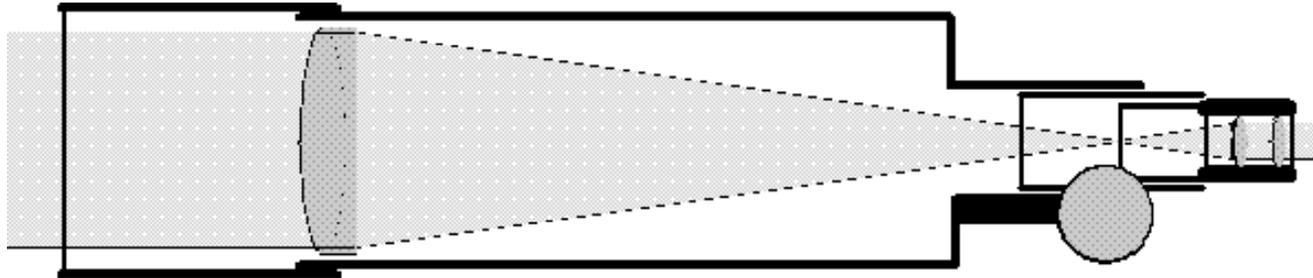


# La lunette

# La lunette



Une lunette est composée d'un objectif et d'un oculaire disposés de part et d'autre d'un tube fermé.

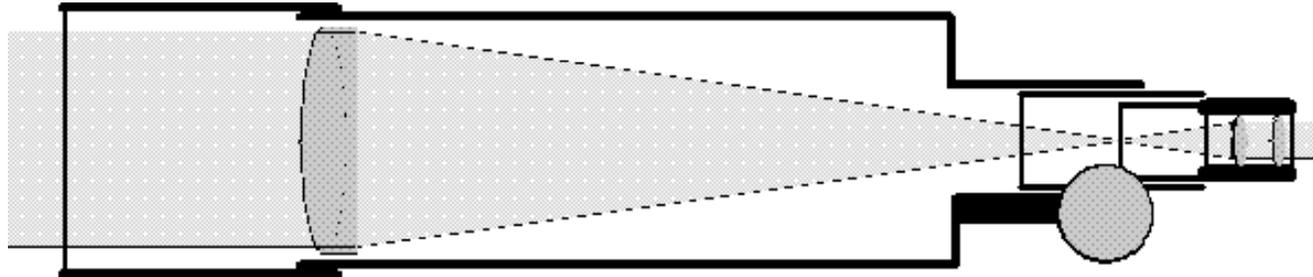
Le tube peut être fixe ou télescopique comme dans le cas des longues-vues de marine. L'oculaire se situe, comme l'indique son nom, du côté de l'œil, et il est de petite dimension. L'objectif se situe de l'autre côté, et est généralement de plus grande dimension que l'oculaire.

On peut faire une lunette simple avec deux loupes.

Une grande, à foyer assez lointain servant d'objectif, et une petite, à foyer rapproché servant d'oculaire. En effet, l'objectif et l'oculaire sont deux systèmes optiques convergents, c'est-à-dire qu'ils concentrent (focalisent) les rayons lumineux, à la manière d'une loupe. Ces deux systèmes convergents ont comme caractéristiques principales le diamètre et la distance focale.

La distance focale est la distance entre le centre du système optique convergent (par exemple le centre de la lentille d'une loupe) et le foyer (le point où des rayons lumineux provenant de l'infini convergent).

# La lunette astronomique et terrestre

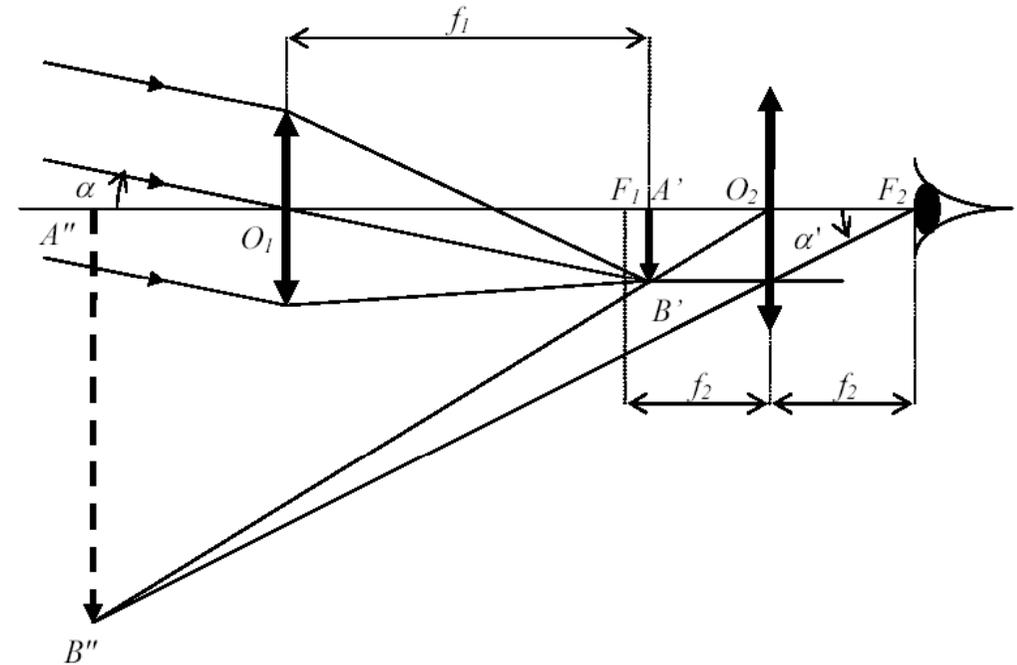


Ces premières lunettes d'approche, terrestre ou astronomique, ont possédé un objectif convexe et un oculaire concave, essentiellement au hasard de leur invention par des lunetiers. Les plus récentes possèdent objectif et oculaire convexes.

Les deux systèmes conservent chacun leurs avantages :

- oculaire concave: image droite permettant l'usage en longue-vue terrestre et raccourcissement de la longueur du tube par rapport à la focale de l'objectif. L'assemblage de deux petites de ces lunettes crée l'appareil dit jumelles de Galilée (usage au théâtre vu les faibles performances).
- oculaire convexe: retournement de l'image (haut et bas) et allongement par rapport à la longueur de la focale de l'objectif. L'usage en lunette astronomique n'est pas gênée par ces conséquences (ni haut ni bas dans le ciel, monture mécanique pour supporter le système). Par contre, l'usage marin ou terrestre a imposé un tube télescopique et un système optique de redressement de l'image, dit véhicule composé d'un doublet ou d'un nombre pair de prismes (qui plient, raccourcissent l'encombrement) dans le cas de la lunette à prismes ou des jumelles dite de marine.

# La lunette astronomique



Soit  $\alpha$  le diamètre apparent d'un astre. La taille de l'image  $A'B'$  est égale à  $\alpha f_1$  où  $f_1$  est la focale de l'objectif. Lorsque l'image  $A''B''$  est à l'infini, le diamètre apparent sous lequel l'œil voit  $A''B''$  est égal à  $A'B' / f_2$  où  $f_2$  est la focale de l'oculaire. Il en résulte que le grossissement de la lunette est égale à :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A'B' / f_2}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2}$$

Ce grossissement est ici en valeur absolue !

N.B.: le grossissement d'une lunette n'a rien à voir avec  $\delta$

Grossissement de la lunette

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

# Focale d'une lunette

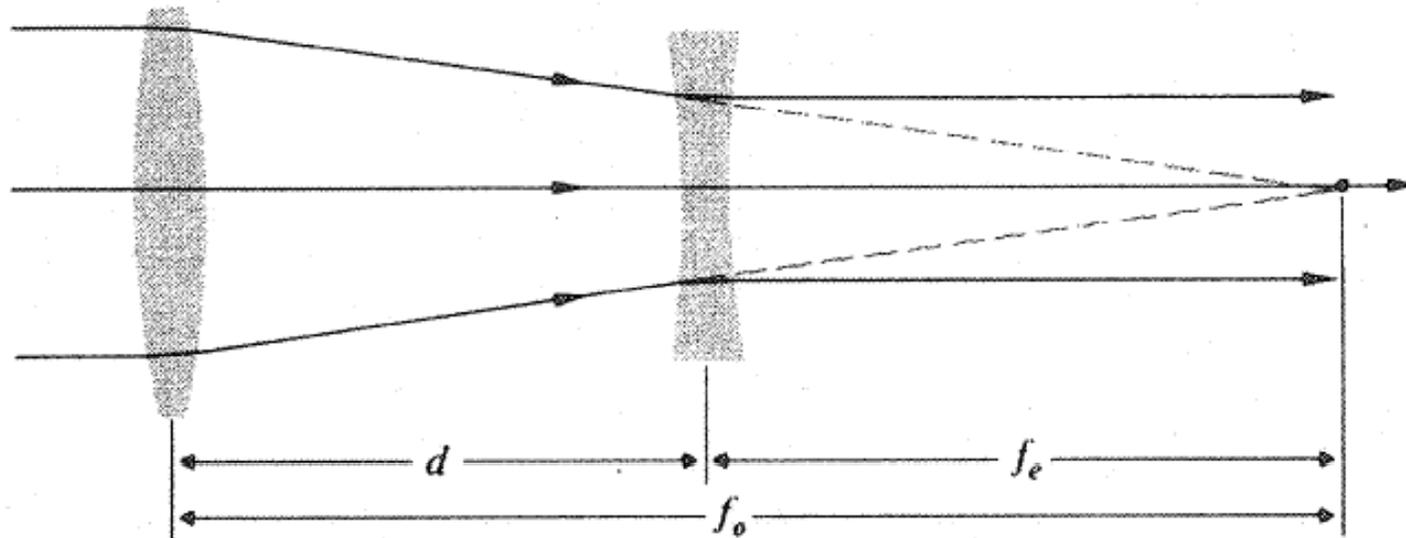
On a donc intérêt à choisir la focale  $f_1$  la plus longue possible et la focale  $f_2$  la plus courte possible. Pratiquement, ce sont des considérations technologiques qui limitent la focale et par conséquent la taille de l'objectif. Au-delà de 1 m de diamètre, la déformation due au poids de la lentille devient prohibitive.

Un problème important de la lunette astronomique est l'aberration chromatique de la lentille. La dispersion des couleurs limite la résolution de l'instrument. Chaque couleur a en fait une focale différente. Suite à ses travaux sur la décomposition de la lumière blanche, Newton comprit qu'il s'agissait d'une limite fondamentale et construisit un télescope à miroir.

Note : En anglais, lunette se dit refracting telescope, et télescope, reflecting telescope.

# Lunette avec oculaire divergeant

La première lunette de Galilée comportait un oculaire divergeant et donnait donc une image droite.

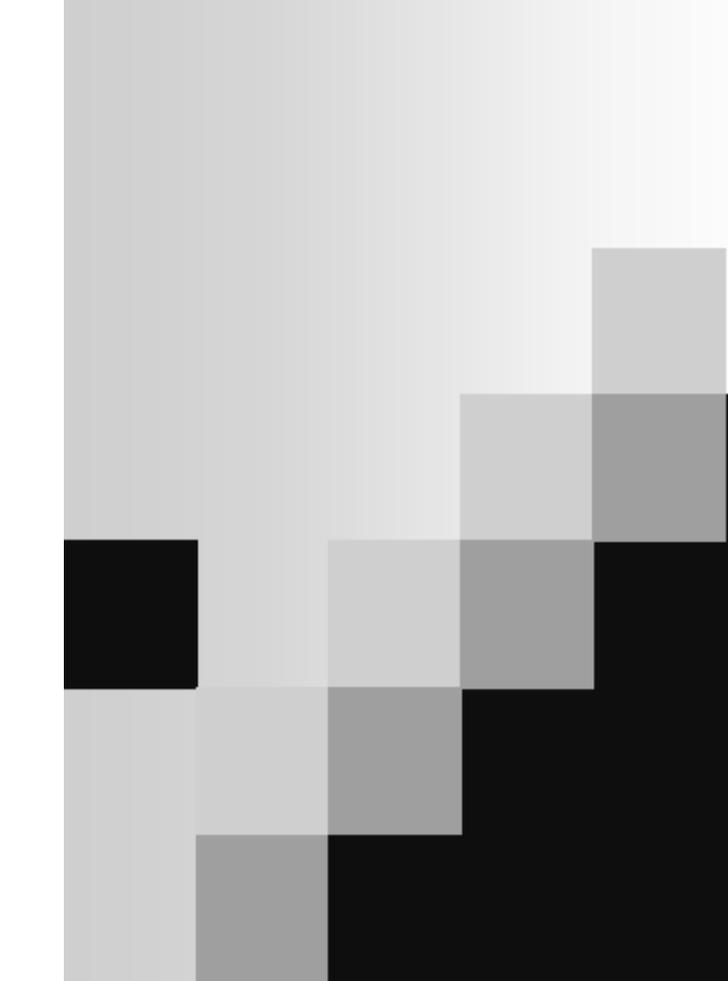


Cette configuration afocale est aussi très utile en tant qu'expandeur de faisceau laser car elle ne comporte pas de points de focalisation internes où le faisceau de haute énergie pourrait ioniser l'air environnant.

# Exercices

1. On dispose d'une lunette dont l'objectif a une focale de 180 cm. Avec un oculaire de 50 dioptries, quelle est la taille minimale des objets qu'on peut distinguer sur la Lune (à 380'000 km) ?
2. L'objectif d'une lunette afocale a une focale de 85 cm. L'oculaire a une focale de 2,5 cm. Tracer le schéma optique et calculer le grossissement.

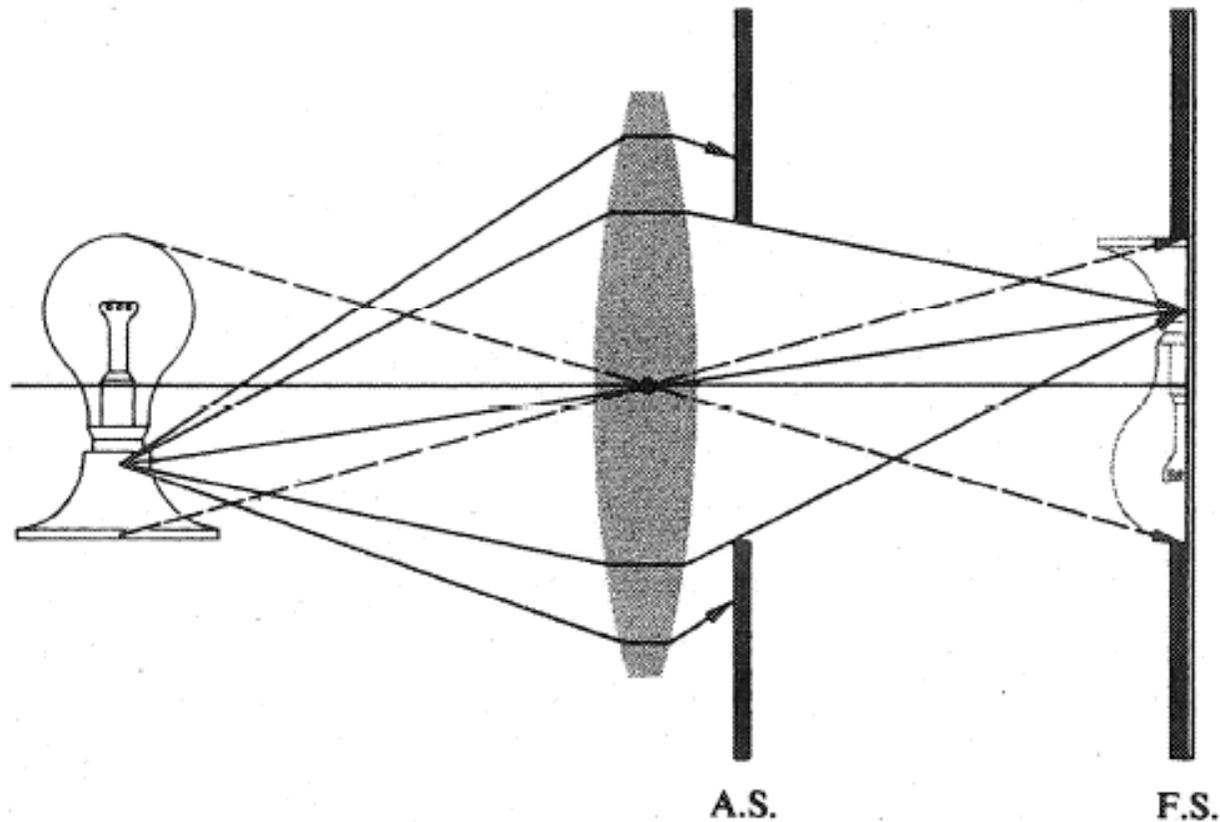




# Diaphragmes et pupilles

# Diaphragmes

- **Diaphragme d'ouverture:** limite la quantité de lumière
- **Diaphragme de champs:** délimite le champs de l'instrument



**Figure 5.33** Diaphragme d'ouverture (A.S.) et diaphragme de champ (F.S.).

# Pupilles

**Pupille d'entrée:** l'image du diaphragme d'ouverture vue depuis l'axe au travers des éléments optiques qui précèdent le diaphragme

**Pupille de sortie:** l'image du diaphragme d'ouverture vue depuis l'axe au travers des éléments optiques qui suivent le diaphragme

**Rayon principal:** rayon issu **d'un point objet hors axe** qui passe par le centre du diaphragme d'ouverture  
Il passe par le centre de la pupille d'entrée et sort par le centre de la pupille de sortie.

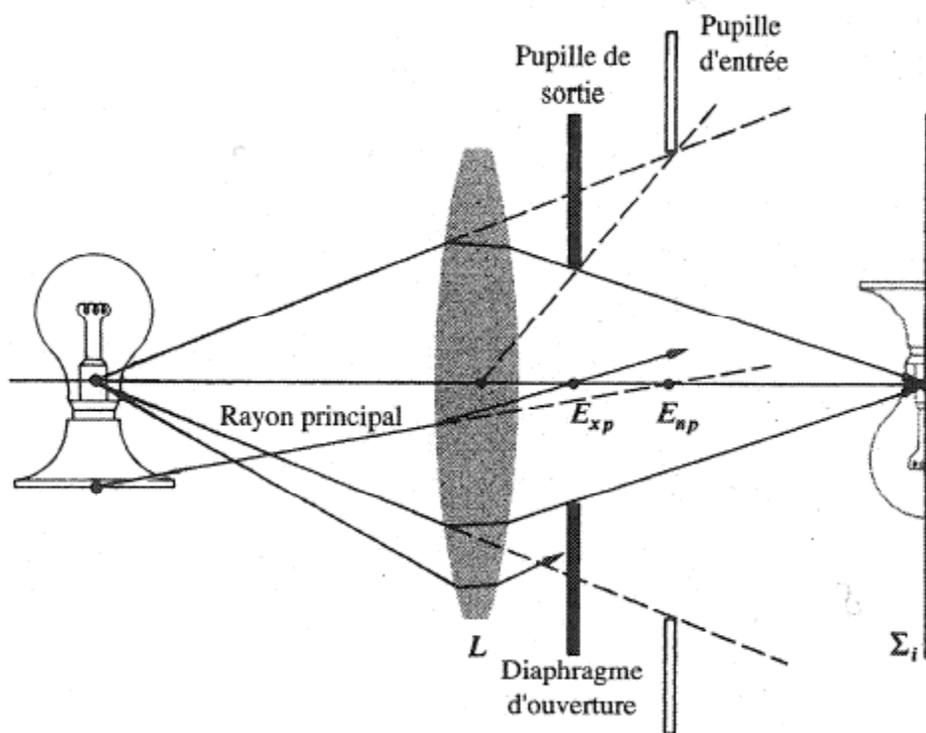


Figure 5.34 Pupille d'entrée et pupille de sortie.

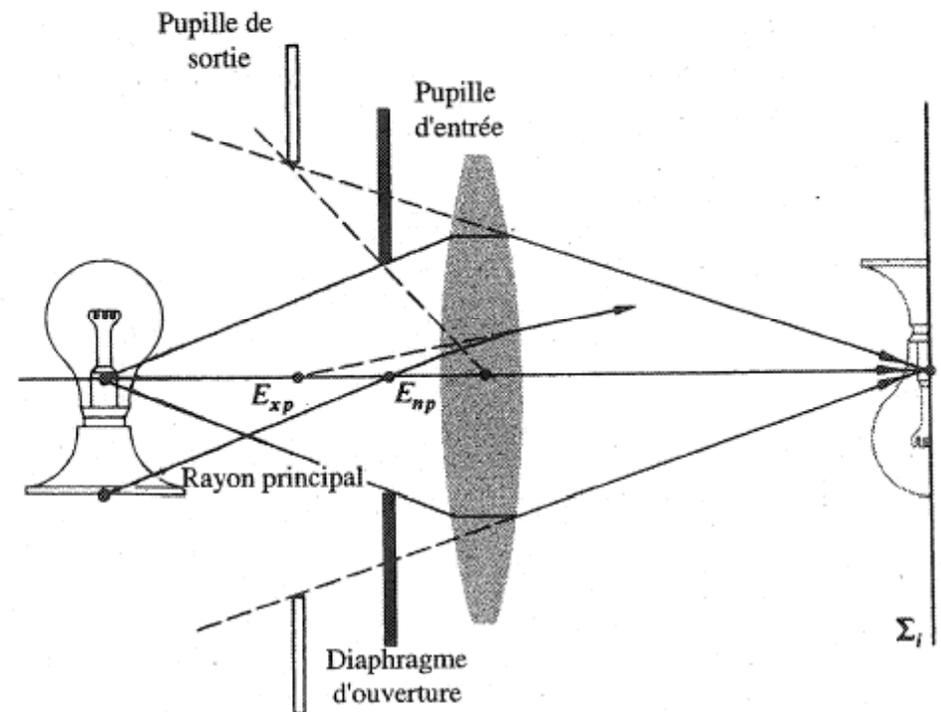
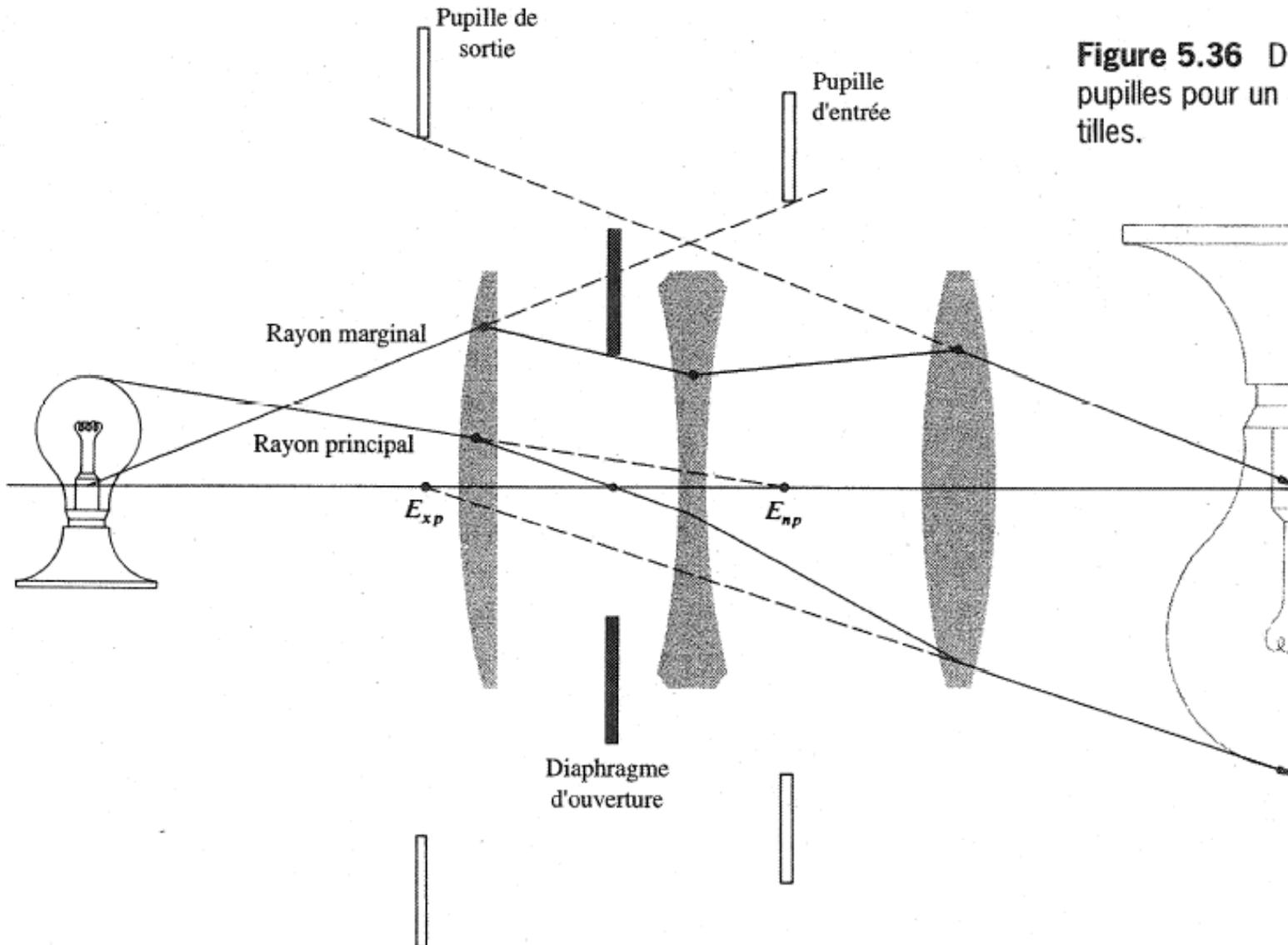


Figure 5.35 Exemple où le diaphragme d'ouverture est situé devant l'optique.

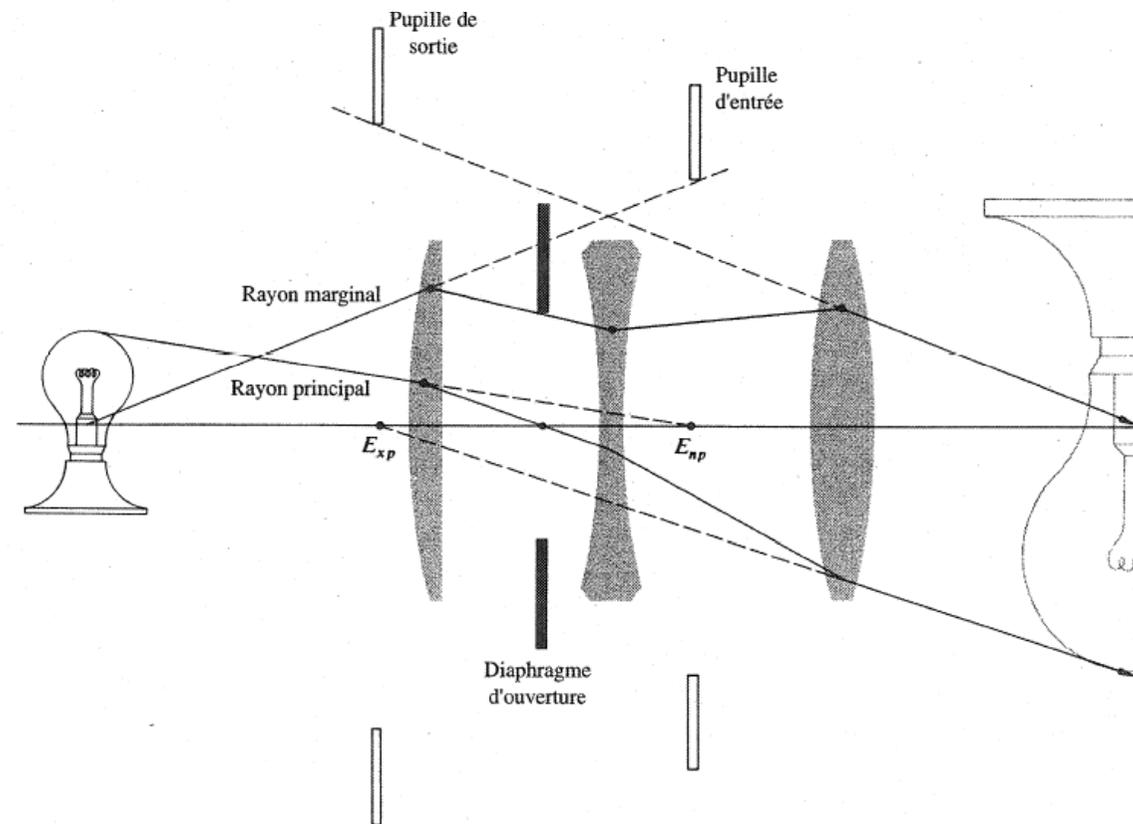
# Pupilles

**Rayon marginal:** rayon issu d'un point objet hors axe qui passe par le **bord** du diaphragme d'ouverture



**Figure 5.36** Diaphragmes et pupilles pour un système à trois lentilles.

# Pupilles



Dans le cas où l'on ne sait pas exactement quel élément est le diaphragme d'ouverture, on doit faire l'image de chaque composant possible par l'ensemble des optiques se trouvant à sa gauche. *La pupille d'entrée est l'image qui, vue depuis le point axial de l'objet, sous-tend le plus petit angle.* L'élément dont l'image est la pupille d'entrée est alors le diaphragme d'ouverture du système pour ce point objet.

# Pupilles

La notion de pupille est intéressante car elle détermine pratiquement le cône de lumière (faisceau) qui entre dans le système (déterminé par le point source et les bords de la pupille d'entrée) et celui qui sort du système (déterminé par le point image et les bords de la pupille de sortie). Tout rayon partant du point source et extérieur à ces deux cônes ne peut atteindre son point image conjugué.

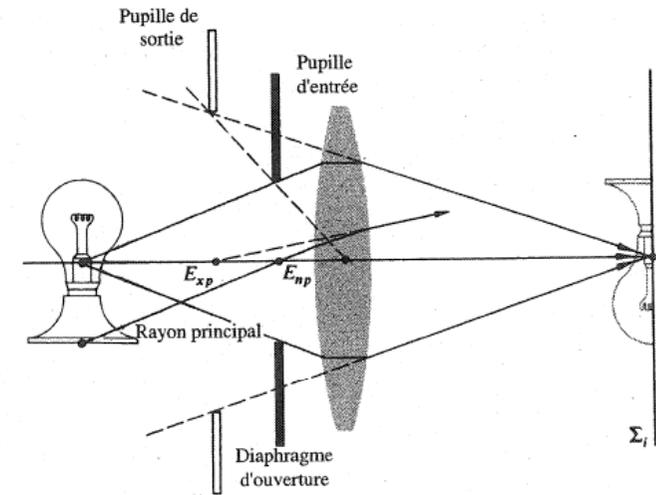


Figure 5.35 Exemple où le diaphragme d'ouverture est situé devant l'optique.

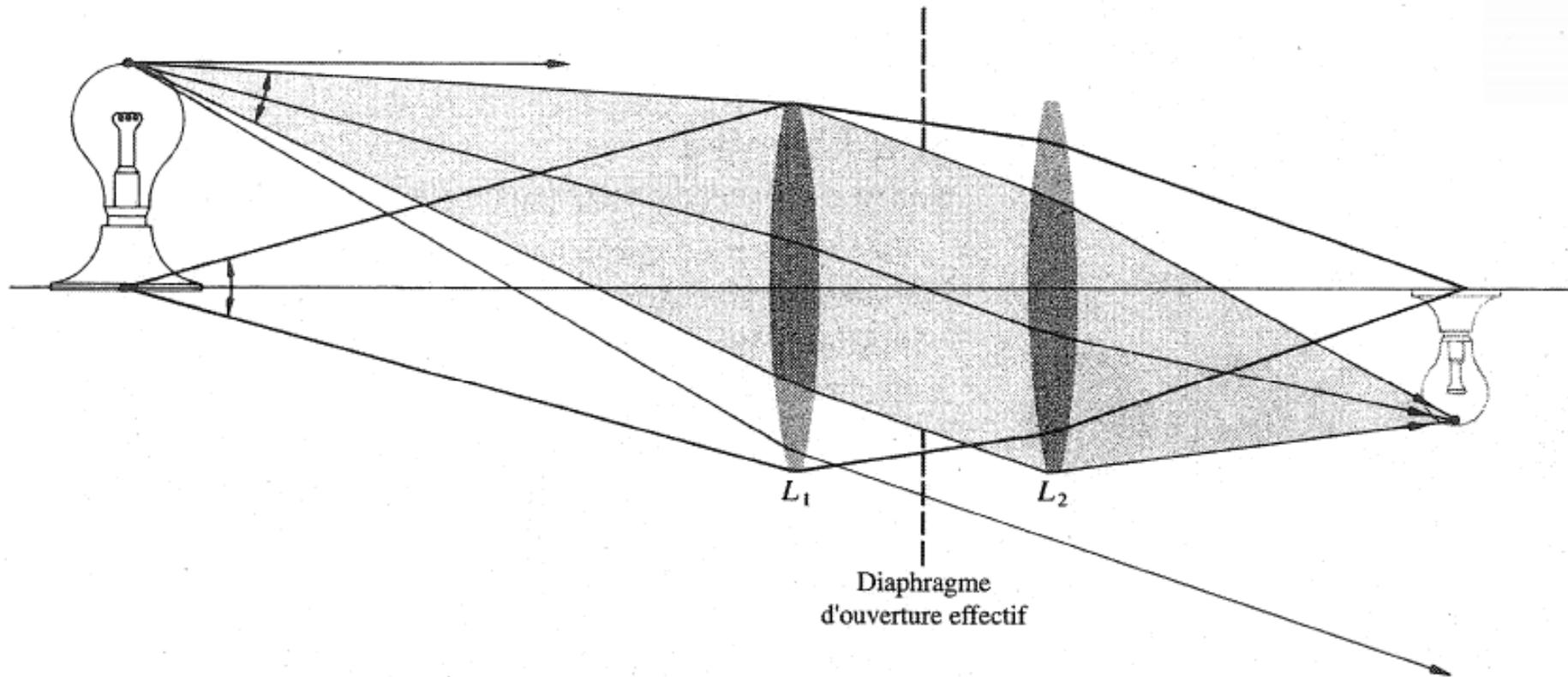
Connaître la position et la taille des pupilles d'un système optique est d'une importance pratique considérable. Dans les instruments visuels, l'œil doit par exemple être placé au centre de la pupille de sortie (*cercle oculaire*). Or la pupille de l'œil humain varie entre 2 mm et 8 mm (en fonction de l'éclairement). On voit donc que la pupille de sortie de jumelles ou de tout autre instrument devant être utilisé, par exemple, dans de faibles conditions d'éclairement doit avoir un diamètre d'au moins 8 mm. En revanche, pour un instrument à utiliser en plein jour, une pupille de sortie de 3 ou 4 mm suffit.

Plus la pupille de sortie est grande, plus il est facile d'aligner convenablement son œil.

# Vignelage



# Vignetage



On voit bien, sur la figure , que le cône de rayons qui peut atteindre le plan image se rétrécit lorsque le point objet s'éloigne de l'axe. Le diaphragme d'ouverture effectif (qui était déterminé par les bords de  $L_1$  pour le point sur l'axe) vu depuis un point hors axe est en effet une surface de plus en plus réduite, à mesure que le point s'éloigne de l'axe. Le résultat est un assombrissement progressif des bords de l'image ou vignetage.

## Ouverture relative et nombre d'ouverture

L'éclairement dans le plan image varie comme  $(D/f)^2$

$D$  : diamètre de la pupille d'entrée

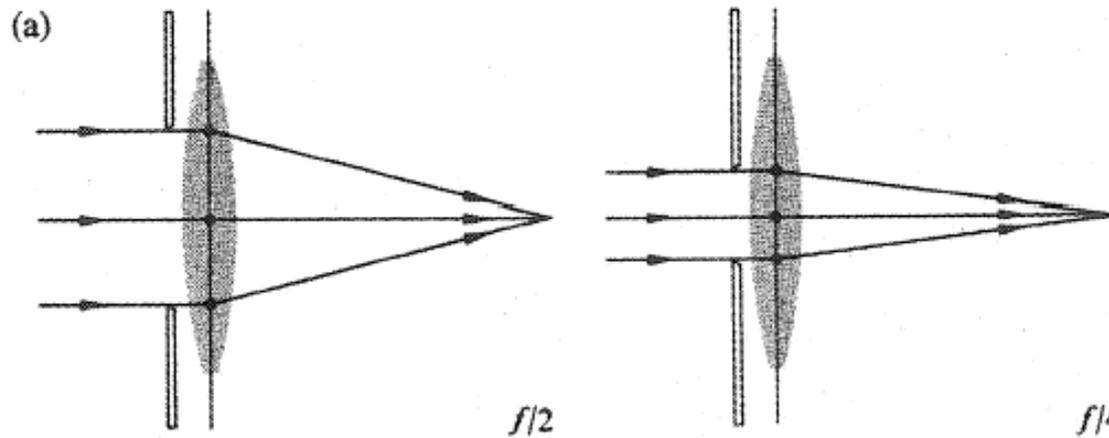
$f$  : tirage focale image

$D/f$  est appelé ouverture relative

$f/D$  est appelé nombre d'ouverture ou nombre  $f$  ( $f$  number):  $f/\# = \frac{f}{D}$

Remarquons que «  $f/\#$  » doit être lu comme un symbole unique et non pas comme un rapport. Par exemple, une lentille qui a une ouverture  $D = 25$  mm et une distance focale  $f = 50$  mm a un nombre d'ouverture de 2. On dit alors usuellement que *le système est ouvert à  $f/2$* .

Nombre d'ouverture  $f/\# = \frac{f}{D}$

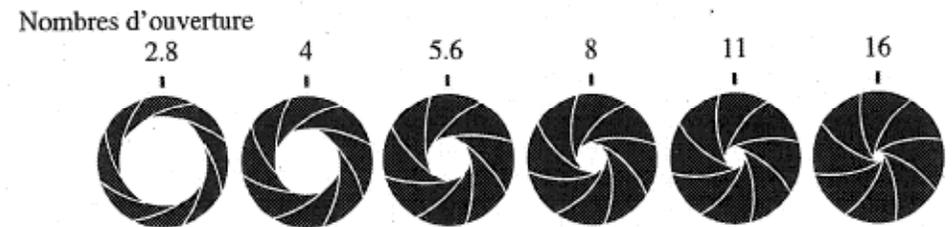
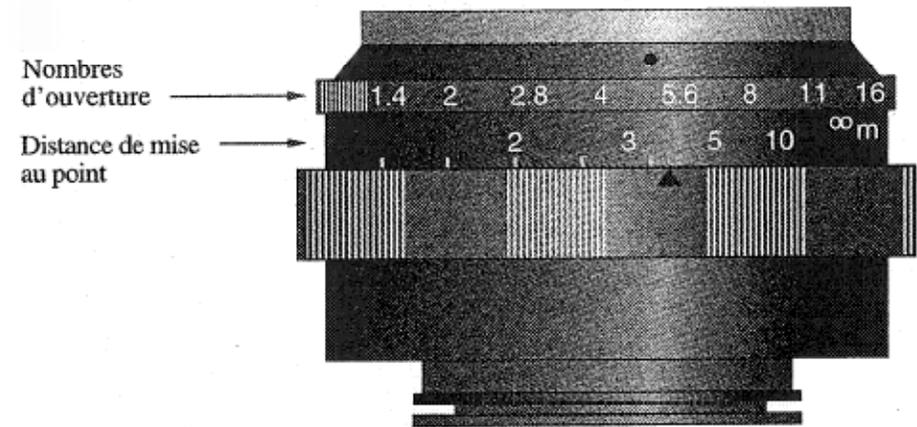


Deux configurations de diaphragme correspondant à deux nombres d'ouverture.

Pour une même focale, un petit nombre d'ouverture correspond à un grand diamètre: plus de lumière peut alors atteindre le plan image.

# Nombre d'ouverture $f/\# = \frac{f}{D}$

Les objectifs photographiques sont habituellement spécifiés par leur distance focale et par leur ouverture la plus grande (ou nombre d'ouverture le plus petit). On peut par exemple lire sur un objectif : « 50 mm,  $f/1,4$  ». Comme le temps d'exposition est proportionnel au carré du nombre d'ouverture,  $f/\#$  est parfois qualifié de **vitesse** de l'objectif. On dit par exemple qu'un objectif  $f/1,4$  est deux fois plus rapide qu'un objectif  $f/2$ . Habituellement, les marquages sur les objectifs photographiques ont les valeurs : 1, 1,4, 2, 2,8, 4, 5,6, 8, 11, 16, 22, et ainsi de suite. L'ouverture la plus large dans ce cas correspond à  $f/1$ , ce qui est très ouvert :  $f/2$  est plus courante. On voit donc que l'on passe d'un nombre d'ouverture particulier au suivant en le multipliant par un facteur  $\sqrt{2}$  (arrondi numériquement). Cela correspond donc à un facteur  $1/\sqrt{2}$  pour l'ouverture relative et à un facteur  $1/2$  pour l'éclairement. Ainsi, la même quantité de lumière atteint le film photographique si l'on a un nombre d'ouverture  $f/1,4$  pour un temps d'exposition de  $1/500$  de seconde,  $f/2$  pour  $1/250$  s, ou  $f/2,8$  pour  $1/125$  s.



Nombre d'ouverture  $f / \# = \frac{f}{D}$  pour des instruments astronomiques

La plus grande lunette astronomique du monde, située au Yerkes Observatory de l'université de Chicago a un objectif d'environ un mètre de diamètre et une distance focale d'environ 18,9 mètres, et donc un nombre d'ouverture de 18,9. Les systèmes à miroirs ont eux aussi un nombre d'ouverture déterminé par le diamètre de la pupille d'entrée et leur distance focale. Ainsi, le télescope du Mont Palomar dont le miroir fait 5,08 mètres de diamètre pour une focale d'environ 16,9 mètres a un nombre d'ouverture de 3,33.

# Exercice

On a deux lentilles minces séparées de 5 cm:

L1 avec diamètre = 6 cm et  $f = 9$  cm

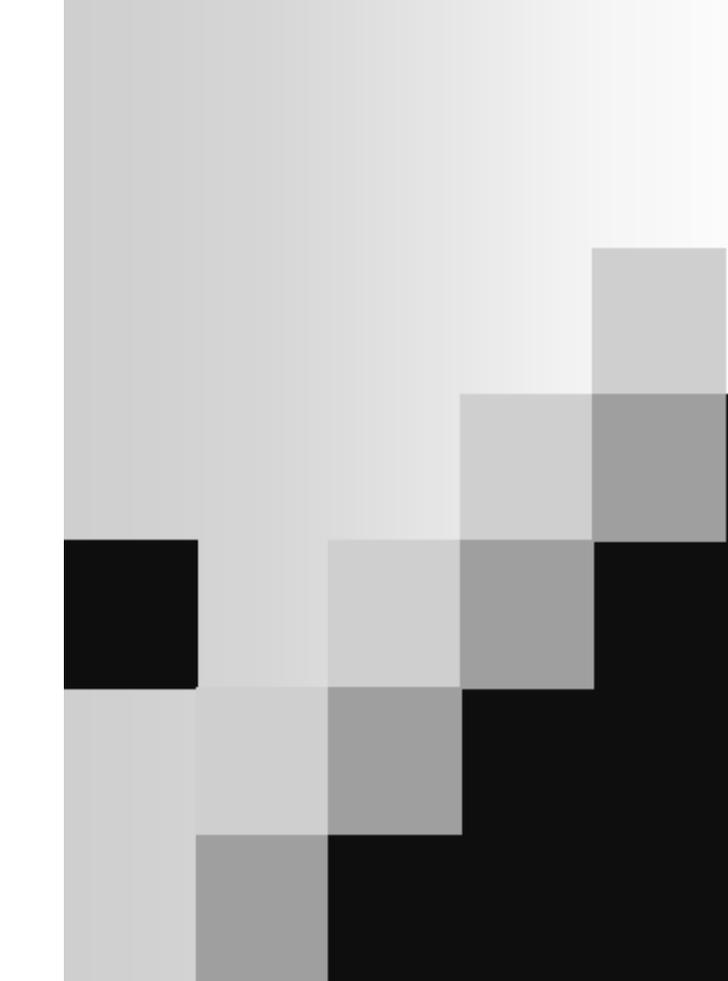
L2 avec diamètre = 4 cm et  $f = 3$  cm

On place 2 cm devant L2 un diaphragme de diamètre 1 cm

Déterminer

- le diaphragme d'ouverture
- la position et taille des pupilles pour un point axial S situé 12 cm devant L1





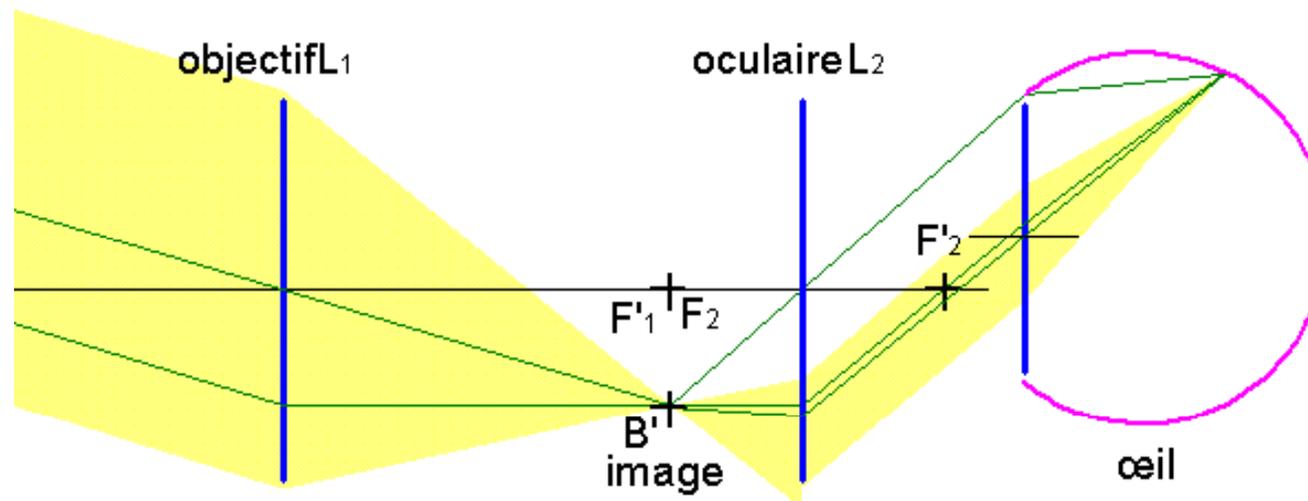
# La lunette afocale, ses pupilles, etc.

# La lunette afocale

Une lunette astronomique est dite afocale lorsque le foyer image de l'objectif est à la même position que le foyer objet de l'oculaire.

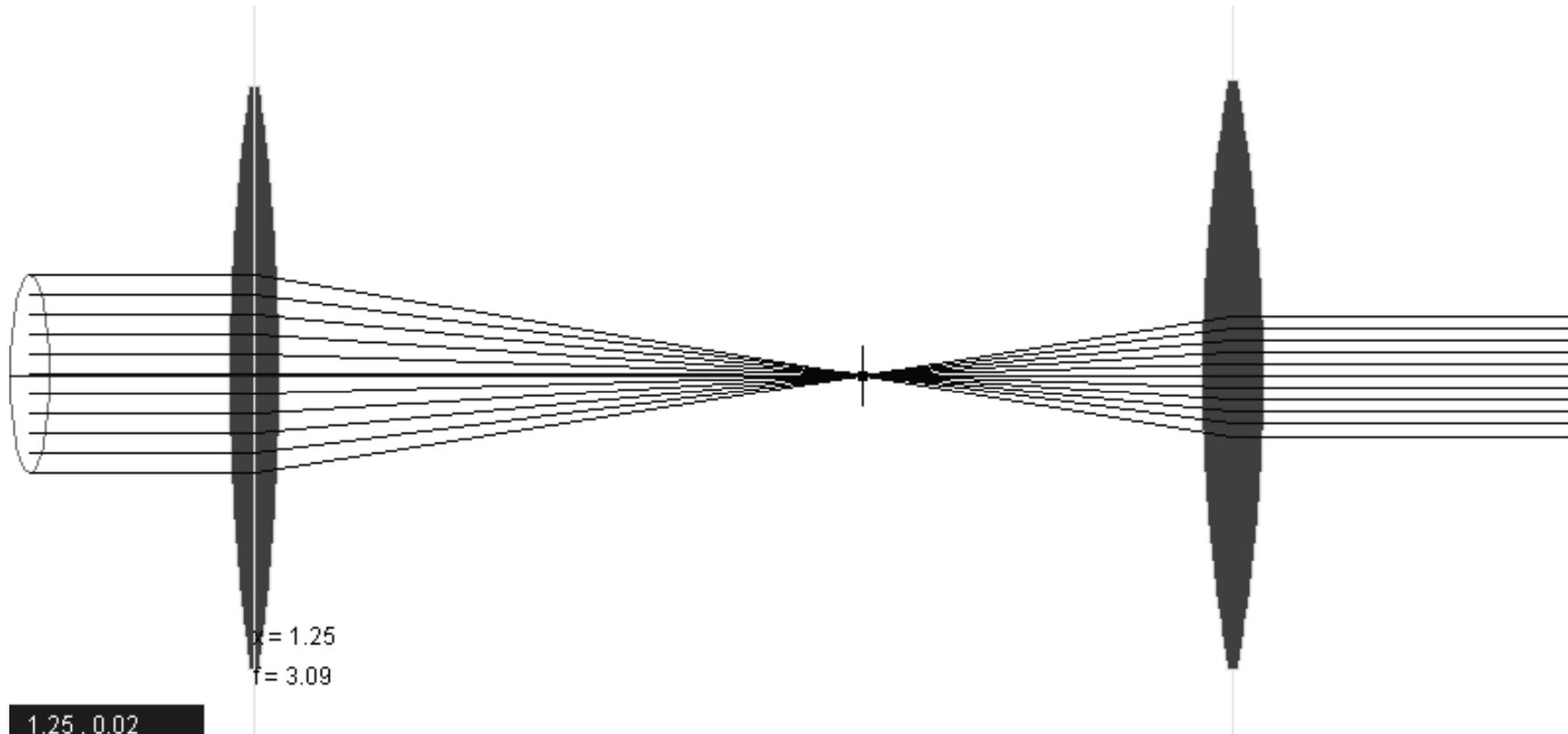
L'objet observé se trouvant à l'infini son image se trouve dans le plan focal image de l'objectif. Or le plan focal image de l'objectif est aussi le plan focal objet de l'oculaire, l'image fournie par celui-ci se trouve à l'infini.

L'œil humain étant fait pour observer un objet situé à l'infini, il n'a pas besoin d'accommodation particulière lorsqu'il observe une image à travers une lunette astronomique afocale.



# Systeme afocal

Un systeme afocal est un systeme optique dont la vergence est nulle. Il a notamment comme propriete de laisser ressortir parallele apres le systeme un faisceau de rayons paralleles entre eux avant le systeme.





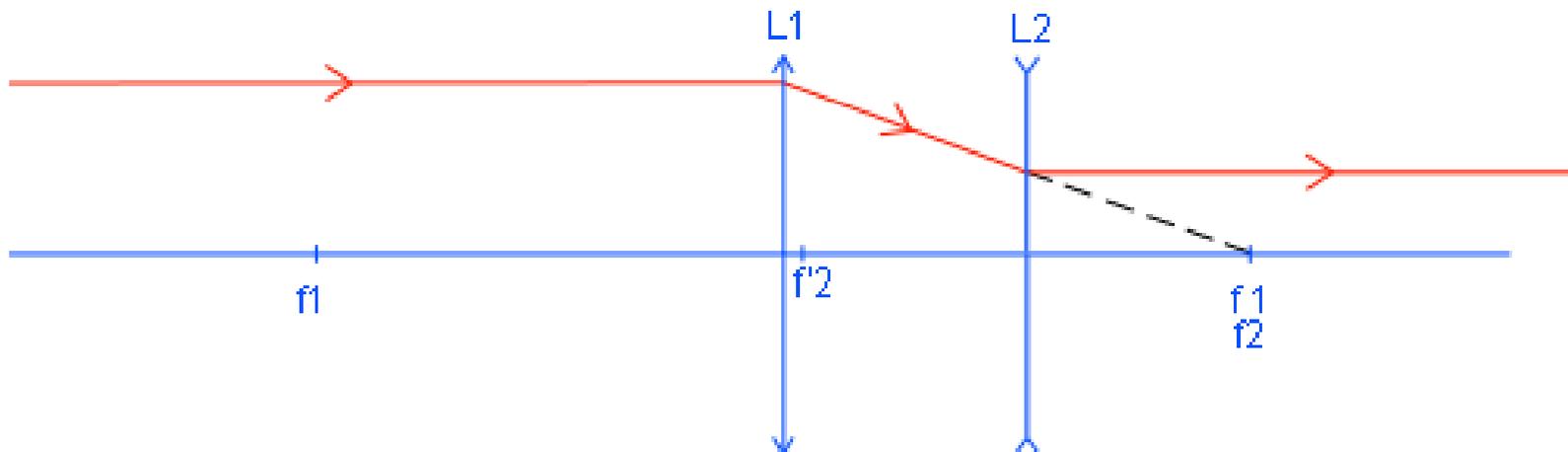
Dans le cas le plus simple, un **système afocal** peut-être réalisée avec deux lentilles.

Il suffit alors de faire coïncider le point focal image de la première lentille avec le point focal objet de la seconde.

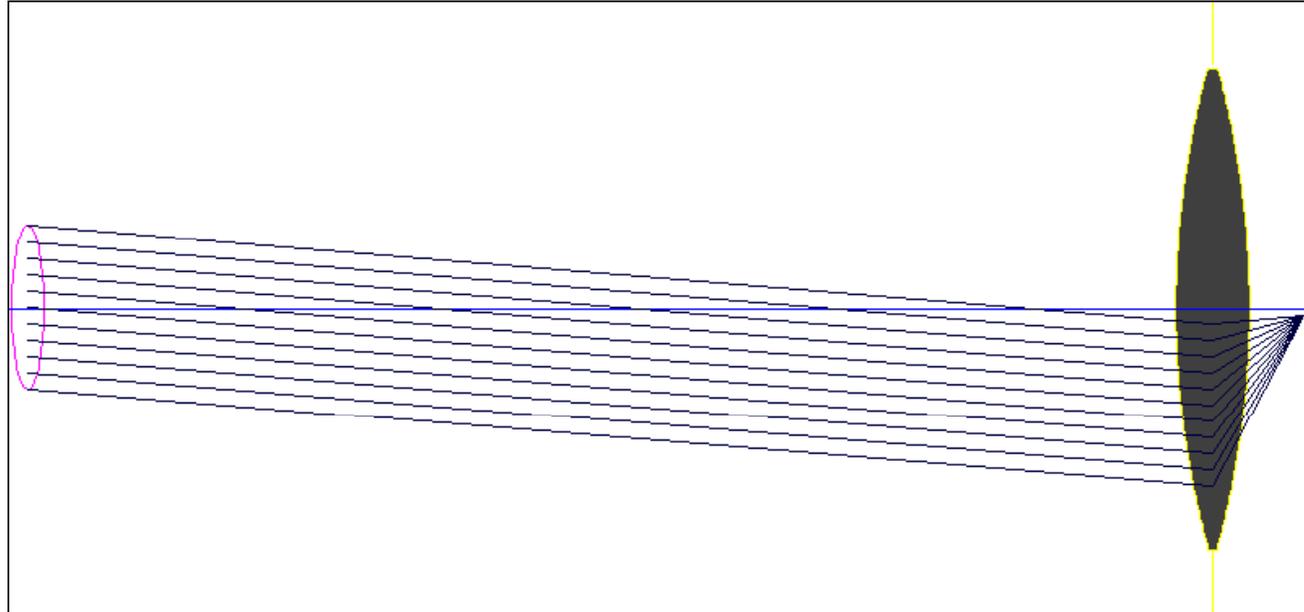
Dans ce cas la première lentille est appelée objectif et l'autre oculaire. Typiquement un système afocal regroupera une lentille convergente et une lentille divergente dont le foyer image de l'une est confondu avec le foyer objet de l'autre est possible. Selon la combinaison des lentilles, le diamètre d'un faisceau parallèle sera réduit ou augmenté.

Si les rayons entrent parallèles entre eux sous un angle  $\alpha$  et ressortent parallèles entre eux sous un autre angle  $\alpha'$  mesuré par rapport à l'axe optique des 2 lentilles, on peut alors définir le **grandissement angulaire**  $G = \alpha'/\alpha$  et l'élargissement du faisceau  $G = F/f$ , avec  $F$  distance focale de l'objectif et  $f$  distance focale de l'oculaire.

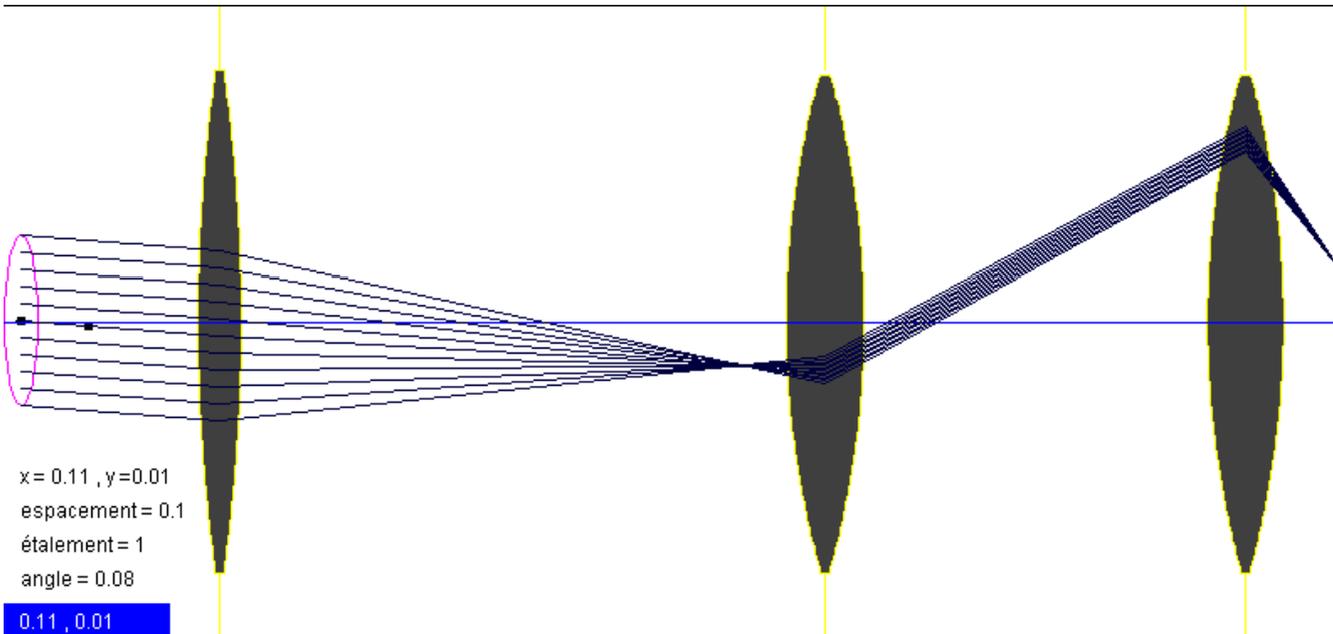
Le rapport des tailles du faisceau en entrée et en sortie vaut:  $1/G$



# Systeme afocal

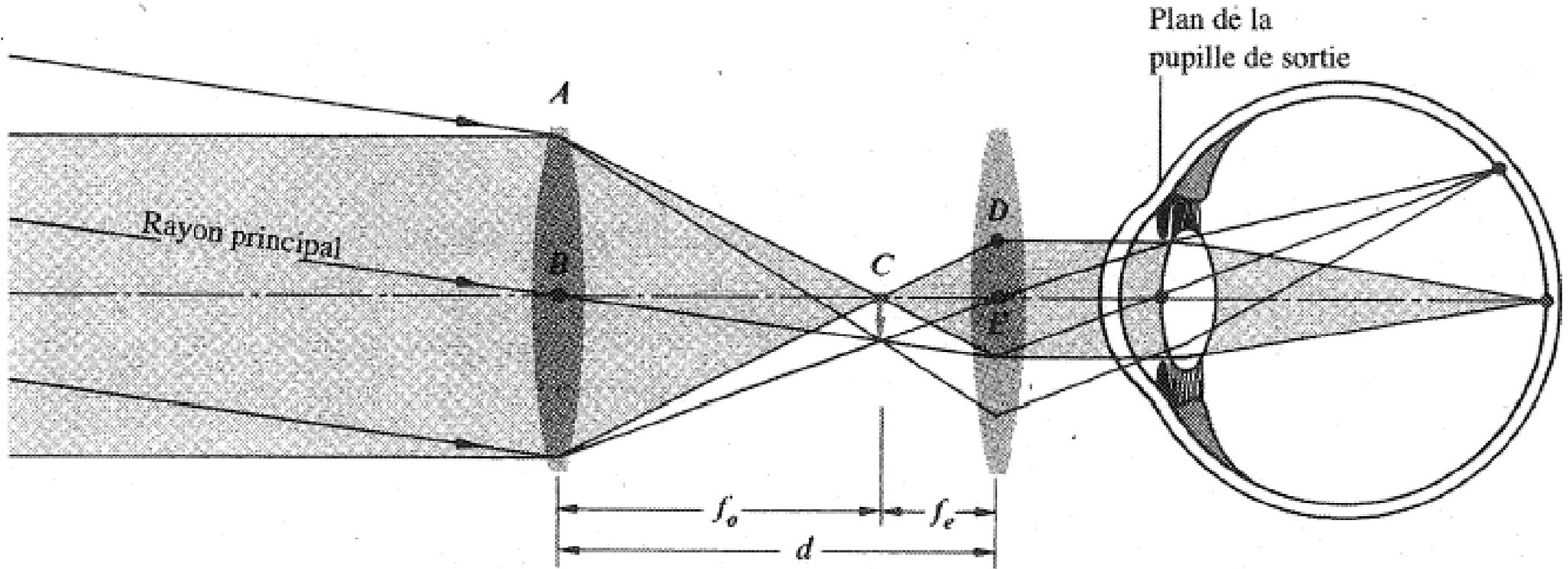


Œil nu qui regarde un objet à l'infini



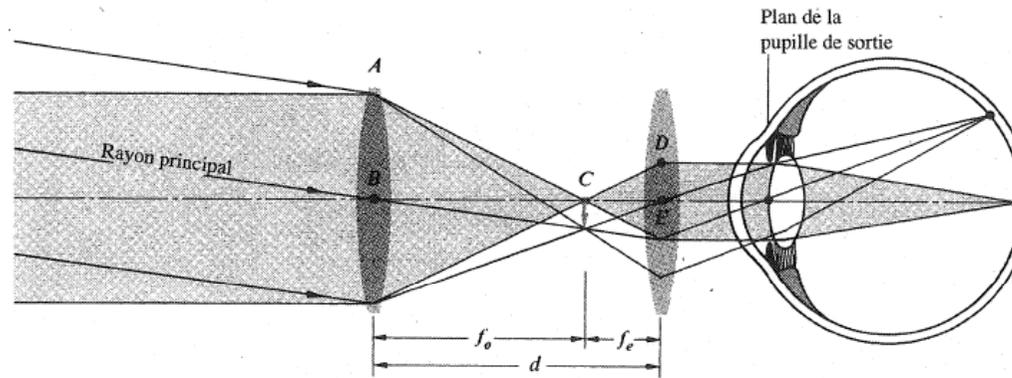
Œil qui regarde un objet à l'infini à travers d'une lunette afocale

# Lunette astronomique afocale

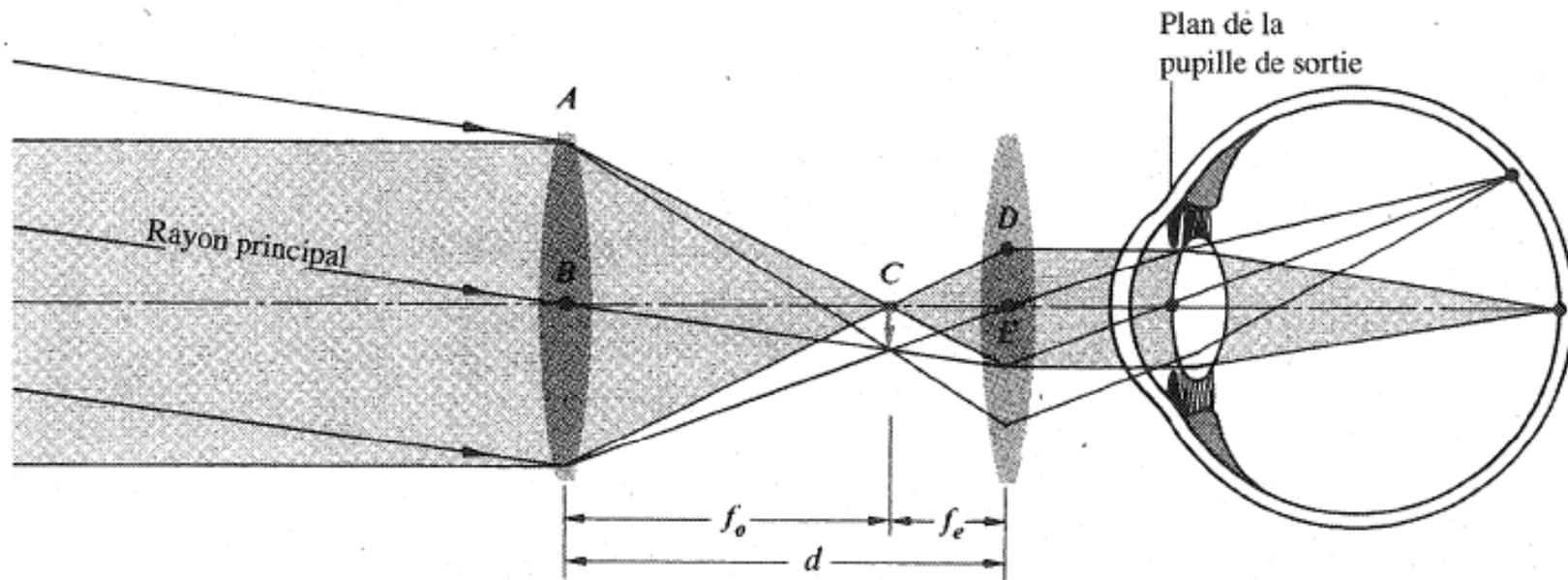


$$d = f_o + f_e$$

# Lunette astronomique afocale

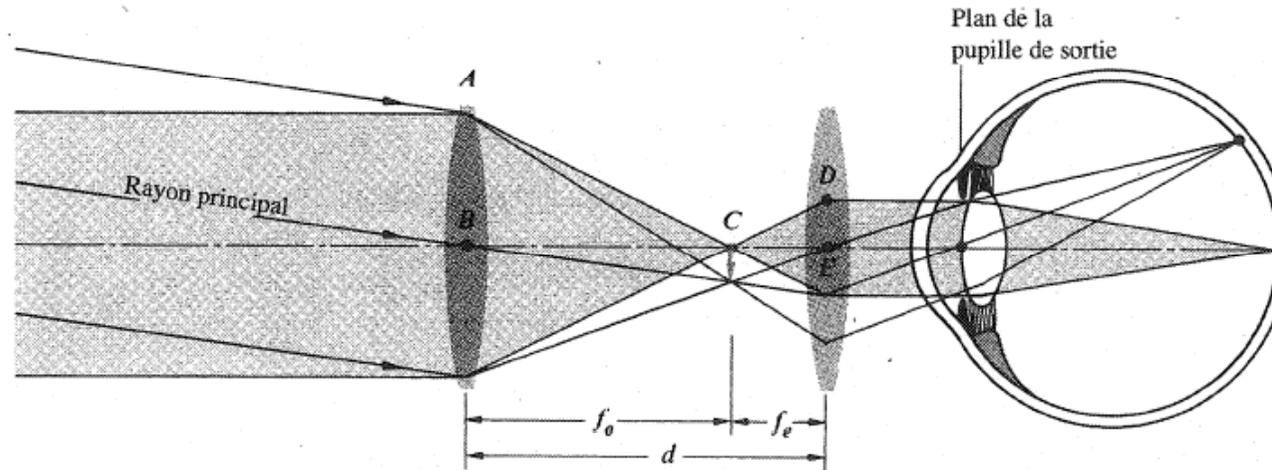


- La monture de l'objectif constitue généralement le diaphragme d'ouverture du système, ainsi que sa pupille d'entrée (étant donné qu'il n'y a pas de lentille à la gauche de l'objectif).
- Si la lunette pointe des objets à distance astronomique, l'axe visuel est pratiquement colinéaire avec l'axe optique de l'instrument. Pour des conditions d'observation optimales, la position de la pupille d'entrée de l'œil (i.e. la pupille, au sens physiologique) doit coïncider avec la pupille de sortie (cercle oculaire) de l'instrument.
- L'œil n'est cependant pas immobile. Le regard balaye instinctivement tout le champ visuel, en s'arrêtant localement sur les objets intéressants, c'est-à-dire en orientant les rayons provenant de ces objets sur la fovéa. La direction déterminée par le rayon principal qui relie le centre de la pupille d'entrée à la fovéa constitue la ligne de visée principale. Le croisement des différentes lignes de visée, obtenues pour toutes les orientations possibles de l'œil, détermine un point d'intersection de visée, fixe par rapport à la tête de l'observateur.



Pour que la vision puisse balayer tout le champ de la lunette, on comprend qu'il est nécessaire que **l'œil soit positionné au centre de la pupille de sortie** de la lunette. Dans ce cas, la ligne de visée principale correspond au rayon principal passant au centre de la pupille de sortie de l'instrument, quelle que soit l'orientation instantanée de l'œil.

# Cercle oculaire = diamètre de la pupille de sortie



De plus il est utile que le cercle oculaire (= diamètre de la pupille de sortie) soit en rapport avec celui de la pupille d'entrée de l'œil (ou de la caméra le cas échéant), ce qui peut être obtenu par un choix opportun des focales:

on a vu que 
$$G_A = \frac{f_1}{f_2} = \frac{f_o}{f_e}$$

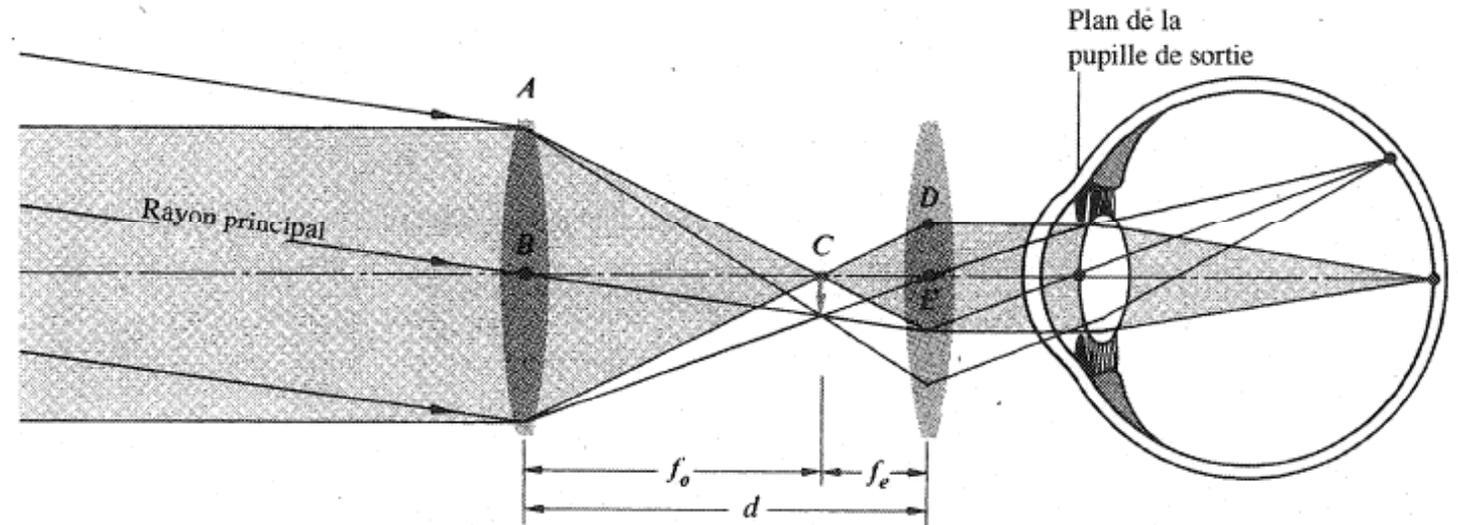
on a aussi

$$G_A = \frac{D_o}{D_{ep}}$$

Avec  $D_o$  = diamètre de l'objectif

$D_{ep}$  = diamètre de la pupille de sortie

# Champ de vision



Le champ de la lunette astronomique est l'ensemble des points visibles dans l'instrument.

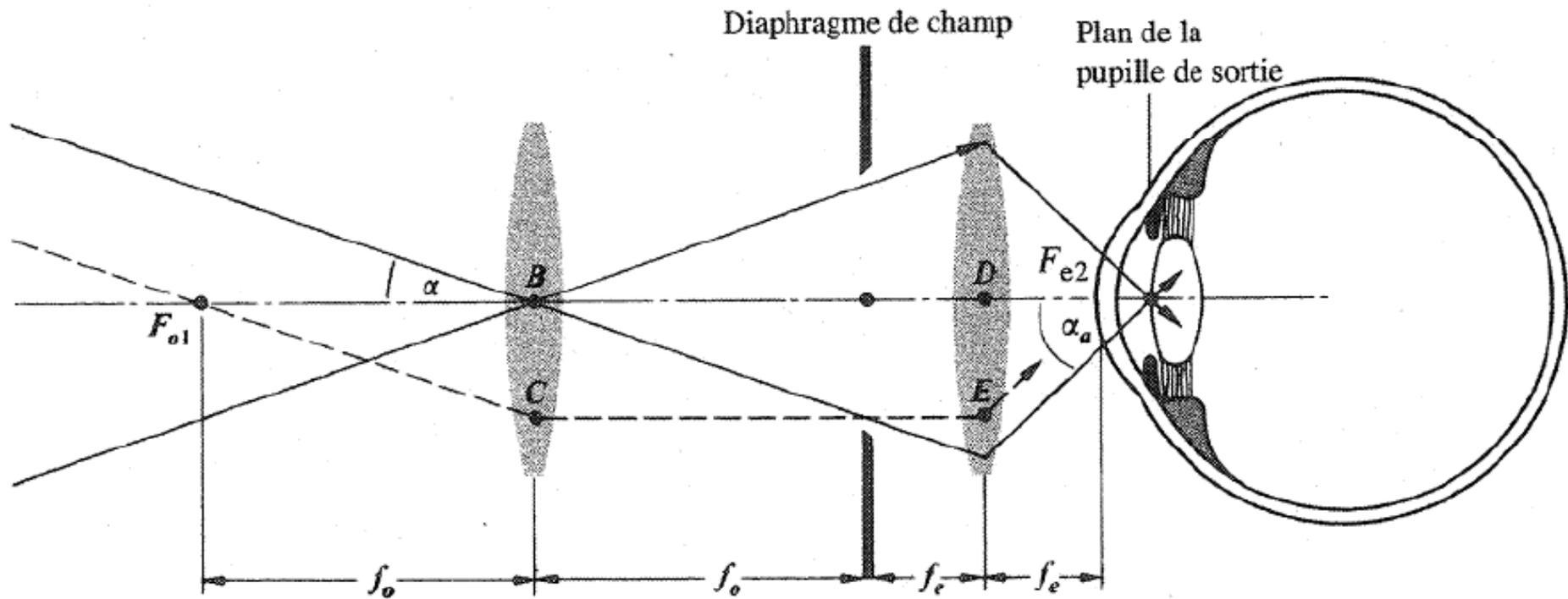
Il est défini comme étant l'espace compris dans un cône de révolution dont l'axe est l'axe optique de la lunette et dont l'angle au sommet est  $2\omega$ .

Le champ est déterminé par l'angle sous lequel on voit du centre optique  $O_1$  de l'objectif le diamètre  $2r$  de la lentille de l'oculaire.

Le demi-angle  $\omega$  est donc défini comme:

$$\omega \approx \tan \omega = \frac{r_e}{f_o + f_e}$$

# Lunette avec diaphragme de champs



# Lunette terrestre

À la différence des instruments astronomiques, les lunettes terrestres (longues-vues) doivent comporter un système permettant de redresser l'image. Une ou plusieurs lentilles de redressement sont alors disposées entre l'objectif et l'oculaire, ce qui permet d'avoir l'image finale dans le même sens que l'objet de départ.

La figure ici-bas montre un tel système utilisant un objectif en doublet collé, le système de redressement et un oculaire. Un tel dispositif nécessite une grande longueur de tube: c'est typiquement la longue-vue télescopique que l'on voit dans les films de pirates.

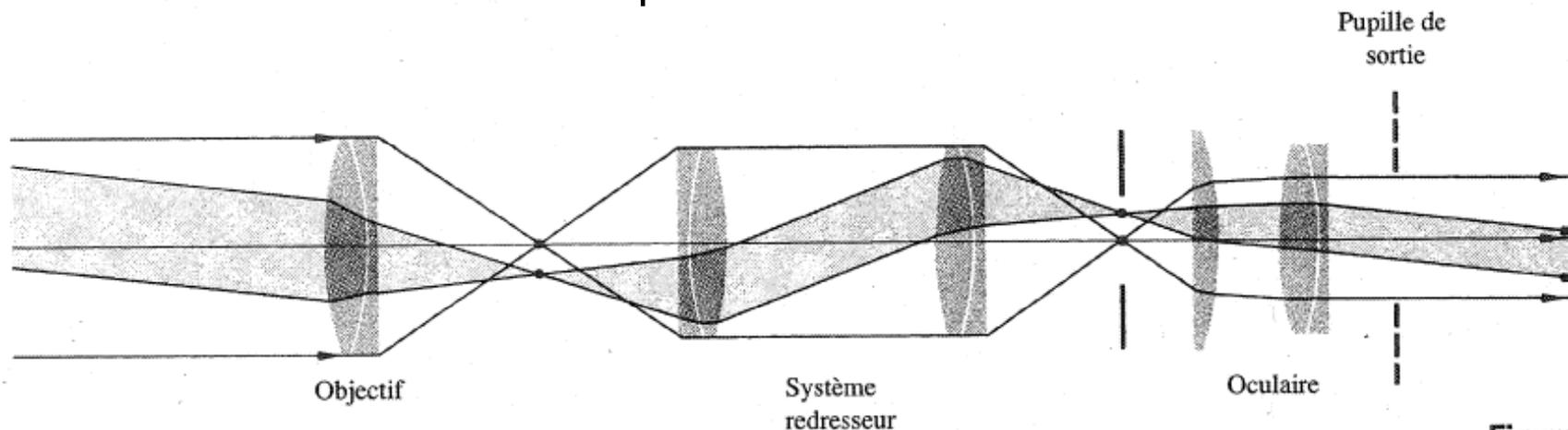
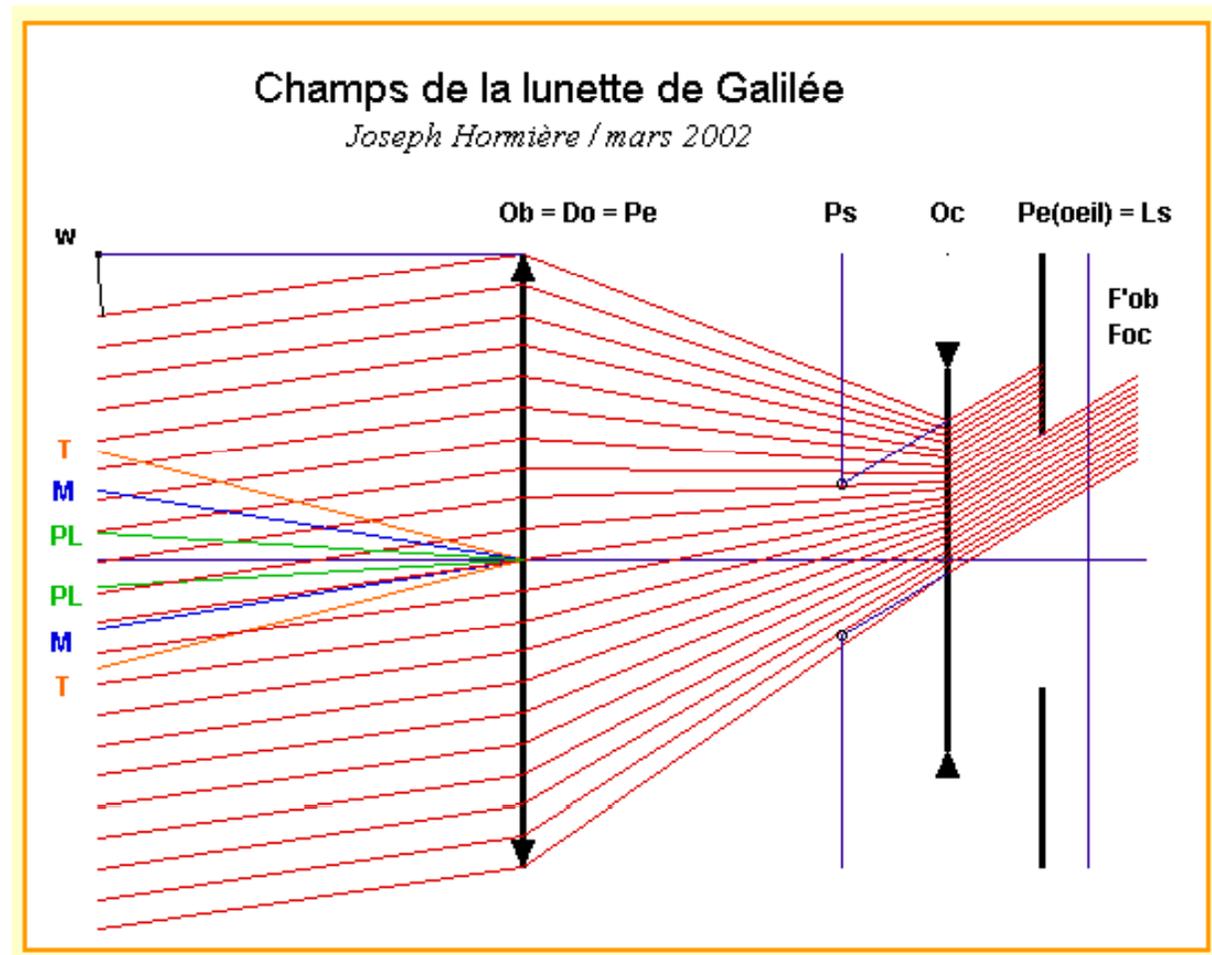


Figure 5.108 Lunette terrestre.

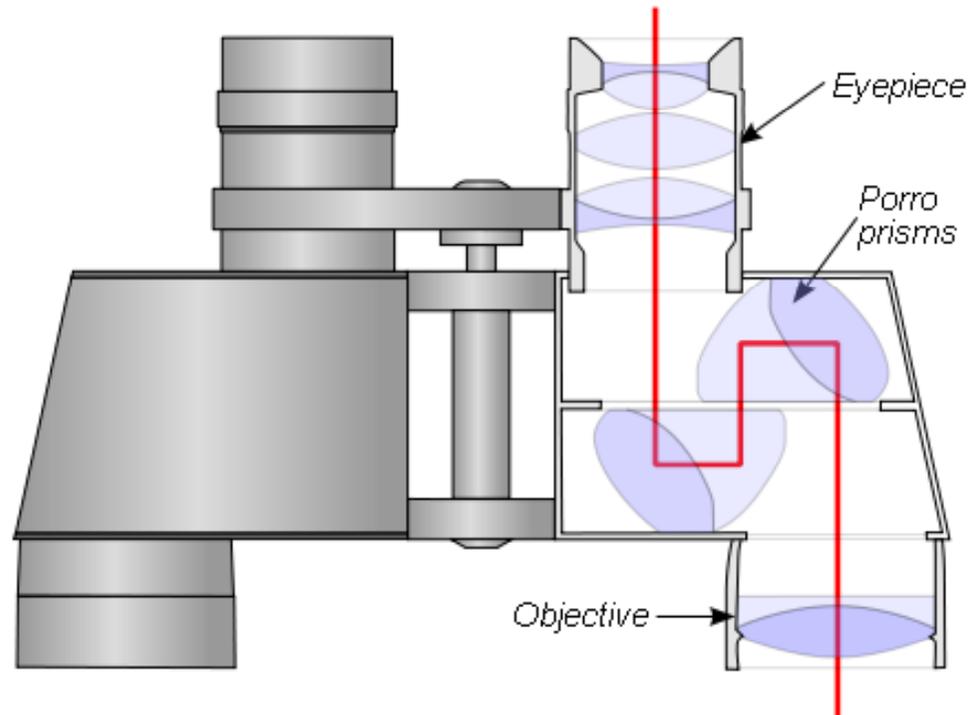
# Pupilles et champ pour une lunette avec oculaire divergeant



Voir animation dans <http://www.dino-optic.fr/Galilee4.htm>

Aussi, tout sur l'optique de la lunette de Galilée à partir de la page <http://www.dino-optic.fr/Galilee0.htm>

# Jumelles



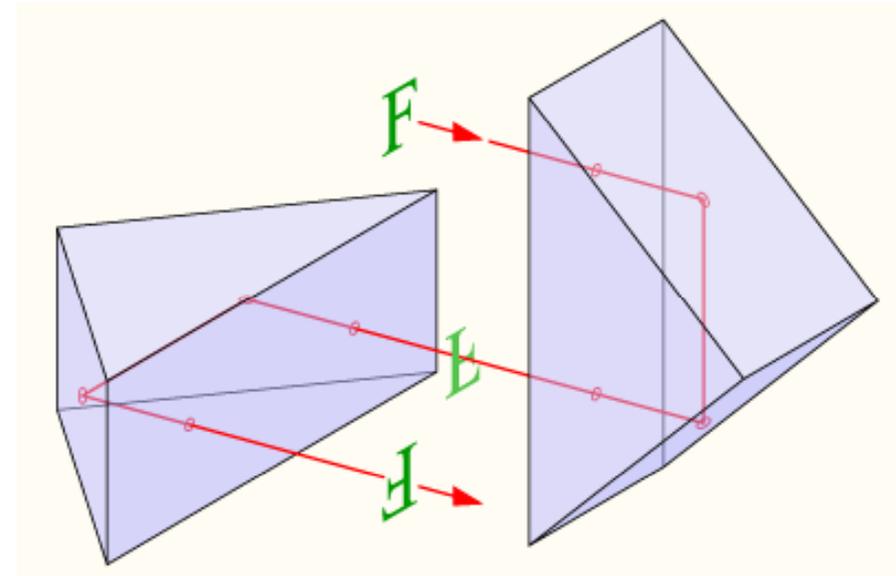
Le double prisme permet d'avoir une longue distance entre l'oculaire et l'objectif.

## 2 prismes de Porro font un redresseur

L'inconvénient des instruments d'optique fondés sur la réfraction de la lumière est que l'image est ordinairement inversée (le haut de l' **objet** se retrouve en bas de l' **image**).

L'interposition d'un redresseur permet de former une image de même position que l'objet.

Les systèmes redresseurs sont constitués à partir d'un ou plusieurs prismes et sont fondés sur le principe de la [réflexion totale](#).



# Exercices

1. L'objectif d'une lunette a un diamètre de 12,5 cm et une focale de 85 cm. L'oculaire a un diamètre de 1,5 cm et une focale de 2,5 cm. Calculer:
  - Le grossissement
  - Le diamètre de la pupille de sortie
  - Le champ de vision
  - La distance oculaire-œil

# Travail personnel

Calculer:

Le grossissement

Le diamètre de la pupille de sortie

Le champ de vision

La distance oculaire-œil (position de la pupille de sortie)

1. Lunette avec  
 $f_1 = 40 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 4 \text{ cm}$ ,  $f_2 = 12,5 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 10 \text{ mm}$
2. Jumelles longue vue avec  
 $f_1 = 26,5 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 65 \text{ mm}$ ,  $f_2 = 25 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 12,5 \text{ mm}$

# Travail personnel

Etudier les chapitres du polycopié:

- « Diaphragme et pupilles »
- « Lunettes »