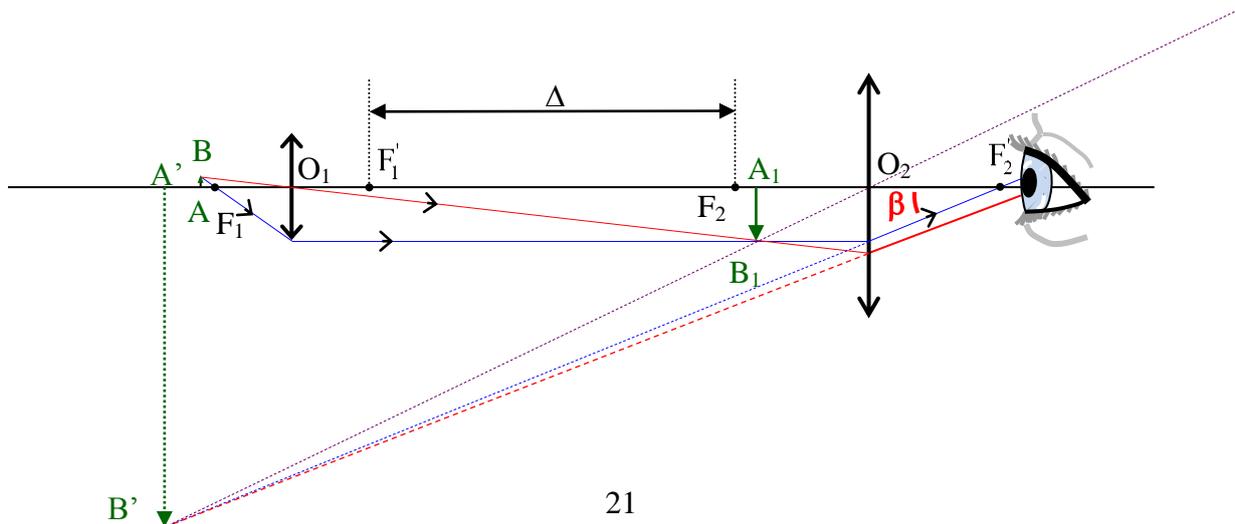
⇒ Le grossissement standard G

Le rapport du **diamètre apparent de l'image  $\beta$**  produite par le microscope, sur le **diamètre apparent de l'objet  $\alpha$**  observé à l'œil nu à la distance minimale de vision distincte, est le **grossissement G** :

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

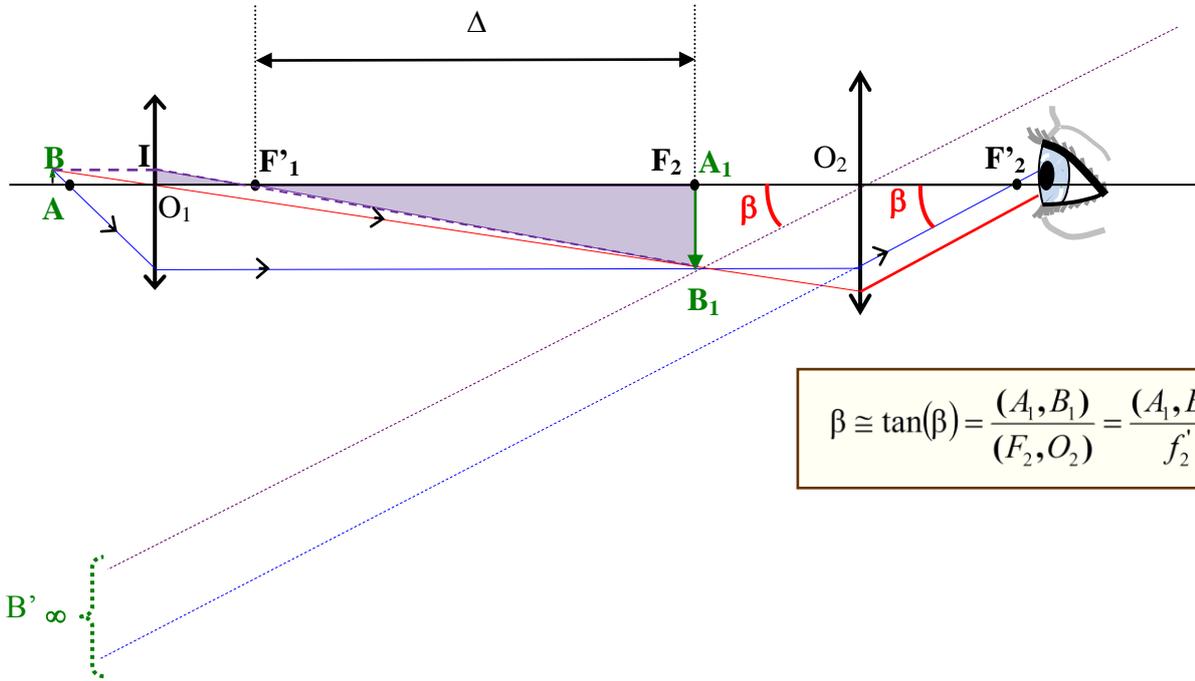


La distance minimale de vision distincte (punctum proximum) notée «  $d_m$  » est de **25 cm** pour l'œil normal.



⇒ Le microscope « réglé à l'infini »

- **Mise au point à l'infini** : L'image  $\overline{A'B'}$  est à l'infini quand l'image intermédiaire  $\overline{A_1B_1}$  est dans le plan focal objet de l'oculaire. Cette position s'obtient par déplacement du tube sur la potence, en tournant les vis de mouvement rapide puis micrométrique.



Par cette observation à l'infini, l'œil ne fatigue pas puisqu'il n'a pas à accommoder.

- **Grossissement commercial du microscope** :

$F_1'O_1I$  et  $F_1'A_1B_1$  sont des triangles semblables et donc  $\frac{(A_1, B_1)}{(O_1, I)} = \frac{(A_1, B_1)}{(A, B)} = \frac{\Delta}{(O_1, F_1')} = \frac{\Delta}{f_1'} = |\gamma_1|$  (3)

(1), (2) et (3) donnent  $G_c = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\Delta \cdot d_m}{f_1' \cdot f_2'} = |\gamma_1| \times G_2$  est le « grossissement commercial du microscope » pour lequel

- $|\gamma_1| = \frac{\Delta}{f_1'}$  est le grossissement commercial de l'objectif (par exemple  $\times 4$ ,  $\times 10$ ,  $\times 40$ ),
- $G_2 = \frac{d_m}{f_2'}$  est le grossissement commercial de l'oculaire (par exemple  $\times 10$ ).

**Exemple**

- $\Delta = 16 \text{ cm}$	$f_1' = 4,0 \text{ mm}$	$ \gamma_1  = \frac{160}{4,0} = 40$	} $G = 40 \times 10 = 400$
- $d_m = 0,25 \text{ m}$	$f_2' = 2,5 \text{ cm}$	$G_2 = \frac{25}{2,5} = 10$	

À travers ce microscope un objet est vu sans accommoder, sous un angle 400 fois plus grand.

## 2.2. La lunette astronomique

### 2.2.1. Présentation

La première association de lentilles constituant une lunette date des années 1590 par l'italien Giambattista Della Porta (1535-1615). Puis au XVII<sup>e</sup> siècle le lunetier hollandais Hans Lippershey déposa une demande de brevet pour une lunette d'observation. Galilée reprit cet instrument, créa sa propre lunette pour en faire une utilisation astronomique (*oculaire divergent pour la lunette de Galilée*).



« Je me suis d'abord fabriqué un tube de plomb aux extrémités duquel j'ai adapté deux lentilles de verre, toutes deux planes d'un côté, mais l'une sphériquement convexe et l'autre concave du côté opposé ; ensuite en approchant mon œil de la lentille concave, j'ai vu les objets assez grands et rapprochés ; de fait, ils apparaissent trois fois plus proches et neuf fois plus grands que s'ils étaient seulement regardés à l'œil nu ». **1610 Galilée, le messenger des étoiles**

Kepler perfectionne la lunette en remplaçant l'oculaire par une lentille convergente. Puis, à la fin du siècle, Newton voulant éliminer les défauts d'achromatisme des lentilles, utilise le miroir. Le télescope à réflexion ainsi réalisé grossissait 30 fois.

On schématise la lunette par l'assemblage de deux tubes coulissant l'un dans l'autre. À l'extrémité de chacun d'eux se trouve la lentille convergente (lunette de Kepler) : l'objectif pour l'un, l'oculaire pour l'autre. Une lunette est donc un système à deux lentilles convergentes de même axe optique.

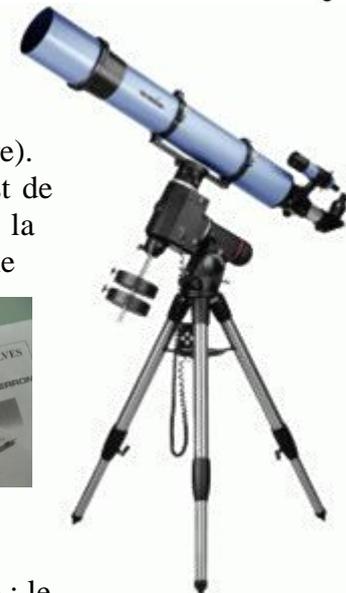
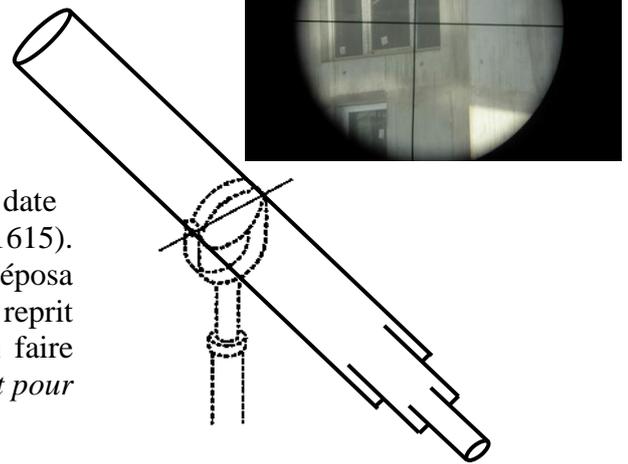


— **L'objectif** est assimilé à une lentille mince convergente de grand diamètre d'ouverture (entre 20 cm et 1 m) et de grande distance focale  $f_1$  (de l'ordre du mètre, 15 à 20 fois ce diamètre). Il est dirigé vers l'objet à observer situé à l'infini. Son rôle est de former une image intermédiaire, objet à l'oculaire. À travers la lunette, la luminosité d'une étoile est d'autant plus grande que le diamètre de l'objectif est grand.

— **L'oculaire** joue le rôle d'une loupe dans l'examen de l'image fournie par l'objectif. C'est un système de lentilles assimilé à une lentille convergente unique, de petite distance focale  $f_2$  (de l'ordre du centimètre).



Un œil normal est au repos lorsque l'objet qu'il observe est à l'infini. Pour lui, la mise au point consiste à confondre le foyer image de l'objectif et le foyer objet de l'oculaire : le système est dit afocal. Pour faire cette mise au point on règle la distance entre l'objectif et l'oculaire à l'aide d'une vis mais seul l'oculaire est mobile. L'œil est alors placé au cercle oculaire pour recevoir le maximum de lumière. Celui-ci se trouve à proximité du foyer image de l'oculaire.



## 2.2.2. Lunette astronomique simplifiée

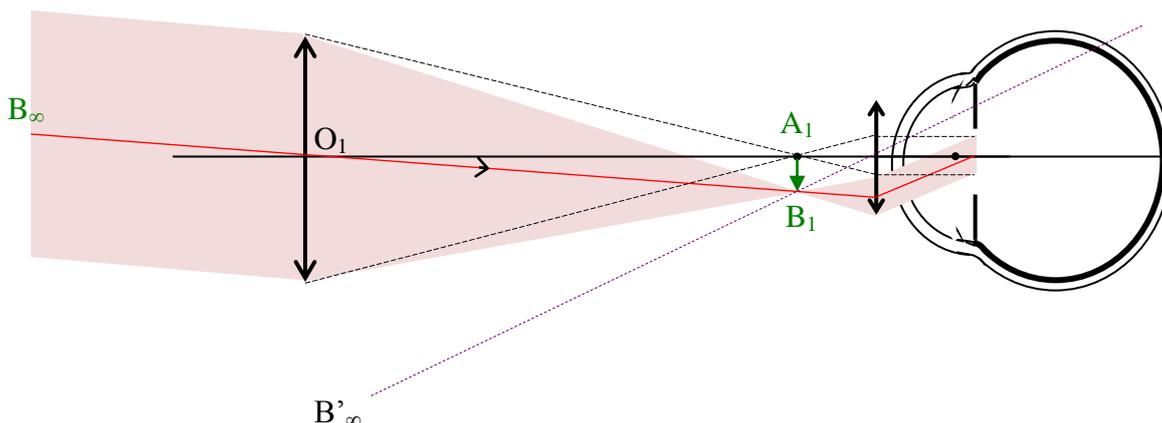
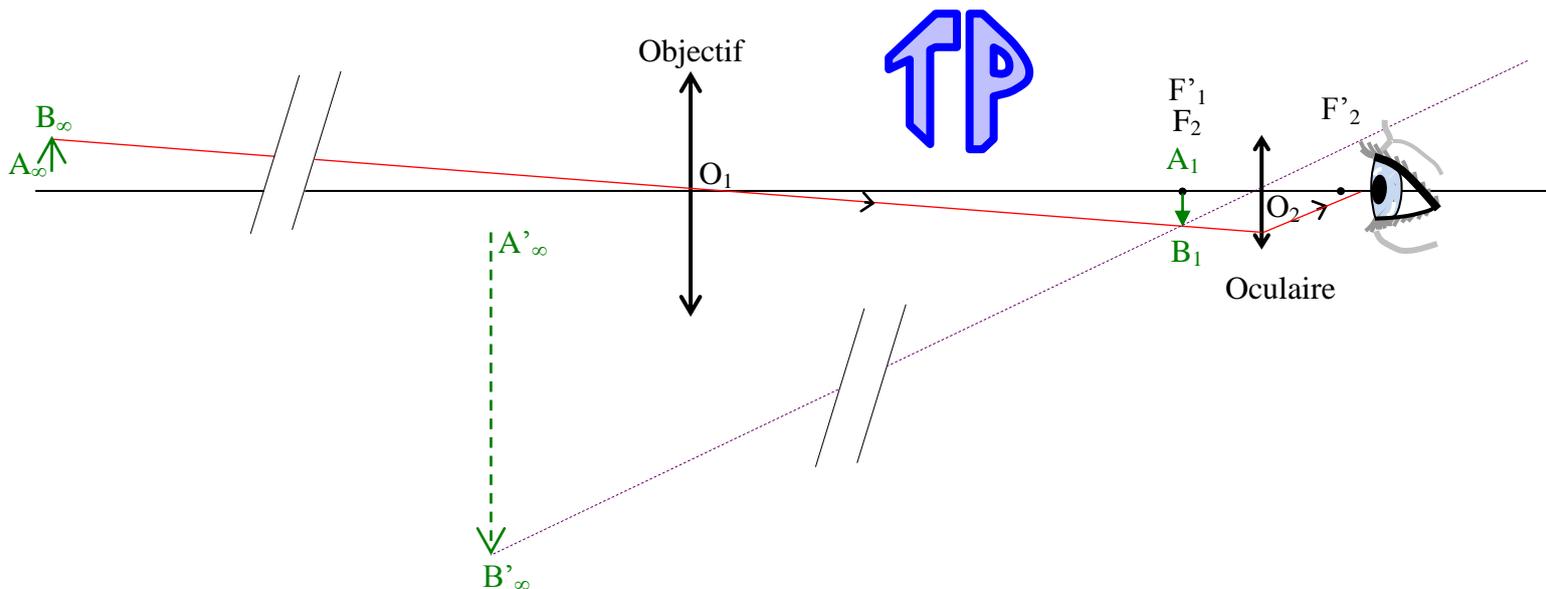
⇒ ... par un système afocal de 2 lentilles sphériques minces

L'objet  $\overline{AB}$  est situé à l'infini.

Le plan focal objet  $F_2$  de l'oculaire coïncide avec le plan focal image  $F'_1$  de l'objectif.

L'image finale  $\overline{A'B'}$  est rejetée à l'infini.

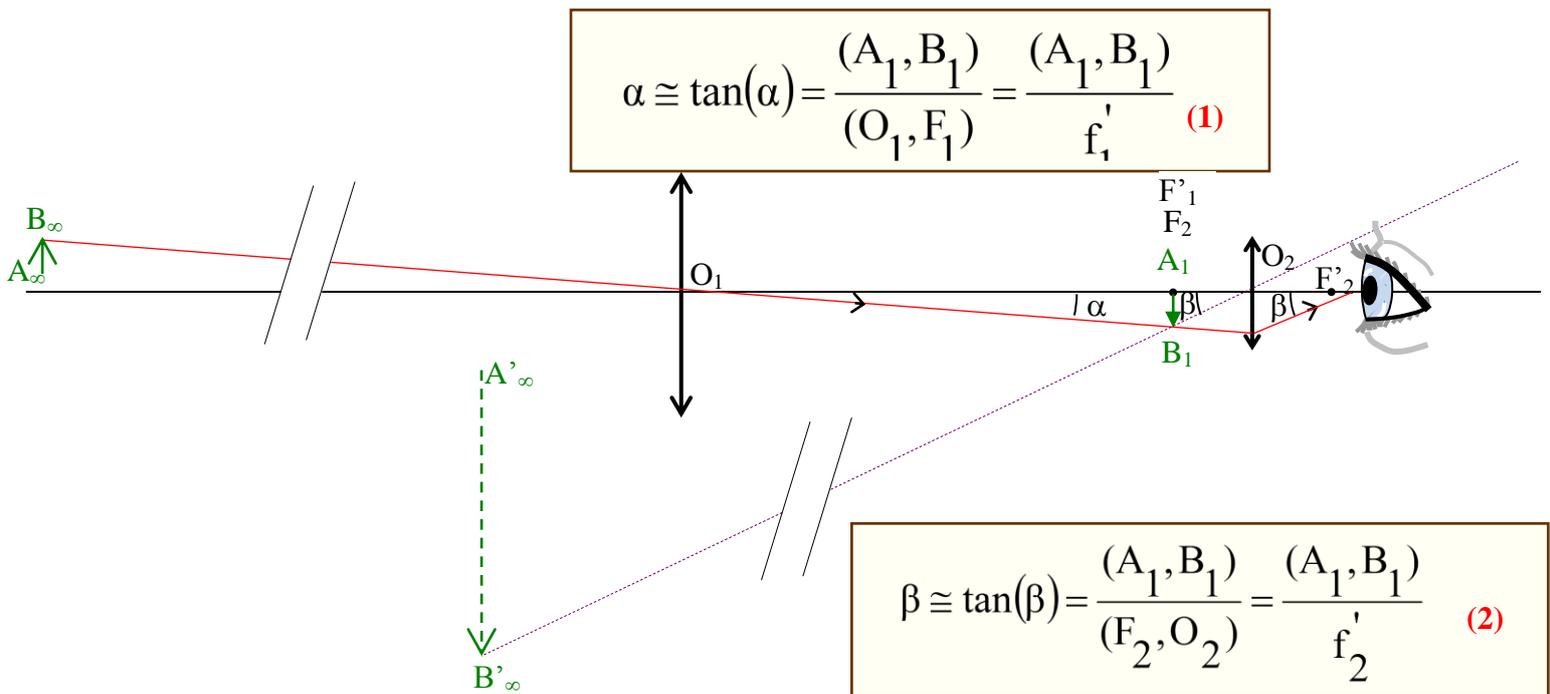
Comme pour le microscope,  $\overline{A'B'}$  est renversée par rapport à l'objet  $\overline{AB}$  et le **cercle oculaire** se situe au-delà et très près du plan focal image de l'oculaire.



⇒ Le grossissement standard G

Le grossissement standard d'une lunette astronomique est le rapport entre l'angle  $\beta$  sous lequel l'œil voit l'objet à travers la lunette (diamètre apparent de l'image) et l'angle  $\alpha$  sous lequel l'œil voit l'objet à l'œil nu (diamètre apparent de l'objet).

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



Dans le cas de la lunette afocale, on a :

(1) et (2) 
$$G = \frac{f'_1}{f'_2}$$

Dans le commerce, le grossissement des lunettes astronomiques varie entre quelques dizaines et quelques centaines.

### Exemple

#### Lunette astronomique – Caractéristiques.

Objectif : diamètre 60 mm - focale : 800 mm  
 Objectif traité antireflet - objectif achromatique  
 Oculaires : 6 mm, 12,5 mm et 20 mm,  
 Grossissement : 40 x à 133 x  
 Longueur du tube : 85 cm

- $f'_1 = 800 \text{ mm}$
- $f'_2 = 6 \text{ mm}$

À travers cette lunette astronomique un objet peut être vu sans accommoder, sous un angle 133 fois plus grand.



La grande lunette de l'observatoire de Nice, grâce à son objectif de distance focale 17,89 m (de diamètre 83 cm) et à ses oculaires de 10 mm et 8 mm, permet des grossissements de 1800 à 2000.



## 2.3. Le télescope

### 2.3.1. Présentation

En 1669, Isaac Newton est professeur de mathématiques à Cambridge. Il présente son télescope à miroirs à la Royal Society.

*« Si Newton a construit le premier télescope, c'est parce qu'il est persuadé, à tort, que sa théorie des couleurs condamne la lunette astronomique. Il a démontré en effet, que la lumière blanche était un mélange de lumières colorées, que le prisme déviait différemment. Mais ce n'est pas vrai seulement du prisme. Cela va se produire chaque fois que la lumière traverse la surface d'un morceau de verre, une lentille en particulier : l'objectif d'une lunette donnera toujours des images irisées ... Le télescope doit remplacer la lunette, car son miroir ne risque pas de disperser les couleurs de la lumière. Le problème avec le télescope, c'est que l'image se forme devant le miroir. L'idéal pour la regarder serait de mettre la tête devant le tube mais alors on empêcherait la lumière de rentrer....Newton a l'idée de renvoyer le faisceau de rayons non pas vers l'arrière mais sur le côté du tube. Pour cela, il suffit d'un petit miroir plan placé sur l'axe du tube et incliné à 45 degrés.... »*

*Newton et la mécanique céleste - J P Maury - Découvertes Gallimard*

Le premier télescope de Newton mesure à peine 20 cm de long. Ses images sont 9 fois plus grandes qu'avec une lunette de 80 cm.



Actuellement, le VLT « Very Large



The VLT Array on the Paranal Mountain

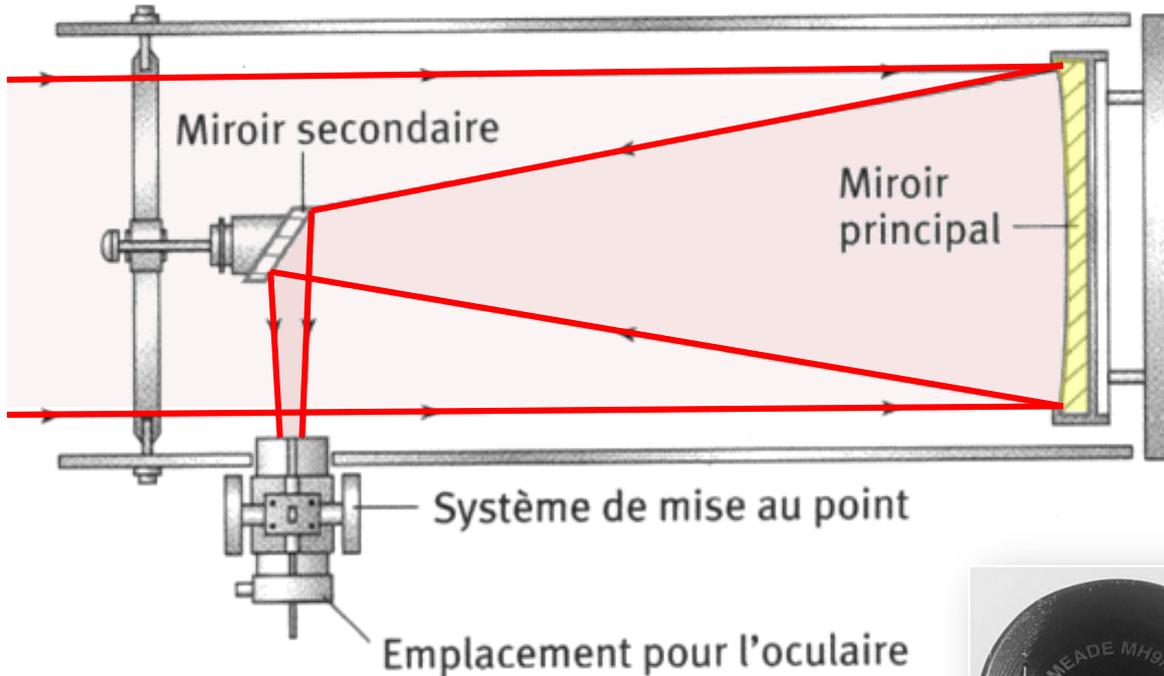


Télescope », dans le nord du Chili à 2600 m d'altitude, est

composé de 4 miroirs de 8,2 m chacun. Il équivaut à un monstre de 16,4 m de diamètre. Dans certaines directions, il a le pouvoir d'un miroir de 200 m de diamètre.

Le télescope est destiné à l'observation d'astre, il est formé principalement de deux systèmes optiques :

- **L'objectif**, constitué par un **miroir parabolique** (*miroir principal*) que l'on assimilera à un miroir sphérique de grande distance focale et de grand diamètre ;
- **L'oculaire**, assimilé à une **lentille mince convergente** de courte distance focale. Il sert de loupe pour observer l'image formée par l'objectif.



Le faisceau lumineux revenant sur lui-même suite à l'objectif, il faut placer l'oculaire de façon à ce que l'observateur ne perturbe pas le faisceau incident.

Dans le **télescope de Newton**, un miroir plan incliné à  $45^\circ$  (*miroir secondaire*) renvoie sur le côté les rayons lumineux issus du miroir convergent.



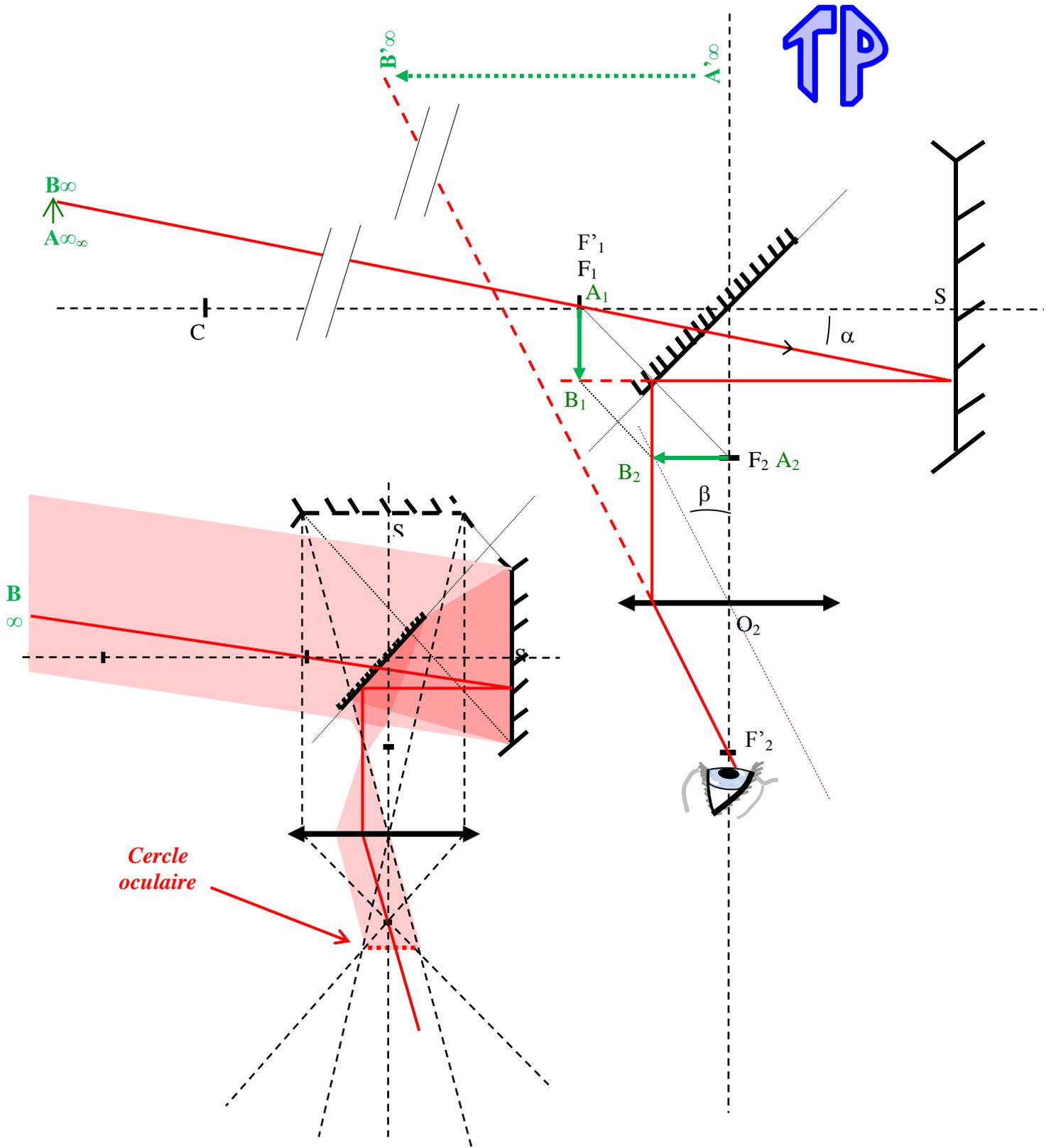
## 2.3.2. Le télescope de Newton simplifié

⇒ ... par un système afocal de 2 lentilles sphériques

L'objet  $\overline{AB}$  est situé à l'infini.

Le plan focal objet  $F_2$  de l'oculaire coïncide avec le plan focal image  $F'_1$  de l'objectif (via le miroir plan).

L'image finale  $\overline{A'B'}$  est rejetée à l'infini.



⇒ Le grossissement standard G

$$\alpha \cong \tan(\alpha) = \frac{(A_1, B_1)}{(S, F_1)} = \frac{(A_1, B_1)}{f_1'}$$

$$\beta \cong \tan(\beta) = \frac{(A_2, B_2)}{(F_2, O_2)} = \frac{(A_1, B_1)}{f_2'}$$

$$G = \frac{f_1'}{f_2'}$$

Dans le cas du télescope afocal, on a :

**Exemple**

Télescope type newton  
Diamètre 115 mm - focale 910 mm  
Monture équatoriale allemande motorisable  
Porte oculaire diamètre 31,75 mm - renvoi coudé  
Livré avec 2 oculaires : 6 mm (152x) et 20 mm (46x)  
Chercheur achromatique réticulé 6x30

- $f_1' = 910$  mm
- $f_2' = 6$  mm

À travers cette lunette astronomique un objet peut être vu sans accommoder, sous un angle 152 fois plus grand.

⇒ Limitation des lunettes et télescopes

Optique – Eugene Hecht  
Pearson Education.

Info

Télescopes à miroirs

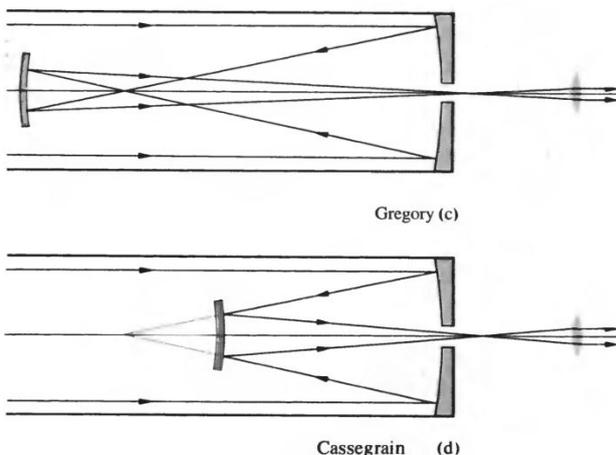
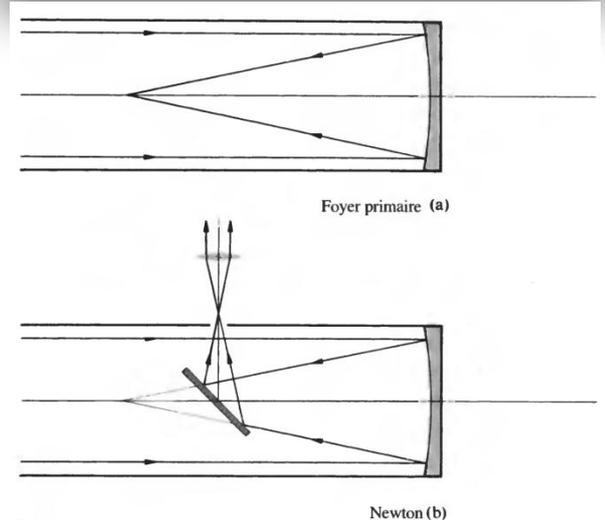
« La fonction première des systèmes tels que les lunettes ou les télescopes est d'observer nettement des objets extrêmement éloignés et souvent à peine visibles. Astronomiquement parlant, il s'agit de pouvoir résoudre des objets, c'est-à-dire de distinguer des détails au sein d'un même corps céleste, par exemple deux étoiles dans un système binaire. De la même manière, un satellite espion qui permet de reconnaître un uniforme est encore plus intéressant qu'un satellite capable de détecter le déplacement d'individus au sol. Le paramètre important est donc ici la résolution ou le pouvoir séparateur. Celui-ci caractérise la capacité d'un instrument à séparer deux objets très proches l'un de l'autre. On peut montrer qu'il augmente avec le diamètre (D) de l'ouverture de l'instrument. A paramètres équivalents (dans des conditions idéales d'observation), un instrument de large diamètre aura une meilleure résolution qu'un autre à diamètre plus petit. Il y a d'ailleurs un autre avantage à avoir une optique d'entrée de grande taille : celui de pouvoir capter un maximum de lumière. Un système possédant une grande ouverture pourra collecter plus de photons et voir des objets moins lumineux ou plus éloignés qu'un autre système identique, mais à pupille plus petite.

Le problème est qu'il n'est pas facile de fabriquer des lentilles de qualité avec un très grand diamètre. Les chiffres parlent d'eux-mêmes : alors que les plus grands télescopes à miroirs ont des diamètres d'entrée de plus de 8 mètres, l'objectif de la plus grande lunette astronomique ne mesure qu'un mètre de diamètre (Observatoire Yerkes, Wisconsin, USA, photo ci-contre).

Les raisons sont évidentes. Une lentille doit être



parfaitement transparente et dépourvue de défauts à la fois internes (bulles...) et de surface. Un miroir en face avant n'est concerné que par la qualité de sa surface. Une lentille ne peut être tenue que par une monture externe et peut se déformer sous son propre poids. Un miroir peut en revanche être maintenu à la fois par ses bords mais aussi par l'arrière. Les miroirs ont enfin l'avantage de ne pas fonctionner par réfraction. Les systèmes à miroirs ne sont donc pas soumis aux aberrations chromatiques et leur distance focale n'est donc pas fonction de la longueur d'onde des rayonnements. Pour ces différentes raisons, ainsi que d'autres (par exemple, leur domaine spectral étendu), les grands instruments sont constitués de systèmes à miroirs. Inventé en 1661 par le savant écossais James Gregory



(1638-1675), le premier modèle effectif de télescope à miroir fut construit par Newton en 1668. Il fallut cependant attendre un siècle et les travaux du grand astronome allemand William Herschel (1738-1822) pour que ses qualités soient enfin reconnues.

Les figures représentent quelques configurations classiques de télescopes utilisant toutes un miroir d'entrée (miroir primaire) paraboloidal concave. Le télescope de Haie, de 5 m de diamètre est si gros qu'une petite cabine (où peut s'asseoir un observateur) est placée au foyer primaire (figure a). La figure b montre un télescope de Newton, dans lequel un miroir plan (ou un prisme) fait ressortir le faisceau perpendiculairement à l'axe de l'instrument, où l'image peut être observée, photographiée, subir une analyse spectrale ou un traitement photoélectrique. Dans la configuration de Gregory (figure c), un miroir secondaire ellipsoïdal concave redresse l'image et l'envoie à travers une ouverture pratiquée au centre du miroir primaire. Le télescope de Cassegrain (d) utilise quant à lui un miroir secondaire hyperboloidal convexe afin d'accroître la longueur focale effective de l'instrument.

fait ressortir le faisceau perpendiculairement à l'axe de l'instrument, où l'image peut être observée, photographiée, subir une analyse spectrale ou un traitement photoélectrique. Dans la configuration de Gregory (figure c), un miroir secondaire ellipsoïdal concave redresse l'image et l'envoie à travers une ouverture pratiquée au centre du miroir primaire. Le télescope de Cassegrain (d) utilise quant à lui un miroir secondaire hyperboloidal convexe afin d'accroître la longueur focale effective de l'instrument.

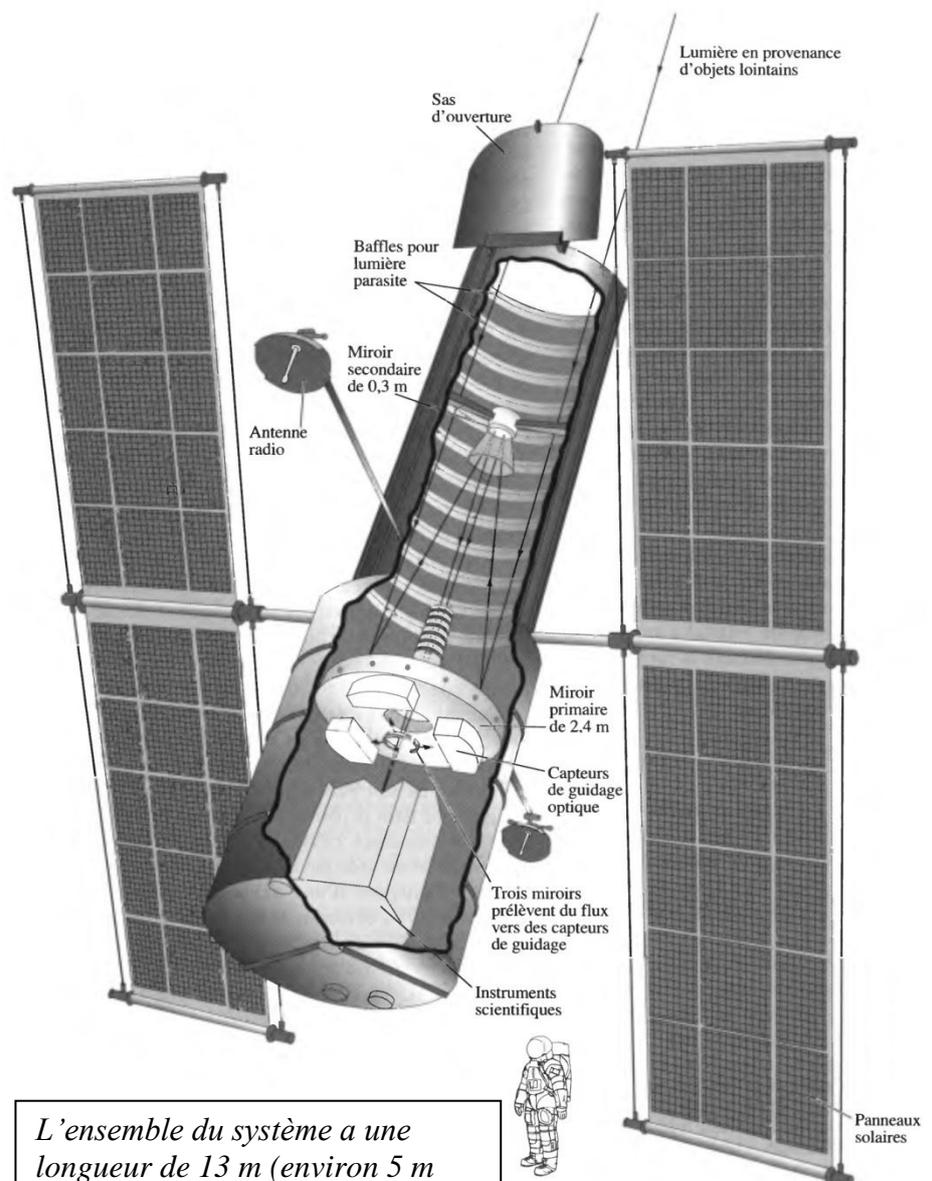
Tout se passe en effet comme si le miroir primaire avait la même ouverture mais une focale (ou une courbure) plus grande.

Le télescope simple à un seul miroir primaire paraboloidal (figure a) fut construit pour fonctionner avec des rayons entrants suivant son axe optique. Mais il y a toujours des objets intéressants dans le champ ailleurs que le long de cette direction précise. Lorsqu'un pinceau de rayons parallèles dirigés hors de l'axe est réfléchi par le paraboloïde, les rayons ne se croisent pas tous au même point. L'image d'un point hors de l'axe lointain (par exemple, une étoile) est une tache désaxée asymétrique en raison de **l'effet combiné des aberrations de coma et d'astigmatisme**. Plus l'objet est désaxé, plus l'image devient d'une qualité inacceptable. Ce phénomène est lié spécialement à la contribution de la coma et il peut être corrigé en **limitant le champ à une valeur acceptable**. Mais même pour un système très peu ouvert de f/10, celle-ci ne correspond qu'à un petit rayon angulaire de 9 minutes d'arc. Elle chute à un minuscule 1,4 minutes d'arc pour f/4. De même, les configurations classiques à 2 miroirs (figure b, c et d) ont des champs sévèrement limités par la coma.

Signalons ici un dispositif surprenant : le miroir liquide. Si l'on met effectivement un liquide comme du mercure dans un bassin horizontal peu profond et que l'on fait subir à l'ensemble une rotation suivant un angle vertical à une vitesse constante, la surface prend naturellement la forme d'une parabole...

### Réflecteurs aplanétiques

Le terme d'« **aplanétique** » désigne les systèmes optiques **convenablement corrigés de l'aberration sphérique** et de la coma. Il existe en fait des versions aplanétiques des télescopes de Cassegrain et de Gregory. Avec ses miroirs primaire et secondaire hyperboloïdaux, le télescope Ritchey-Chrétien constitue par exemple une version aplanétique du Cassegrain. De nos jours, cette configuration est devenue la plus courante pour les télescopes de plus de 2 mètres de diamètre. Le télescope spatial Hubble (2,4 m), représenté ci-contre, en constitue peut-être le meilleur exemple. Il se trouve que **seuls les télescopes spatiaux** peuvent observer dans **l'ultraviolet** (absorbé par l'atmosphère), qui représente une gamme de longueurs d'onde pourtant très intéressante, par exemple pour étudier les étoiles jeunes. Avec son nouveau capteur CCD, installé en 1993, Hubble peut « voir » de 1  $\mu\text{m}$  dans l'IR à 121,6 nm dans l'UV. Pouvant fournir une imagerie limitée par la diffraction pour les longueurs d'onde supérieures à 10  $\mu\text{m}$ , les grands télescopes terrestres lui sont parfaitement complémentaires.



L'ensemble du système a une longueur de 13 m (environ 5 m entre le primaire et le secondaire) et une masse de 11 600 kg. Situé à environ 600 km de la Terre, il en effectue le tour complet en 96 minutes

Avec très peu ou aucune coma, le champ d'un Ritchey-Chrétien reste limité par l'astigmatisme. Ainsi, un instrument à  $f/10$  dispose d'un rayon angulaire acceptable de 18 minutes d'arc, deux fois plus que pour un télescope paraboloidal équivalent. Comparé au Gregory aplanétique, le Ritchey-Chrétien possède un secondaire plus petit, qui obstrue donc moins de lumière, pour une longueur plus petite. C'est pour ces diverses raisons que cette configuration est si populaire.

Comme les instruments ont une ouverture finie, ils ne peuvent reformer une image qu'à partir d'une portion d'un front d'onde incident. Ils sont ainsi toujours soumis à la diffraction : la lumière ne suit plus une trajectoire rectiligne et s'étale quelque peu dans le plan image. Lorsqu'un système optique avec une ouverture circulaire reçoit des ondes planes, la lumière ne forme donc pas un « point » image mais elle se distribue à l'intérieur d'une petite zone circulaire (appelée « disque d'Airy » et contenant environ 84 % de l'énergie incidente) entourée d'anneaux à peine visibles. Le rayon de la tâche d'Airy définit le recouvrement des images de deux points voisins. Il est donc directement relié à la résolution du système. Voilà pourquoi un instrument parfait est qualifié de **limité par la diffraction**.

Pour un instrument parfait, la résolution angulaire théorique idéale (pouvoir séparateur) est donnée par le rayon de la tâche d'Airy :  $1,22 \lambda/D$ , exprimé en radians. Ici,  $D$  est bien sûr le diamètre de l'instrument et il doit être exprimé dans la même unité que  $\lambda$ . En secondes d'arc, le pouvoir séparateur est donné par la formule  $2,52 \cdot 10^5 \lambda / D$ . À cause des distorsions de l'atmosphère, même les plus grands télescopes terrestres ne peuvent avoir une résolution angulaire meilleure que 1 seconde d'arc. Cela signifie donc que les images de deux étoiles séparées d'un angle inférieur à 1 seconde d'arc ne forment qu'une tache indiscernable. En comparaison, le télescope spatial Hubble, pour lequel  $D = 2,4 \text{ m}$ , a une résolution angulaire limitée par la diffraction (0,05 seconde d'arc à  $\lambda = 500 \times 10^{-9} \text{ m}$ ).

Les deux plus grands télescopes terrestres sont les télescopes Cassegrain aplanétiques jumeaux du Keck, à Hawaii ci-



dessous. Séparés de 85 m, ces télescopes géants ont été installés au sommet du volcan Mauna Kéa, à une altitude de plus de 4 000 m. Chacun a un miroir primaire hyperboloidal de 10 m de diamètre

composé de 36 éléments hexagonaux. Ces miroirs sont très incurvés, de telle manière que le système ouvert à  $f/1,75$  possède une focale de 17,5 m. La plupart des grands télescopes récents tendent d'ailleurs tous à avoir des miroirs très ouverts (ouverture supérieure à  $f/2$ ) et des focales relativement courtes. Les télescopes courts sont effectivement moins chers à construire, pour des infrastructures plus fonctionnelles. Ils sont également plus stables et pointés avec une plus grande précision... »

**Plus loin encore** ...Une lentille asphérique utilisée pour simuler l'effet de lentille gravitationnelle par des objets célestes massifs, tels que des galaxies.



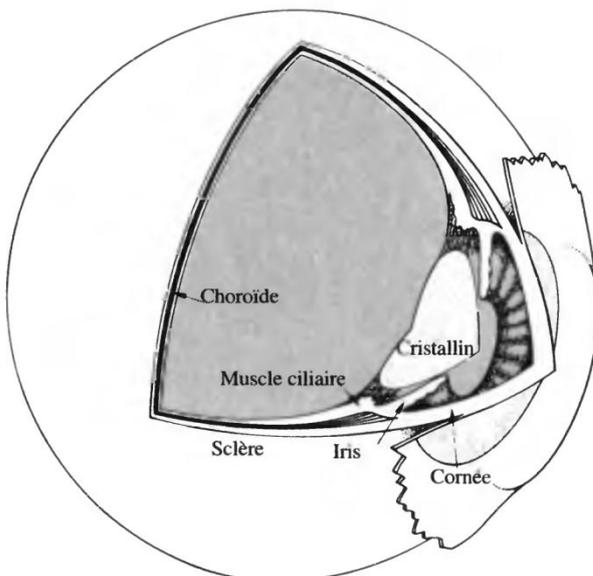
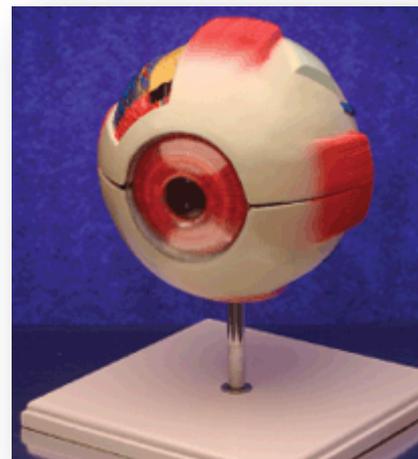
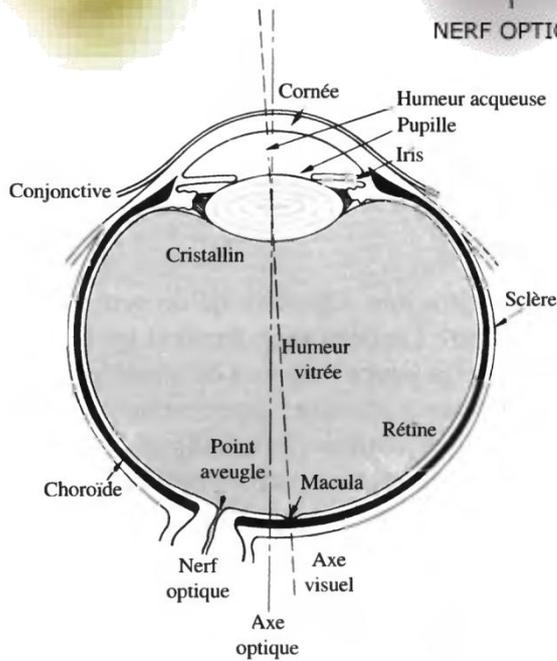
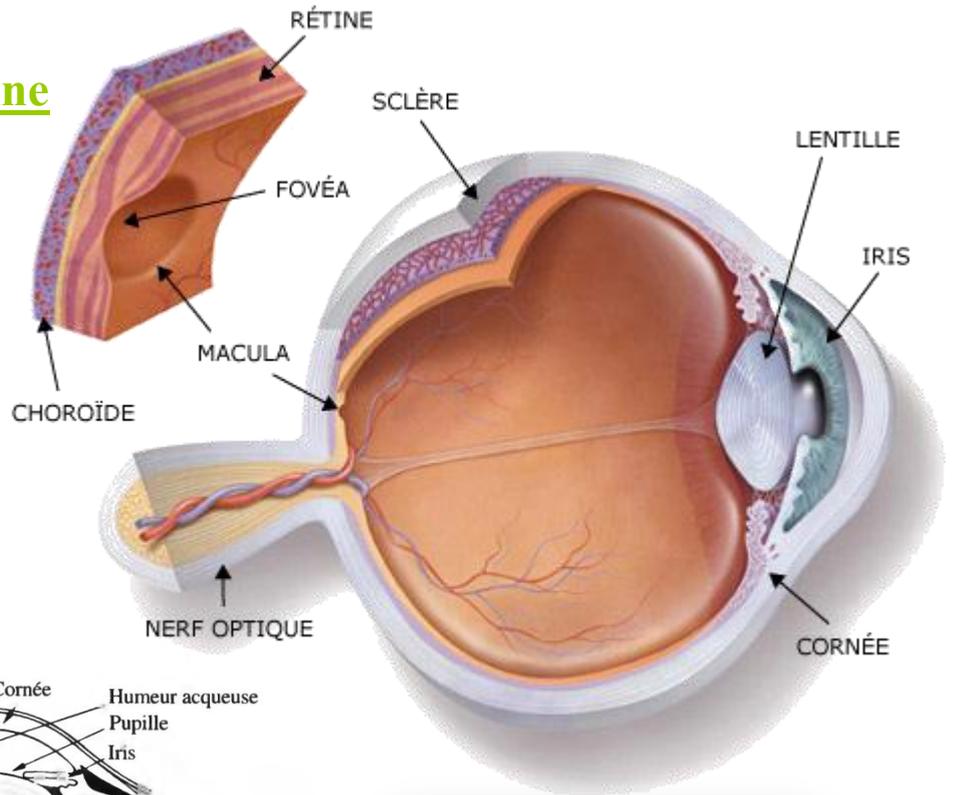
Le miroir hyperbolique de 2,4 m de diamètre du télescope Hubble



### 3. Défauts optiques

#### 3.1. La vision humaine

##### 3.1.1. L'œil



⇒ Description biologique

« La vision, je dis, a lieu lorsque l'image du ... monde extérieur ... est projetée sur la rétine concave » par Kepler en 1604. Mais en 1625 seulement, un jésuite allemand Christophe Scheiner (puis Descartes, cinq ans après) prélève la partie arrière du globe oculaire d'un animal jusqu'à atteindre la rétine légèrement transparente. Il y distingua une image réduite et renversée de la scène environnante.

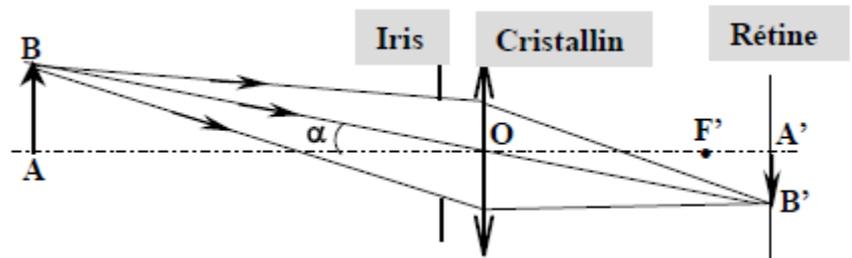
L'œil humain peut être décrit comme une masse gélatineuse pratiquement sphérique (24 mm de long sur 22 mm de large) contenue dans une membrane rigide : la **sclérotique**. Celle-ci est blanche et opaque et constitue ce que l'on appelle couramment le « **blanc de l'œil** ».

- À l'avant, la sclérotique devient la **cornée**. Saillant légèrement du globe oculaire, ce tissu transparent (légèrement aplati, ce qui permet de minimiser l'aberration sphérique) constitue l'élément le plus convergent du système optique oculaire. C'est en effet **l'interface air/cornée** qui doit donner aux rayons l'essentiel de leur déviation. C'est d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles il n'est normalement pas possible de bien voir en ouvrant les yeux sous l'eau. L'indice de l'eau ( $n_{\text{eau}} = 1,33$ ) est en effet trop proche de celui de la cornée ( $n_{\text{cornée}} = 1,376$ ) pour assurer une réfraction adéquate.
- La lumière qui émerge de la cornée passe ensuite à travers une chambre remplie d'un liquide transparent : **l'humeur aqueuse**, dont la fonction est essentiellement physiologique (elle maintient la pression oculaire). Optiquement, ayant un indice ( $n_{\text{humeur aqueuse}} = 1,336$ ) très proche de celui de la cornée, elle n'agit que peu sur la réfraction d'un rayon.
- C'est dans l'humeur aqueuse que se situe **l'iris**. Celui-ci joue le rôle de **diaphragme** et contrôle ainsi la quantité de lumière qui passe à travers son ouverture : **la pupille**. C'est aussi l'iris (du mot grec signifiant arc-en-ciel) qui donne aux yeux leurs belles couleurs caractéristiques : bleue, marron, grise, verte ou jaune. Constitué de muscles dilatateurs et de sphincters circulaires, l'iris peut dilater ou contracter la pupille de 2 mm en pleine lumière à environ 8 mm dans l'obscurité. En plus de cette fonction, il est aussi lié au réflexe d'accommodation et il se contracte pour accroître la finesse de l'image pour les travaux de près.
- Immédiatement derrière l'iris vient le **crystallin**. Ce nom, quelque peu trompeur, date de l'Antiquité et des travaux du mathématicien arabe Alhazen (1000 apr. J.-C.) qui décrivait l'œil selon trois régions : l'aqueux, le cristallin et le vitreux.

**Le cristallin est la lentille de l'œil qui lui permet la mise au point, de par son élasticité (qui diminue avec l'âge) qui lui permet de modifier sa courbure, donc sa longueur focale, lors de l'accommodation.**

Le cristallin est de forme biconvexe (9 mm de diamètre sur 4 mm d'épaisseur). La structure de cette lentille est très différente de celles qui sont fabriquées par l'homme. Elle est constituée de près de 22 000 couches transparentes très fines en « pelures d'oignon » molles, entourées par une membrane élastique. Un rayon qui la traverse emprunte donc des chemins faits de minuscules segments discontinus. Par ailleurs, l'indice de réfraction des couches évolue du centre vers la périphérie de 1,406 à 1,386.

On peut finalement considérer les deux composants réfringents de l'œil, **la cornée et le cristallin**, comme un système optique à deux éléments avec un foyer objet situé à environ 15,6 mm à l'avant de la face antérieure de la cornée et un foyer image à 24,3 mm en arrière, sur la rétine.



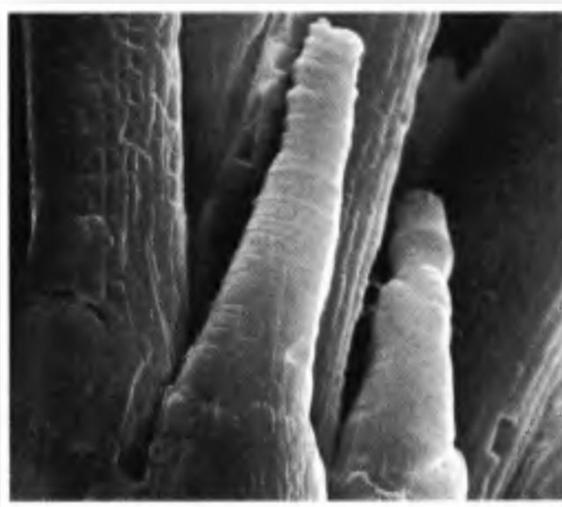
Pour simplifier cela, on peut considérer que **ce système a un centre optique situé à 17,1 mm à l'avant de la rétine**, ce qui correspond à la limite de la face arrière du cristallin.

- À l'arrière du cristallin se trouve une seconde chambre remplie d'une substance gélatineuse transparente faite de collagène (un polymère de protéines) et d'acide hyaluronique (un concentré de protéines) : **l'humeur vitrée** ( $n_{\text{humeur vitrée}} = 1,337$ ). Cette masse constituant 60 % du volume oculaire maintient la rétine contre les parois de l'œil. L'humeur vitrée contient des petits débris cellulaires microscopiques qui « flottent » librement. Ce sont ces particules qui font apparaître les « mouches volantes » lorsque l'on fixe un ciel lumineux ou une lampe fluorescente. On aperçoit en fait leurs ombres, entourées de franges de diffraction, projetées sur la rétine. Un accroissement important du nombre de ces corps flottants peut d'ailleurs signifier un problème de détachement de la rétine. La visualisation de ses propres constituants internes de l'œil est connue sous le nom de « **vision entoptique** ». On peut facilement distinguer certains éléments comme l'image de sa propre pupille. Pour cela, il faut éclairer son œil par le côté et fermer presque entièrement ses paupières, au point de ne pratiquement plus voir de lumière. On distingue alors la périphérie circulaire de la pupille ! Si vous ne

le croyez pas, vous pouvez éteindre puis rallumer la lampe : vous distinguerez alors les dilatations et les contractions bien caractéristiques de celle-ci.

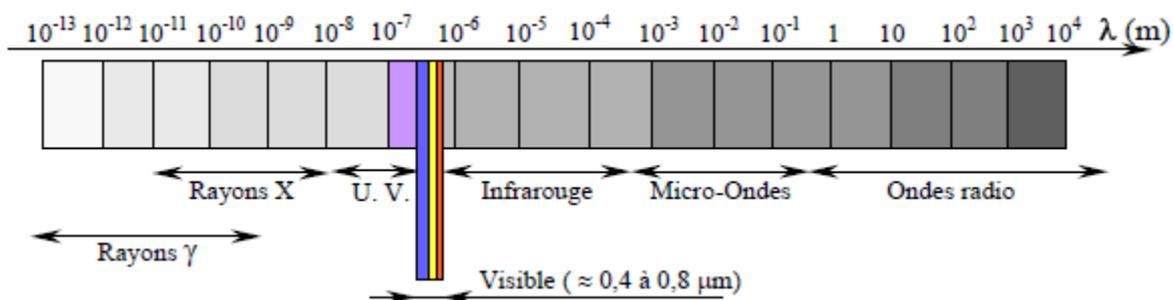
- La paroi intérieure sclérotique est recouverte d'une couche sombre bien vascularisée, riche en mélanine : la **choroïde**. La choroïde absorbe la lumière parasite, comme la peinture noire à l'intérieur d'un appareil photo. Au fond de l'œil, on trouve le récepteur de notre système optique : la **rétine** (du latin rete signifiant filet). Cette fine couche de cellules réceptrices (de 0,1 à 0,5 mm d'épaisseur) recouvre pratiquement toute la choroïde. Ce sont ses cellules qui transforment, de manière électrochimique, l'information lumineuse en influx nerveux. L'œil humain contient deux sortes de **cellules photoréceptrices** : les **bâtonnets** et les **cônes**. On en compte environ 125 millions réparties pratiquement sur toute la rétine de manière non uniforme.

- Les bâtonnets (0,002 mm de diamètre) sont celles qui sont les plus nombreuses. Ils forment un ensemble dont les caractéristiques sont très proches d'un film photographique noir et blanc à haute sensibilité. Bien qu'extrêmement sensibles, fonctionnant dans des ambiances lumineuses trop faibles pour les cônes, les bâtonnets ne peuvent pas distinguer les couleurs et les images qu'ils captent n'ont pas une bonne définition.
- En comparaison, la vision véhiculée par les cônes est de bien meilleure qualité. Ces cellules sont seulement au nombre de 6 à 7 millions, pour des dimensions de 0,006 mm de diamètre. En analogie photographique, on peut les comparer à un film couleur de faible sensibilité. En lumière vive, les cônes permettent une vision détaillée en couleur mais ils deviennent insensibles à de bas niveaux de lumière.



Rétine d'une salamandre.  
On distingue deux cônes au premier plan et plusieurs bâtonnets à l'arrière-plan

L'œil humain fonctionne normalement sur une gamme de longueurs d'onde allant d'environ 390 à 780 nm. Certaines études ont montré que ces limites pouvaient être étendues à environ 310 nm dans l'ultraviolet et à 1050 nm dans l'infrarouge. Certaines personnes ont même assuré qu'elles pouvaient percevoir les rayons X. La limitation dans l'ultraviolet provient en fait du pouvoir absorbant du cristallin pour ces longueurs d'onde. On constate effectivement que les personnes ayant subi une suppression du cristallin présentent une sensibilité fortement accrue dans l'UV.



- L'endroit où le nerf optique se connecte au globe oculaire est connu sous le nom de **point aveugle**. Comme cette zone ne contient pas de récepteurs, elle est de fait totalement insensible à la lumière. Pourtant, nous ne ressentons pas d'interruption dans notre champ visuel car notre cerveau « compense » d'une certaine façon la perception pour cet endroit.
- À peu près au centre de la rétine se trouve une petite dépression de 2,5 à 3 mm de diamètre appelée **point jaune ou macula**. Les cônes y sont particulièrement nombreux, deux fois plus que les bâtonnets. Au centre de la macula, on trouve une petite région de 0,3 mm de diamètre, uniquement composée de cônes : la **fovéa**. Pour donner un ordre d'idée, signalons que l'image de la pleine lune mesure 0,2 mm de diamètre sur la rétine. C'est au niveau de la fovéa que l'on trouve les cônes les plus fins (avec des diamètres situés entre 0,0015 et 0,003 mm) et positionnés de la façon la plus dense sur la rétine. De par cette densité, la fovéa est responsable de la

vision la plus fine. L'œil est d'ailleurs toujours en perpétuel mouvement afin d'y envoyer les rayons lumineux provenant des objets perçus. Grâce à ces petites oscillations, une même image est ainsi envoyée régulièrement sur différents récepteurs. Sans cela, elle resterait fixe sur les mêmes cellules photosensibles et elle aurait tendance à s'effacer. Sans la fovéa, l'œil perdrait de 90 à 95 % de ses capacités s'il ne gardait que sa vision périphérique.

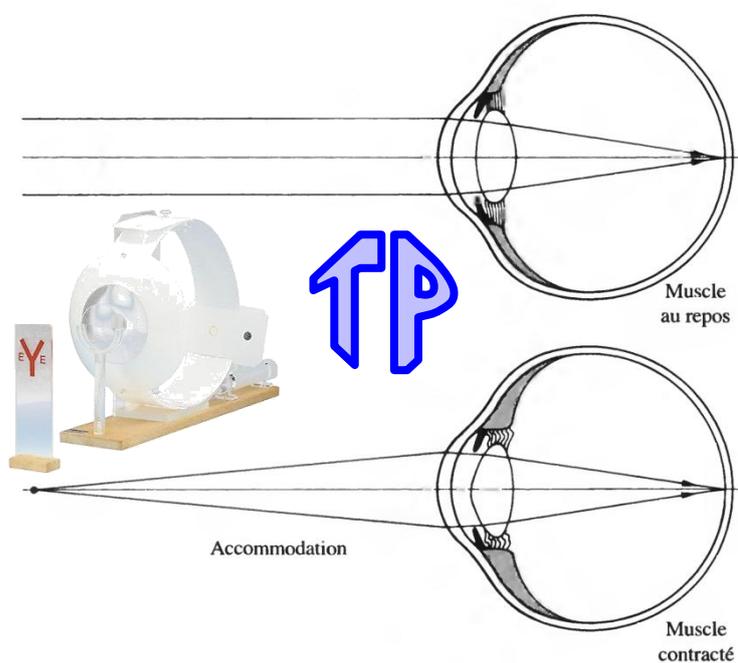
- Les mécanismes du système visuel sont très complexes. Par exemple, les bâtonnets sont reliés en grand nombre à une seule fibre nerveuse, qui peut en revanche être activée par une seule de ces cellules. Au contraire, les cônes sont reliés individuellement aux cellules nerveuses. Le **cerveau** joue finalement un rôle primordial dans la perception d'une scène. C'est lui qui analyse et corrige en permanence le signal qu'il reçoit de la rétine

## ⇒ Accommodation

La fonction de **mise au point ou accommodation** est réalisée dans l'œil humain par le cristallin. Cette lentille biologique est maintenue en position derrière l'iris par des ligaments reliés à un anneau musculaire : les **muscles ciliaires**.

Ces muscles sont normalement relâchés, ce qui a pour effet d'étirer la base des ligaments suspenseurs, augmentant ainsi la tension qu'ils exercent sur la périphérie du cristallin. Par conséquent, celui-ci s'aplatit, ce qui accroît son rayon de courbure et augmente donc sa distance focale. Lorsque complètement relâché, **objet à l'infini doit se focaliser parfaitement sur la rétine**. A mesure que les muscles ciliaires se contractent et relâchent ainsi le cristallin. Du fait de son élasticité naturelle, plus convergent. Grâce à ce mécanisme, la focale diminue, de telle sorte que la lumière se focalise encore sur la rétine

Lorsque l'objet devient très proche de l'œil, les muscles ciliaires se contractent de plus en plus fortement, réduisant la courbure du cristallin. Le que l'on peut voir net en maximum est le **punctum proximum** œil normal, la distance à ce point est d'environ 7 cm pour un adolescent, 12 cm pour un jeune adulte, 28 à 40 cm pour un quadragénaire et environ 100 cm à 60 ans. Bien sûr, l'invention des lunettes a permis de soulager ces défauts au vieillissement. Par ailleurs, un œil ne peut pas se focaliser à la fois sur deux objets différents. En regardant par une fenêtre, vous pouvez vous-même en faire l'expérience en essayant de focaliser à la fois sur la vitre et sur la scène extérieure.



proche de l'œil, les muscles ciliaires se contractent de plus en plus fortement, réduisant la courbure du cristallin. Le que l'on peut voir net en maximum est le **punctum proximum** œil normal, la distance à ce point est d'environ 7 cm pour un adolescent, 12 cm pour un jeune adulte, 28 à 40 cm pour un quadragénaire et environ 100 cm à 60 ans. Bien sûr, l'invention des lunettes a permis de soulager ces défauts au vieillissement. Par ailleurs, un œil ne peut pas se focaliser à la fois sur deux objets différents. En regardant par une fenêtre, vous pouvez vous-même en faire l'expérience en essayant de focaliser à la fois sur la vitre et sur la scène extérieure.

### 3.1.2. Défauts d'accommodation

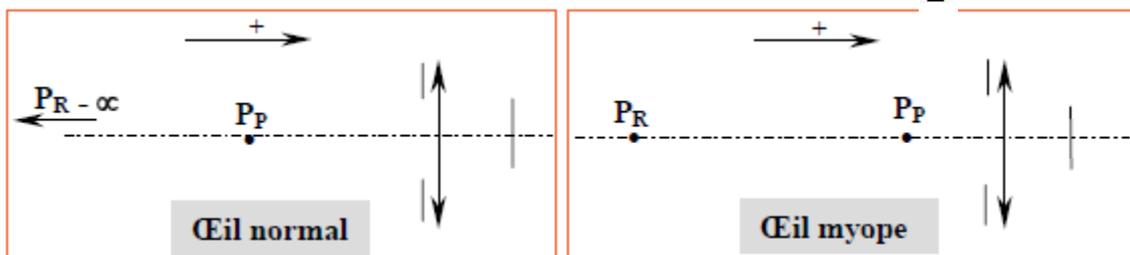
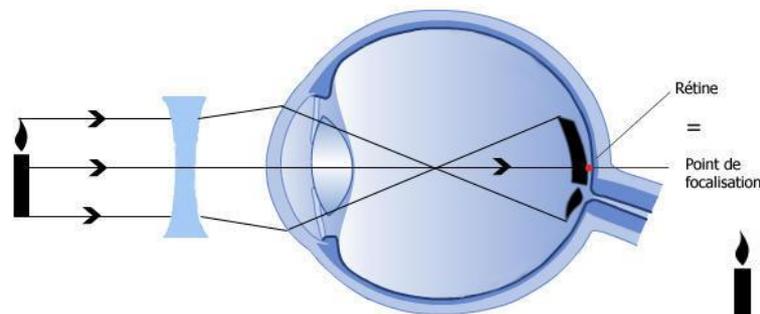
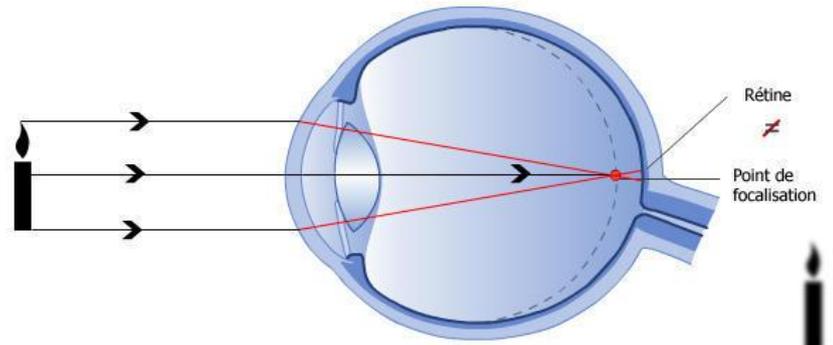
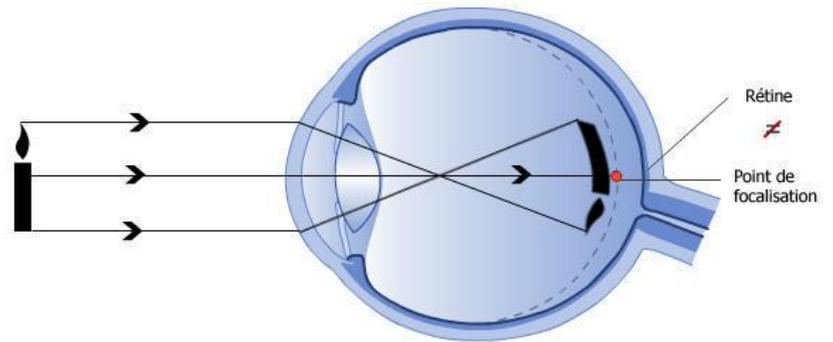
Un **œil normal**, malgré la connotation de ce mot, n'est pas si commun que l'on croit. Par le terme normal (on emploie en fait rigoureusement le mot « **emmétrope** »), on entend que **l'œil est capable de focaliser des rayons parallèles sur la rétine en ayant ses muscles ciliaires totalement relâchés**. En termes d'optique, cela signifie donc que l'œil possède, dans ces conditions, **son foyer image sur la rétine**.

On définit aussi la notion de **punctum remotum** qui est le point le plus éloigné reproduit avec netteté sur la rétine lorsque l'œil regarde à l'infini (normalement sans accommodation). Pour un œil emmétrope, ce point est situé à l'infini (pratiquement, à une distance supérieure à 5 m). Lorsqu'il a des défauts d'accommodation, c'est-à-dire lorsque le point focal n'est plus situé sur la rétine, l'œil est dit **amétrope**. L'amétropie regroupe entre autres **la myopie, l'hypermétropie et l'astigmatisme**. Ces problèmes peuvent être dus à un changement anormal des mécanismes de réfraction (cornée, cristallin...) ou le plus souvent à des modifications de la longueur du globe oculaire qui altèrent la distance entre le cristallin et la rétine. Pour avoir une idée, signalons qu'environ 65 % des jeunes adultes nécessitent  $\pm 1,0 \delta$  ou moins de correction et que 25 % n'ont besoin que de  $\pm 0,5 \delta$  ou moins.

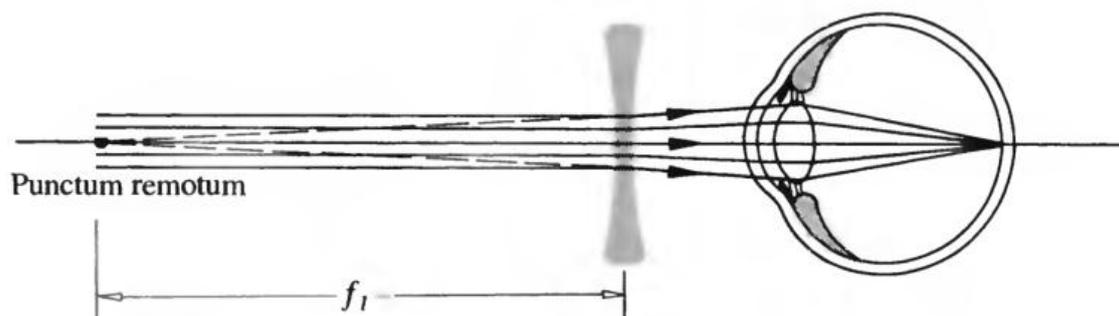
▪ Myopie et verres divergents

La **myopie** est une anomalie de la vision pour laquelle les rayons parallèles forment **leur foyer en avant de la rétine**. Dans ce cas, les objets lointains apparaissent flous et le sujet a donc des difficultés à voir de loin. Dans un œil myope, la vergence est trop forte comparée à sa longueur et le punctum remotum n'est plus à l'infini. Le punctum proximum suit également ce décalage, ce qui fait **qu'une personne myope peut voir de manière nette des objets très rapprochés**.

La myopie se corrige en plaçant devant l'œil une **lentille divergente** de telle manière que le système verre/œil ait son foyer image sur la rétine. L'idée est donc ici de faire légèrement diverger les rayons incidents. En fait, on choisit le verre correcteur de telle manière que la vergence du système lunette/œil soit la même que celle de l'œil non corrigé.

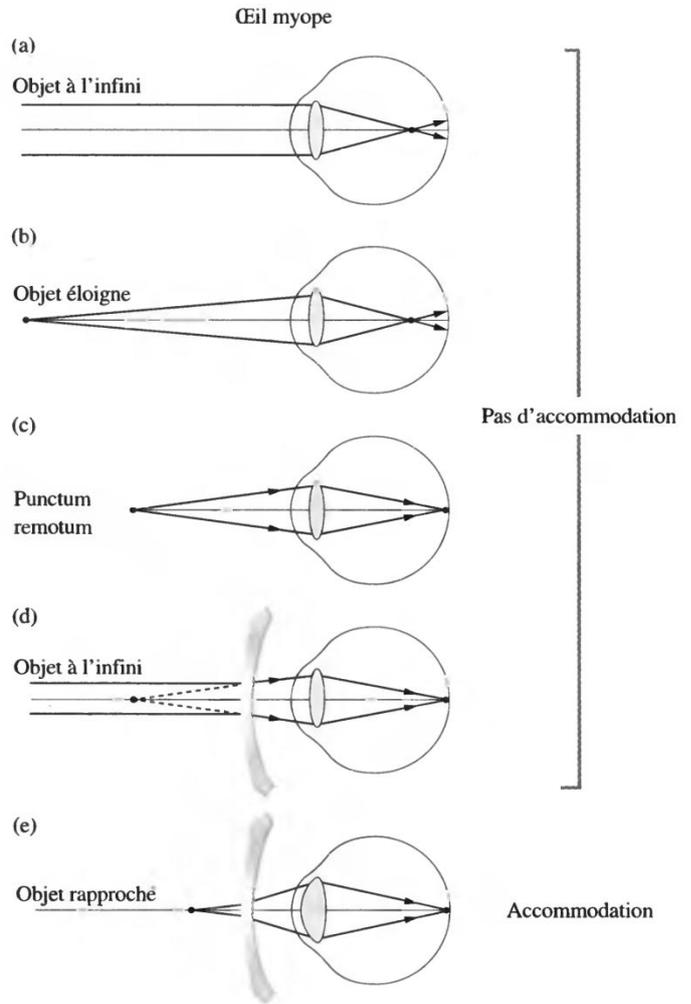
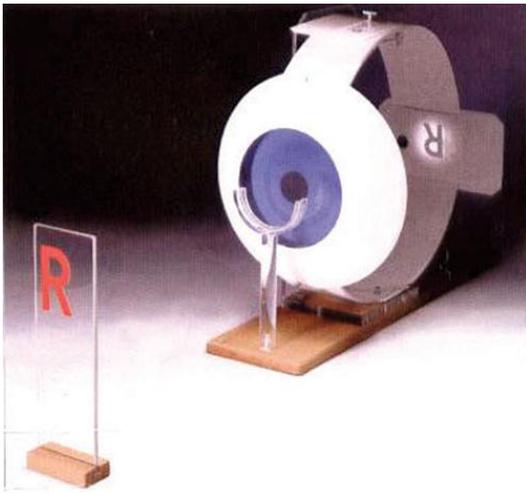


**Principe de correction de la myopie**



**La focale du verre correcteur doit être égale à la distance du punctum remotum.**

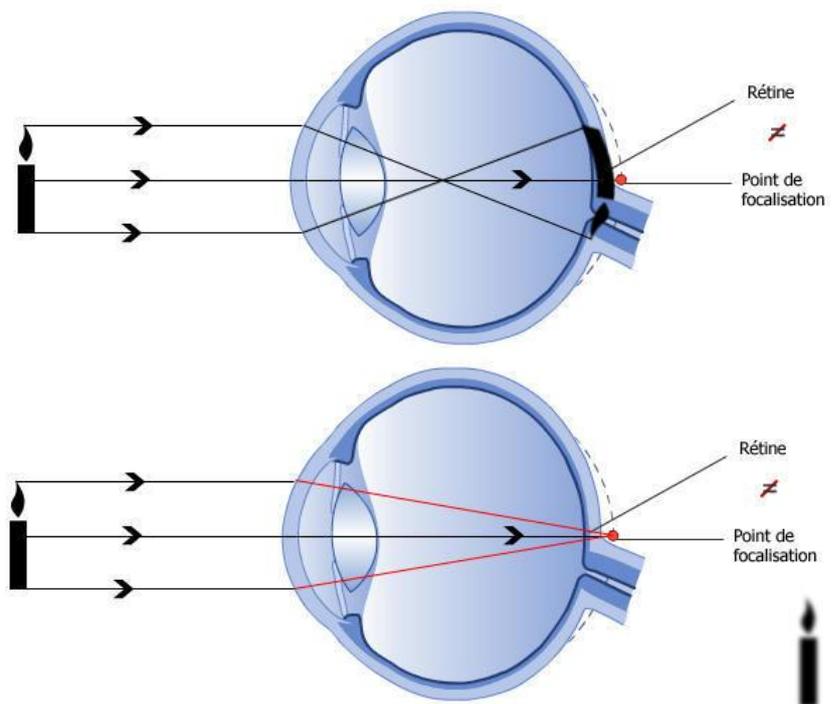
TP



Les petites myopies de -0,25 à -3 dioptries de correction ; Les moyennes myopies de -3 à -8 dioptries ; Les fortes myopies au-delà de -8 dioptries

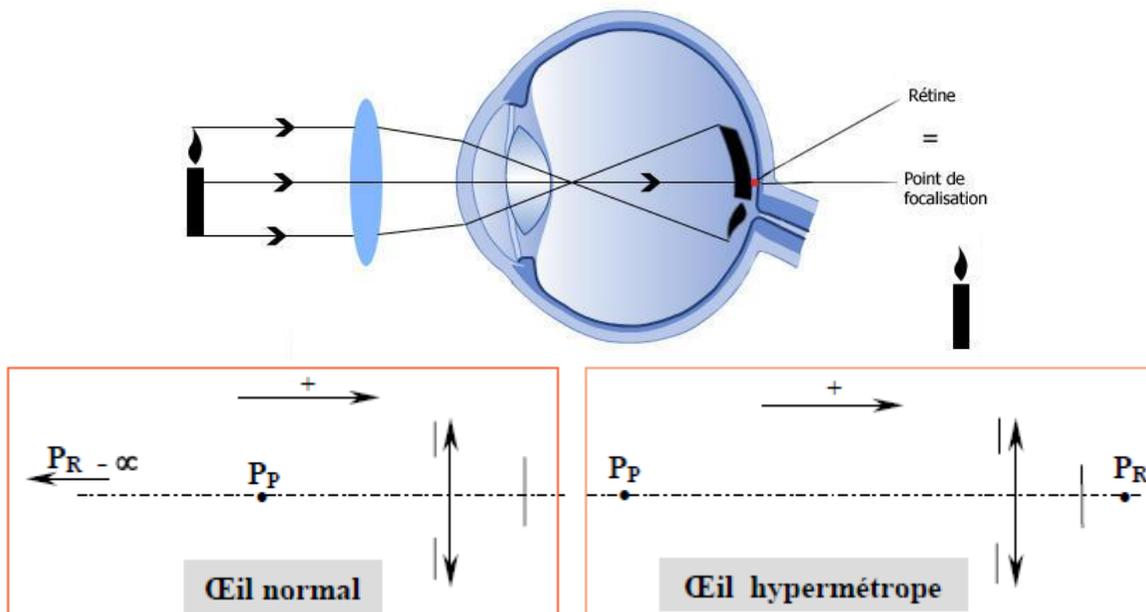
- [Hypermétropie et verres convergents](#)

**L'hypermétropie** est le défaut de l'œil dans lequel les rayons parallèles provenant d'un objet lointain forment une image en arrière de la rétine. Cette anomalie peut être due à une courbure trop faible de la cornée ou bien à un raccourcissement de l'œil qui fait que le cristallin est trop proche de la rétine (les personnes hypermétropes peuvent d'ailleurs corriger temporairement leur défaut en appuyant légèrement autour de l'œil, ce qui a pour effet de bomber la cornée). Pour voir nettement, un hypermétrope doit donc en permanence augmenter la puissance de son cristallin en accommodant, ce qui exige des efforts oculaires constants et « fatigue » très vite la vision. S'il



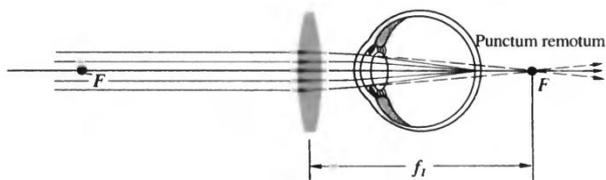
accommodé déjà en vision lointaine, l'œil hypermétrope est donc rapidement limité en vision rapprochée. En d'autres termes, le punctum proximum est plus éloigné que pour l'œil emmétrope (pour lequel on le considère égal à 25 cm). **Une personne hypermétrope voit donc mieux de loin que de près.**

Pour corriger ce défaut, on introduit devant l'œil une **lentille convergente**, afin de « rabattre » d'autant plus les rayons pénétrant dans l'œil. Cette lentille forme de la scène extérieure une image virtuelle plus éloignée que l'objet. Les objets trop proches sont donc « ramenés » au-delà du punctum proximum, ce qui fait que l'œil peut les voir convenablement.



**Principe de correction de l'hypermétropie**

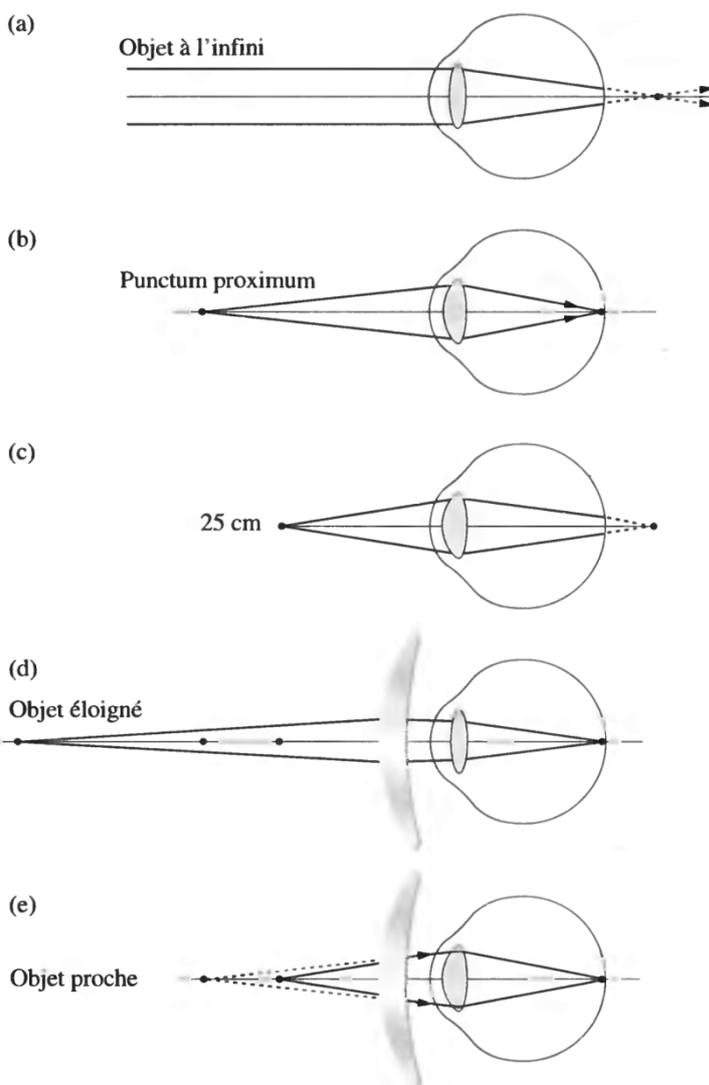
TP



**La focale du verre correcteur doit être égale à la distance du punctum remotum.**

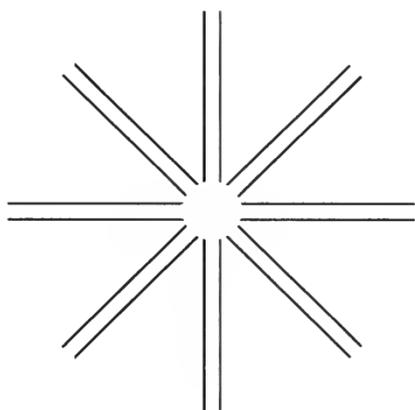


Œil hypermétrope



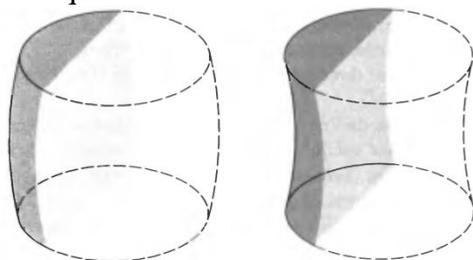
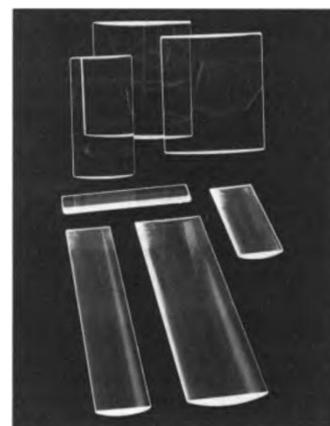
- [Astigmatisme et verres anamorphiques](#)

**L'astigmatisme** est peut-être l'anomalie de la vision la plus courante. Il est dû à des irrégularités de courbure de la **cornée et/ou du cristallin, qui ne sont plus sphériques mais asymétriques**. Il en résulte une focalisation différente suivant deux plans méridiens (contenant l'axe optique) de l'espace image. La vision est floue, de près comme de loin. Si ces plans sont perpendiculaires, l'astigmatisme est dit régulier et il est possible de le corriger. S'il est irrégulier, cette tâche est, en revanche, bien plus difficile. L'œil astigmatique peut également être emmétrope, myope ou hypermétrope à des degrés différents suivant les deux plans méridiens. Par exemple, les colonnes d'un damier peuvent être vues convenablement alors que les lignes apparaissent floues à cause d'une myopie ou d'une hypermétropie. Dans ce cas, l'astigmatisme est bien sûr régulier et les plans méridiens sont horizontaux et verticaux.



*Une petite expérience pour évaluer l'astigmatisme des yeux. Observez cette figure en fermant un œil. Si vous voyez certaines lignes plus épaisses que les autres, vous avez de l'astigmatisme. Rapprochez votre œil de la figure puis éloignez la feuille lentement ; notez alors quelles lignes sont mises au point en premier. Si deux lignes paraissent aussi nettes l'une que l'autre, tournez la figure jusqu'à accommoder uniquement pour l'une des lignes. Si vous voyez nettement toutes les lignes, vous n'avez pas d'astigmatisme*

Tout système optique qui a **une vergence différente selon deux méridiens principaux** est dit « **anamorphique** », comme les lentilles cylindriques. Un tel système produit une image distordue, agrandie suivant un plan uniquement. C'est justement l'effet recherché pour corriger un œil astigmatique pour un seul méridien. Dans ce cas, des lunettes piano-cylindriques ci-contre, convergentes ou divergentes, suffisent à arranger le problème. Quand une correction est nécessaire au niveau des deux méridiens, on utilise alors des lentilles sphéro-cylindriques ou même toriques.



*Signalons également que les lentilles anamorphiques ne sont pas utilisées seulement pour la correction de l'astigmatisme. On s'en sert par exemple pour la réalisation des films en panavision, tournés avec un grand champ horizontal mais compactés ensuite sur une pellicule standard. Parfois, les télévisions en diffusent des extraits sans lentilles adaptées et l'on constate alors des élongations anormales sur l'image.*

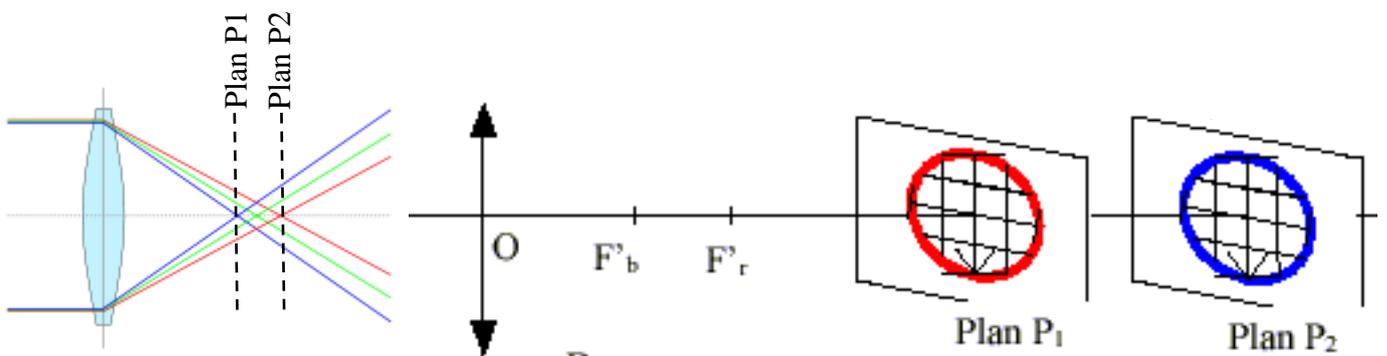
### 3.2. Approximation de Gauss

L'obtention de « bonnes images » (homothétiques des objets) est soumise au respect de conditions restrictives. Les écarts aux **conditions idéales de Gauss** s'appellent des **aberrations**. Elles sont de 2 types : les **aberrations chromatiques** (l'indice  $n$  des lentilles dépend de la longueur d'onde) et les **aberrations géométriques** (qui détériorent l'image comme l'aberration sphérique, la coma et l'astigmatisme ou qui déforment l'image comme la distorsion et la courbure de champ).

### 3.2.1. Aberrations chromatiques



La lentille est dispersive. La position du foyer image  $F'$  en lumière polychromatique dépend de la longueur d'onde. Les images sont irisées selon la position de l'écran.

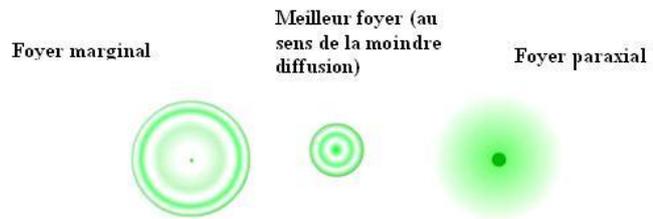
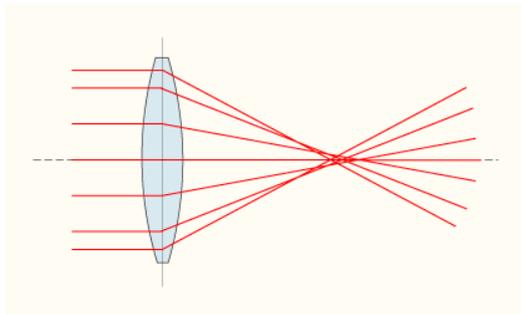


### 3.2.2. Aberrations géométriques

⇒ ... qui détériorent l'image

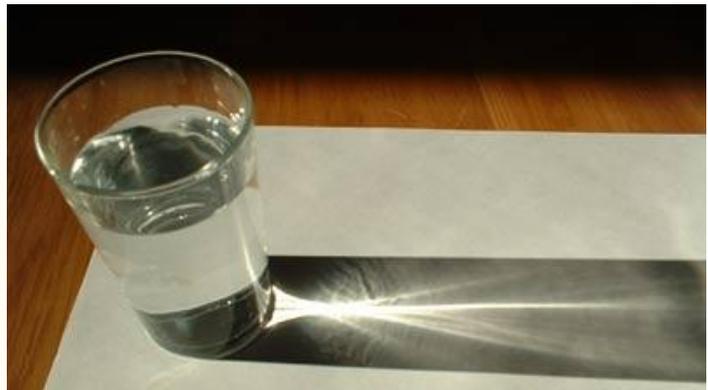
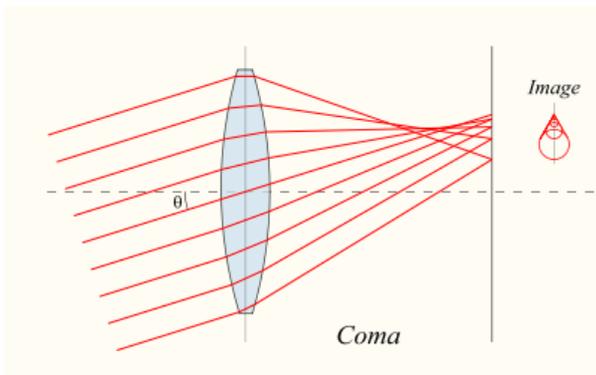
- L'aberration sphérique

Les rayons provenant du bord et du centre de l'optique ne se focalisent pas au même Foyer image  $F'$ . Le point image attendu sera remplacé par un halo plus ou moins flou.

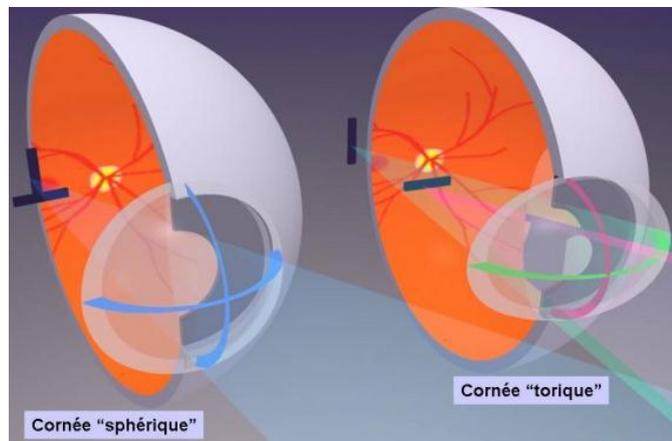
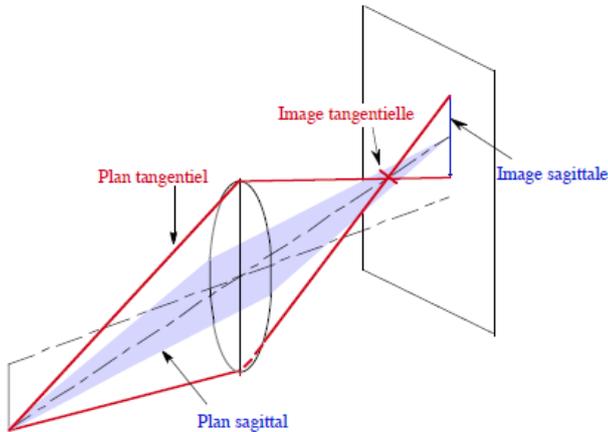


▪ [La coma](#)

Les rayons parallèles qui ne sont pas dans l'axe optique de la lentille ne convergent pas tous en un même point (foyer secondaire) sur le plan focal. Les rayons qui passent sur les bords de la lentille peuvent être focalisés plus loin ou plus près de l'axe optique que ceux passant au centre de la lentille. On parle respectivement de « *coma positive et de coma négative* ».



▪ [L'astigmatisme](#)



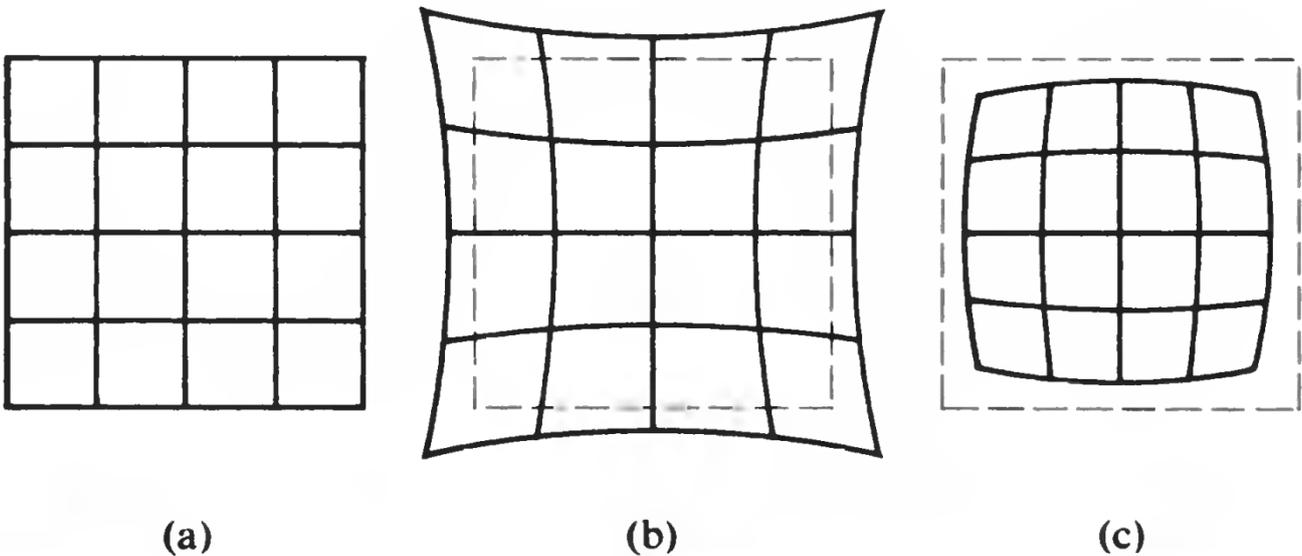
L'astigmatisme se rencontre aussi quand les dioptries des lentilles ne sont pas sphériques mais ellipsoïdaux. L'astigmatisme est très fréquent dans le cas de l'œil. Le défaut est lors corrigé par des verres eux-mêmes astigmatés.



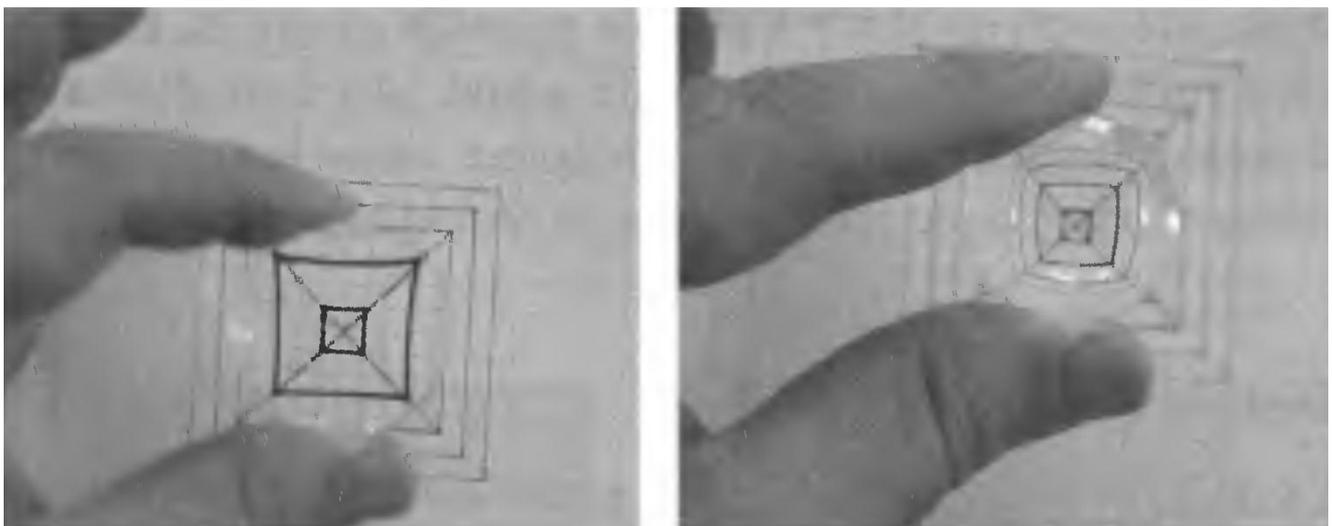
⇒ ... qui déforment l'image

▪ la distorsion

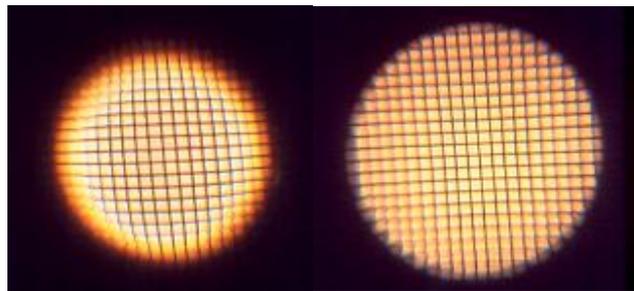
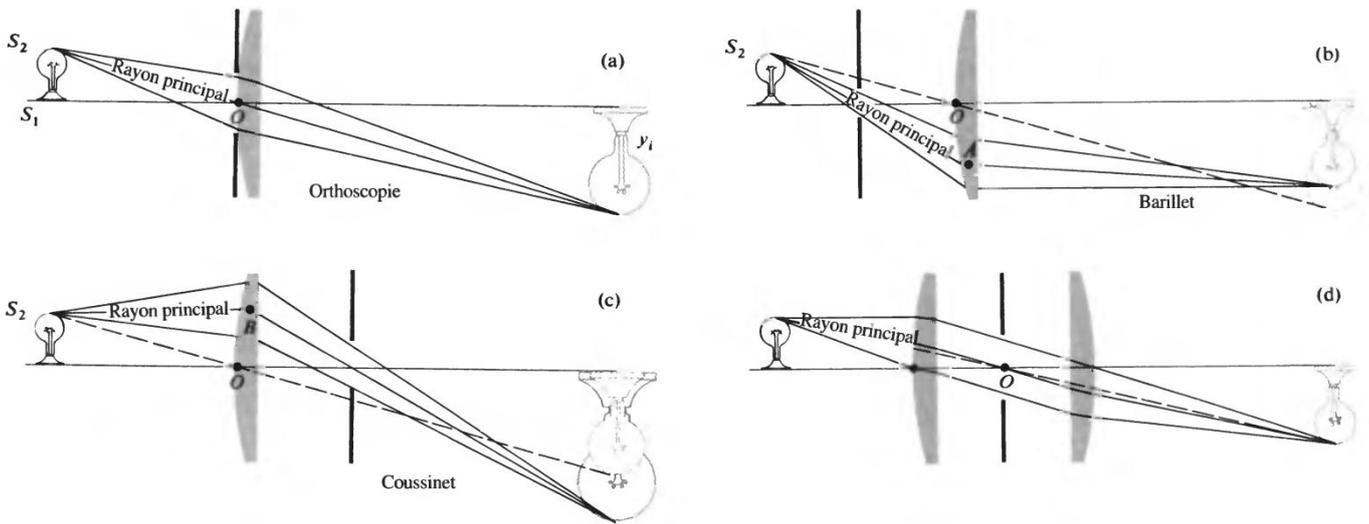
La qualité de l'image n'est en rien altérée, l'image d'un point reste ponctuelle. L'effet de la distorsion est une déformation de l'image, de sorte qu'un objet carré apparaît dans l'image sous la forme d'un coussinet ou d'un barillet. Son origine vient d'une variation du grandissement transversal  $\gamma$  en fonction de la distance à l'axe du point image. Cette distance peut différer de celle prévue par la théorie pour laquelle  $\gamma$  est constant. En d'autres termes, un système présente de la distorsion lorsque sa focale et son grandissement varient en fonction de l'angle de champ. **En l'absence de toutes les autres aberrations, la distorsion se manifeste comme une déformation de l'image dans son ensemble, bien que chaque point soit net.** Par exemple, un carré (a) observé par un système optique avec de la distorsion positive ou **distorsion en coussinet** aura une image déformée, comme dans la figure (b). Chaque point image est décalé radialement vers l'extérieur d'autant plus qu'il est éloigné de l'axe central. De la même manière,



la distorsion négative, ou **distorsion en barillet** (c) ou en tonneau, correspond à la situation où chaque point image se déplace radialement vers l'intérieur. On peut se rendre compte facilement de l'effet de la distorsion en observant, au moyen d'une lentille aberrante, une feuille de papier quadrillé.

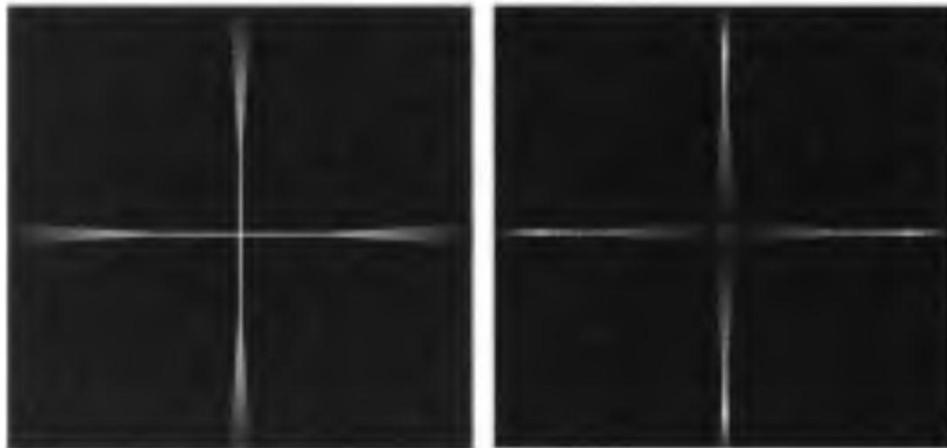


**L'introduction d'un diaphragme dans un système de lentilles minces s'accompagne invariablement de distorsion. Une exception est le cas où le diaphragme d'ouverture est sur la lentille, de sorte que le rayon de champ se confond alors avec le rayon principal.**



- la courbure de champ

Imaginons un système optique affranchi de toutes les aberrations précédentes. Il y aurait alors une correspondance biunivoque entre les points de l'objet et ceux de l'image (imagerie stigmatique). L'image d'un objet plan perpendiculaire à l'axe ne sera un plan que dans la région paraxiale. Pour des ouvertures plus importantes, l'obtention d'une image sur une surface courbe est la manifestation de l'aberration appelée courbure de champ.



### 3.2.3. Conditions de Gauss

Dans le début du cours ont été définies les images données par une lentille sphérique mince, réfractive ou réfléchive. Les relations de conjugaison de Newton et de grandissement données permettent de rechercher la position d'une image et de calculer sa dimension dans les *conditions de Gauss*, la source lumineuse étant monochromatique.

Dans le cadre de cette approximation paraxiale, l'image d'un point est un point. Pour des systèmes optiques réels la lumière utilisée est le plus souvent la lumière blanche et les rayons incidents peuvent être relativement éloignés de l'axe optique et/ou fortement inclinés.

Un système centré est utilisé dans les **conditions de Gauss** si :

- les rayons sont peu inclinés par rapport à l'axe optique (l'angle qu'ils font par rapport à l'axe optique est faible),
- les rayons sont proches de l'axe optique (par comparaison à la taille des instruments d'optique).

Les rayons sont alors dits **paraxiaux**. Pour qu'il en soit ainsi, on utilise un **diaphragme**.



La structure finie des lentilles fait qu'elles ne peuvent bien sûr collecter qu'une fraction de l'énergie émise par un point source. La limitation physique est déterminée par la périphérie de la lentille qui définit les rayons qui peuvent entrer dans le système et former une image. Dans cette logique, la surface de la lentille exposée à la lumière fonctionne comme une ouverture à travers laquelle l'énergie peut passer. Tout objet obstruant, comme le dispositif de maintien de la pièce optique (monture) ou un diaphragme séparé, détermine donc la quantité de lumière pouvant participer à l'image finale. Pour un système optique, l'élément de ce type est appelé le **diaphragme d'ouverture**, noté ici **A.S.** (pour le terme anglais **Aperture Stop**). C'est par exemple le cas du diaphragme à iris que l'on trouve dans les objectifs d'appareils photo reflex.

Comme le montre l'exemple de la figure, des rayons possédant un fort angle d'incidence peuvent entrer dans une lentille. Bien qu'il soit toujours intéressant d'avoir le maximum de luminosité sur l'image, donc de lumière pénétrant dans le système, de tels rayons peuvent néanmoins nuire à la qualité de l'image. En effet, n'oublions pas que les qualités optimales d'un système s'obtiennent dans les conditions de l'optique paraxiale (optique de Gauss), donc pour des rayons possédant de faibles angles d'incidence. C'est pour cela qu'il est parfois intéressant de disposer d'un élément à part, délimitant les rayons arrivant sur une lentille. Signalons cependant qu'un système optique, simple ou composé, a toujours un diaphragme d'ouverture, que ce soit une monture de lentille ou un diaphragme indépendant. Insistons aussi sur le fait que pour un système composé de plusieurs lentilles, il y a plusieurs diaphragmes (par exemple les montures des lentilles) mais il n'y a qu'un seul diaphragme d'ouverture pour tout le système. De la même manière, l'élément qui limite la taille de l'image dans le plan d'observation est appelé le **diaphragme de champ**, noté ici **F.S.** (pour le terme anglais **Field Stop**). Celui-ci détermine le champ que peut voir l'instrument. Dans un appareil photo argentique, cette limitation du plan image est assurée naturellement par les bords du film. Si le diaphragme d'ouverture contrôle le nombre de rayons qui atteignent le point image d'un point objet qui est vu par le système, c'est le diaphragme de champ qui sélectionne les points qui sont vus ou non. Tout objet situé en dehors du champ de l'appareil (i.e. la zone délimitée par le diaphragme de champ) ne peut donc être imagé par le système. Finalement, on peut dire que le diaphragme d'ouverture limite l'angle d'ouverture du faisceau provenant de l'objet et contrôle donc la luminosité de l'image. Plus il est ouvert, plus l'énergie lumineuse pénétrant dans le système est grande. En revanche, le diaphragme de champ contrôle l'angle de champ du système, donc l'extension de la zone pouvant être imagée. Augmenter le champ permet au système d'observer des zones plus importantes en périphérie. C'est d'ailleurs le principe des objectifs panoramiques ou « grand angle ».

