

CHAPITRE 2

FORMATION DES IMAGES

Sommaire

I . Principe d'un système optique	1
1 . Le système optique	1
2 . Caractérisation de l'objet et de l'image	2
II . Miroir plan et stigmatisme	2
1 . Réflexion sur un miroir	2
2 . Marche des rayons	3
3 . Stigmatisme rigoureux	4
III . Condition de Gauss	4
1 . Stigmatisme approché	4
2 . Énoncé des conditions de Gauss	5
3 . Aplanétisme	5
IV . Lentilles minces	5
1 . Constitution	5
2 . Foyers	6
3 . Construction de l'image d'un objet	7
4 . Construction d'un rayon	12
5 . Relation de conjugaison	13
6 . Projection de l'image d'un objet réel	15
V . Systèmes optiques réels	16
1 . L'oeil	16
2 . L'appareil photo	19
3 . La lunette astronomique)	23
4 . Microscope	24

Ce chapitre s'intéresse à l'effet des lentilles et des miroirs sur un rayon lumineux. Il s'agit de comprendre et de prévoir le trajet des rayons lumineux à travers un ensemble de lentilles et ou miroirs formant un dispositif optique tel qu'un appareil photographique, un télescope ou un microscope.

I. Principe d'un système optique

L'oeil ne voit un objet un objet que s'il reçoit des rayons lumineux provenant de cet objet : l'œil est sensible à la direction des rayons qui l'atteignent, puisque l'image vue se situe à l'intersection de ceux-ci.

I.1. Le système optique**Définition**

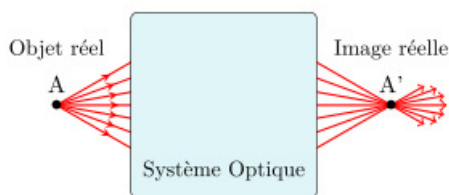
Un **système optique** est un ensemble de dioptrés et/ou de miroirs qui permettent de faire converger tous les rayons lumineux issus d'un point objet A de l'espace vers un point image A'. Les points A et A' sont dits **conjugués** par le système. On note : $A \xrightarrow{S} A'$.

Il est organisé autour de l'**axe optique** qui donne la direction principale de propagation de la lumière.

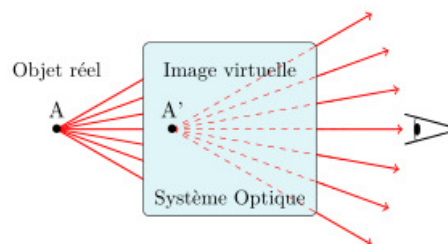
On dit que le système est **centré** si les différents milieux sont de révolution autour du même axe : l'**axe optique**.

I.2. Caractérisation de l'objet et de l'image

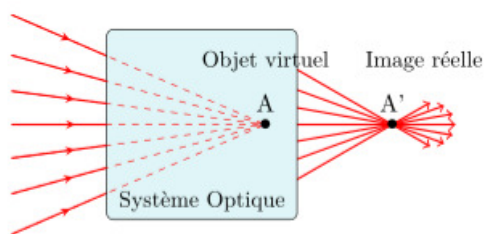
Application 1 : Objet et image réels ou virtuels ?



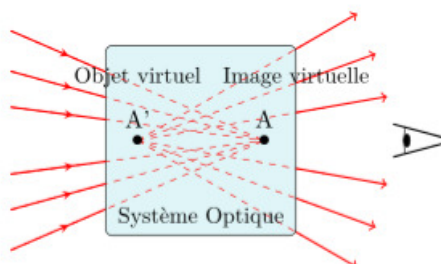
(a) Objet et image réels.



(b) Objet réel et image virtuelle = Loupe.



(c) Objet virtuel et image réelle.



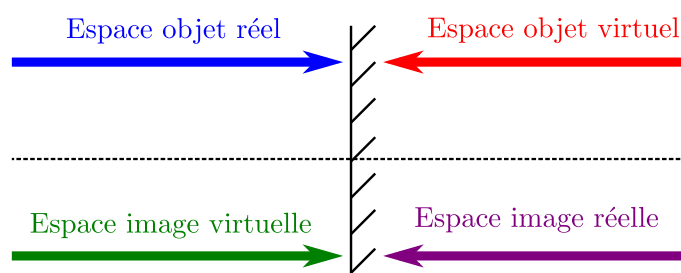
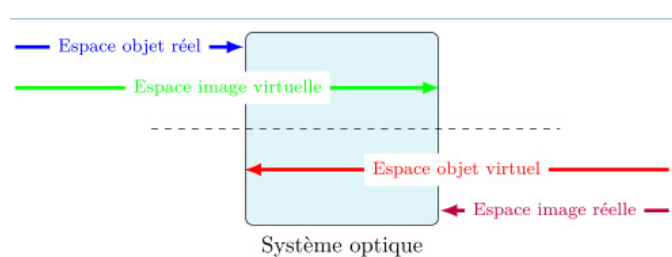
(d) Objet et image virtuels.

Un point objet ou un point image A est :

- **réel** si les rayons lumineux se croisent vraiment en ce point ;
- **virtuel** s'il faut prolonger les rayons pour trouver A.

Synthèse

Les schémas suivants résument ces notions. Le sens des rayons lumineux est conventionnellement de la gauche vers la droite, la face d'entrée et la face de sortie du système respectivement à gauche et à droite.



II. Miroir plan et stigmatisme

Compétences

Stigmatisme. Miroir plan.

*** Capacité : Construire l'image d'un objet par un miroir plan ***

II.1. Réflexion sur un miroir

Définition

Un **miroir plan** est un système constitué d'une surface réfléchissante, généralement métallique et souvent couverte d'une couche de verre protectrice. Tout rayon lumineux incident est réfléchi en totalité, selon les lois de Descartes.

II.2. Marche des rayons

Tous les rayons issus de A semblent provenir d'un point source A' symétrique de A par le plan du miroir. Le point A' vérifie :

$$\overline{AS} + \overline{A'S} = 0$$

avec $\overline{AS} > 0$ et $\overline{A'S} < 0$ (on introduit des **distances algébriques**).

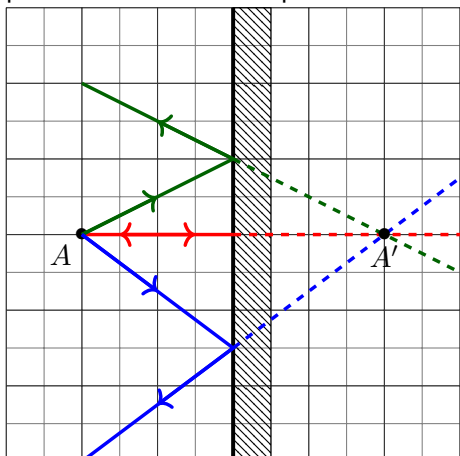
Cette relation permet de localiser le point A' : elle s'appelle **relation de conjugaison**. A est à l'intersection des rayons incidents. C'est un objet ponctuel réel. A' est à l'intersection des rayons émergents, c'est-à-dire réfléchis. On doit prolonger la direction des rayons en pointillés pour déterminer A' . A' est une image ponctuelle virtuelle.

À retenir ♥ Règles de tracé

- Les rayons doivent être tracés à la règle, et chaque rayon avec un stylo (ou feutre fin) de couleur différente.
- Les rayons doivent être orientés par une **flèche**.
- Les rayons incidents et les rayons émergents sont tracés en **traits pleins, avec une flèche dessus**.
- Les **prolongements** des rayons incidents et les prolongements des rayons émergents sont tracés en **traits pointillés**.

Application 2 : Construction de l'image par un miroir plan

1. Tracer la marche de trois rayons issus de A et frappant le miroir en trois points différents.



2. Tracer le prolongement en pointillés (ces rayons n'existent pas) des rayons réfléchis dans la partie arrière de $(\mathcal{M})$. Commenter.

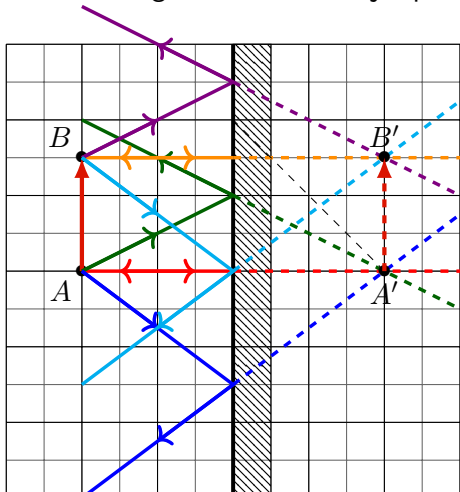
Pour un observateur placé en avant du miroir, tous les rayons issus de A et réfléchis par le miroir semblent provenir du point A' , symétrique du point A par rapport au miroir plan.

Le prolongement des rayons réfléchis dans la partie arrière du miroir se croisent. Les rayons réfléchis semblent provenir de ce point d'intersection : c'est l'image A' de A par le miroir.

On dit qu'elle est virtuelle, car elle est à l'intersection des prolongements des rayons réfléchis, et ne peut pas être projetée sur un écran. Cependant elle existe : on la voit !

Considérons un objet (AB) réel perpendiculaire à l'axe optique du miroir.

3. Tracer l'image $A'B'$ de cet objet par le miroir.



4. Comment est-elle par rapport à l'objet ?

L'image est symétrique de l'objet par rapport au miroir. Comme elle est virtuelle, on la représente en pointillés.

II.3. Stigmatisme rigoureux

Le point I n'intervient pas dans cette relation : la position de A' est indépendante du rayon lumineux (indépendante de I).

Tout rayon incident passant par A , voit son rayon émergent passer par A' . Le couple (A, A') est dit stigmatique. On dit aussi que A et A' sont conjugués par le miroir.

Remarque

Cette relation de stigmatisme rigoureux est rare. En effet dans un système optique, chaque rayon issu de A suit un chemin composé de portions rectilignes dans les zones d'indice constant, et connaît des changements de direction lors de la traversée d'un dioptré. Souvent, il n'existe pas de point A' , point de concours de tous les rayons issus de A . D'autres systèmes présentent une relation de stigmatisme seulement pour certains points particuliers.

Animation

(Animation peu claire) https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/dioptres/stig_dioptré_plan.php



III. Condition de Gauss

III.1. Stigmatisme approché

Compétences

*** Capacité : Relier le stigmatisme approché aux caractéristiques d'un détecteur ***

À part le miroir plan, il n'existe pas de système optique présentant un stigmatisme rigoureux. Dans ce cas comment fonctionnent les instruments de la vie réelle comme le rétroprojecteur, le photocopieur ou l'appareil photographique qui donne une image agrandie ou rétrécie d'un objet réel ?

Il faut revoir l'exigence d'idéalité pour avoir des systèmes optiques intéressants. Il faut accepter d'avoir une tâche en A' plutôt qu'un point. C'est le **stigmatisme approché**. Pourquoi est-il possible d'adopter ce critère approché ?

Que ce soit la rétine de l'œil composé de cellules biologiques, du récepteur de lumière constitué de pixels d'un appareil photo numérique, le capteur qui détecte l'image a une résolution limitée.

La rétine ou un capteur d'appareil photographique numérique est constitué d'une matrice d'éléments photosensibles (cellule rétinienne, photodiode). La perception de flou va dépendre de la taille des éléments photosensibles. Chaque élément correspond à un « point image »

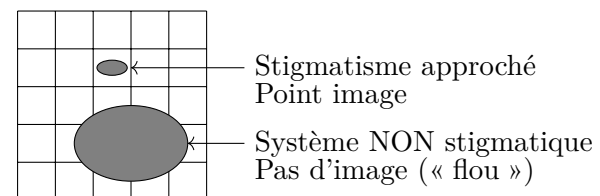


Fig. 2 Illustration du stigmatisme approché avec un capteur numérique : 5×5 pixels.

- Ainsi des rayons émergents du système optique et parvenant sur la même cellule photosensible du capteur peuvent être considérés comme confondus. Il suffit de faire en sorte que les différents rayons issus d'un même point A de l'objet parviennent au voisinage du point A' , avec une distance inférieure à la taille de la cellule photosensible.
- Il est possible de s'affranchir des effets de la diffraction en adoptant une ouverture suffisante pour que le diamètre de la tache de diffraction soit inférieur à la taille des cellules du capteur.
- Restreindre l'étendue des rayons admis dans le système améliore la qualité du stigmatisme, mais s'accompagne d'une perte de luminosité.

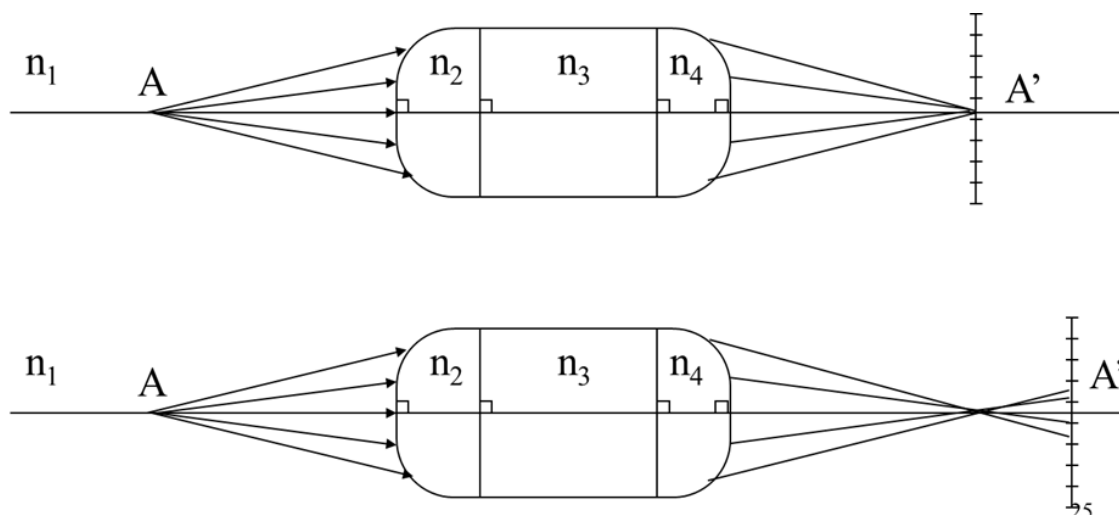


Fig. 3 En haut : Image nette : un seul d'élément photosensible éclairé, un seul point image.

En bas : Image floue : 3 d'éléments photosensibles éclairés, 3 points image.

III.2. Énoncé des conditions de Gauss

Compétences

Conditions de l'approximation de Gauss

*** Capacité : Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences ***

Conditions de Gauss

Les conditions permettant d'obtenir un stigmatisme approché se traduisent de manière particulière dans le cas d'un système centré, on parle de **CONDITIONS DE GAUSS** :

- Les rayons lumineux sont faiblement inclinés par rapport à l'axe optique Δ : l'angle α est petit.
- Les intersections des rayons avec les surfaces réfléchissantes ou les dioptries ont lieu près de l'axe optique.

Les rayons sont dits **paraxiaux** : peu inclinés et peu écartés de l'axe optique.

III.3. Aplanétisme

Une seconde propriété découle des conditions de Gauss pour un objet étendu (mais de petite taille). Un système optique est aplanétique s'il forme de tout objet étendu situé dans un plan perpendiculaire à l'axe optique une image plane perpendiculaire à l'axe optique. Le miroir plan est rigoureusement aplanétique. Dans le cas d'un système centré quelconque, l'aplanétisme est en général approché.

IV. Lentilles minces

Compétences

Lentilles minces dans l'approximation de Gauss

*** Capacité : Définir les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence ***

IV.1. Constitution

Définition

Dioptre sphérique : portion de sphère, de centre C , de rayon R séparant deux milieux d'indice n_1 et n .

Une **lentille sphérique** est une portion de verre optique délimitée par deux dioptries sphériques de même axe de révolution appelé **axe optique**.

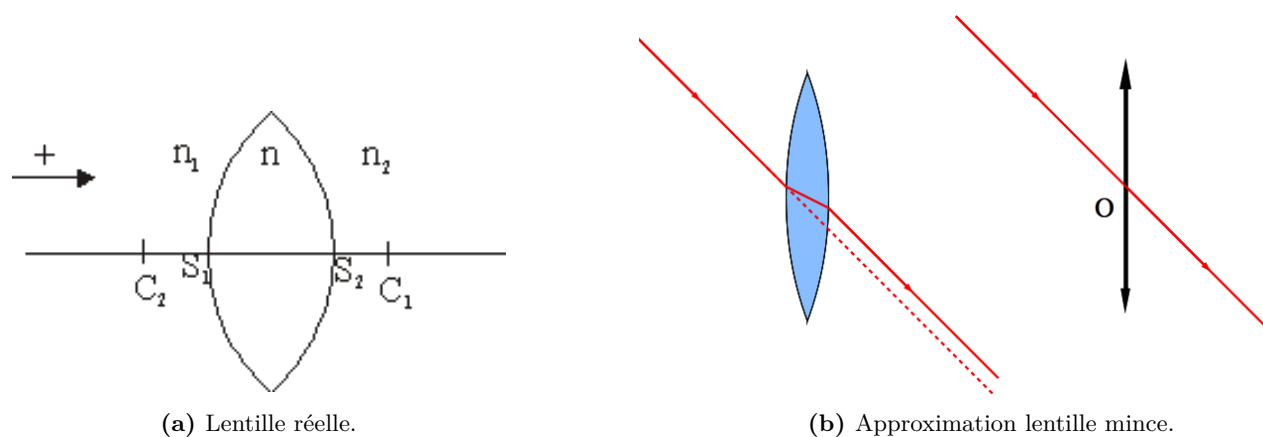


Fig. 4 Lentille réelle et approximation à une lentille mince.

On ne s'intéresse qu'aux **lentilles minces** c'est-à-dire d'épaisseur très faible par rapport aux rayons des deux dioptries sphériques d'une part et par rapport à la distance entre les deux centres d'autre part. On confondra donc les points S_1 et S_2 avec un seul point O appelé **centre optique**.

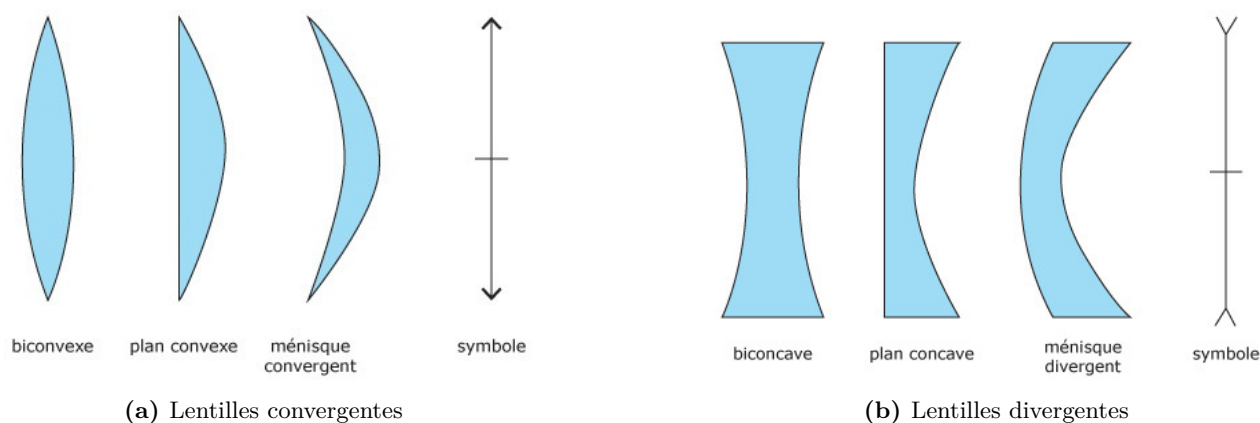


Fig. 5 Lentilles convergente et divergente.

On distingue deux types de lentilles :

- **Lentilles à bords minces convergentes** : un rayon parallèle à l'axe optique sort de la lentille en étant incliné vers l'axe optique ;
- **Lentilles à bords épais divergentes** : un rayon parallèle à l'axe optique sort de la lentille en étant écarté de l'axe optique.

Les rayons lumineux suivent les lois de Descartes : le rayon incident subit deux réfractions par des dioptries assimilables à des plans perpendiculaires à l'axe optique. Dans le modèle de la lentille mince, on néglige le décalage comme indiqué en Fig. 4b.

Le rayon passant par le centre optique d'une lentille mince n'est pas dévié.

IV.2. Foyers

Définition

Foyer image F' : conjugué d'un objet situé à l'infini sur l'axe. Il est réel pour les lentilles convergentes, virtuel pour les lentilles divergentes.

Plan focal image P' : plan perpendiculaire à l'axe optique et contenant F' .

Distance focale image : $f' = \overline{OF'} = \frac{1}{V}$ avec V la vergence (en m^{-1} ou dioptries δ). Elle est positive pour une lentille convergente, négative pour une lentille divergente.

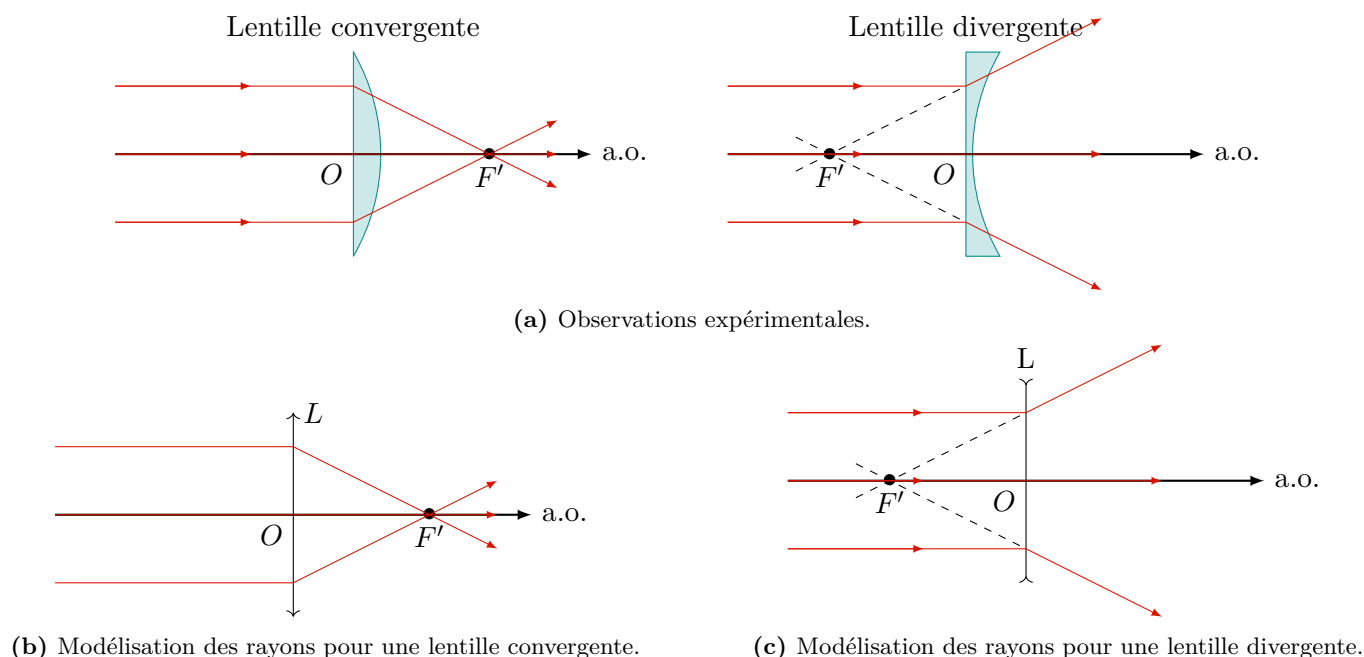


Fig. 6 Observations expérimentales et modélisation des rayons pour des lentilles convergente et divergente.

Définition

Foyer objet F : conjugué d'une image situé à l'infini sur l'axe. Il est réel pour une lentille convergente, virtuel pour une lentille divergente.

Plan focal objet P : plan perpendiculaire à l'axe optique contenant F .

Distance focale objet : $f = \overline{OF} = -f'$.

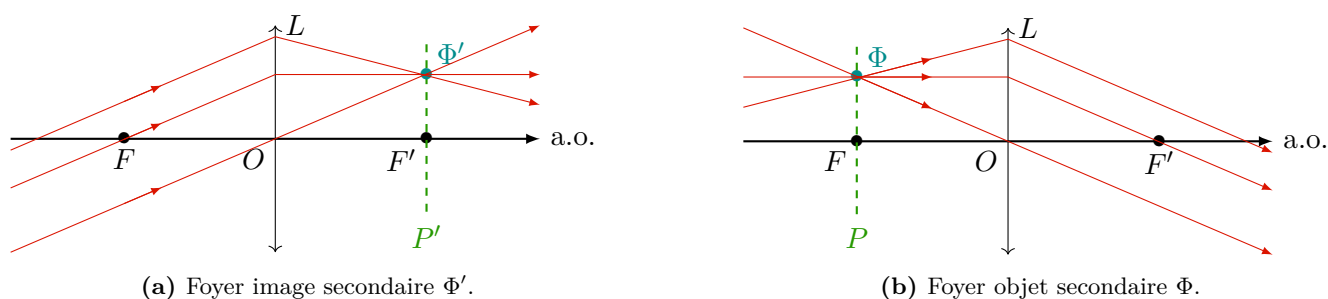


Fig. 7 Foyers secondaires.

Tant que les conditions de Gauss sont respectées, la propriété d'aplanétisme approché est applicable. Les plans focaux image et objet sont les conjugués des plans situés à l'infini.

Définition

Foyers secondaires image : points du plan focal image différents de F' . C'est l'image d'un point objet situé à l'infini hors de l'axe optique.

Foyers secondaires objet : points du plan focal objet différents de F . L'image d'un foyer secondaire objet est situé à l'infini hors de l'axe optique.

IV.3. Construction de l'image d'un objet

Compétences

*** Capacité : Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux, identifier sa nature réelle ou virtuelle ***

✕ Méthode Tracé d'une image ✕

Deux rayons issus de B , parmi les trois rayons particuliers, permettent de déterminer géométriquement la position de B' :

- ① Le rayon passant par O n'est pas dévié,
- ② Le rayon passant par F ressort parallèle à l'axe optique,
- ③ Le rayon arrivant parallèle à l'axe optique passe en F' .

B' se trouve à l'intersection de ces trois rayons, et A' est le projeté orthogonal de B' sur l'axe optique.

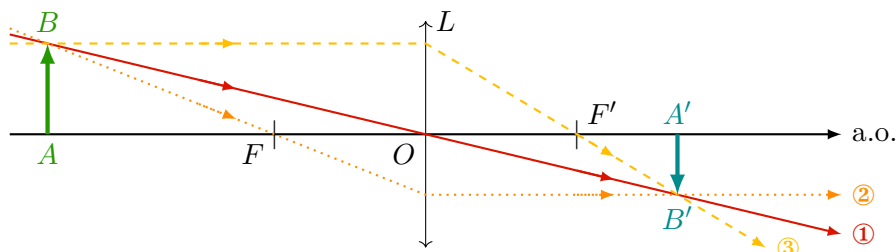


Fig. 8 Constructions des rayons et de l'image $A'B'$ d'un objet AB .

Application 3 : Construction de l'image d'un objet

1. Réaliser les tracés ci-dessous.
2. Préciser pour chaque tracé la nature de l'objet (réel/virtuel) et la nature de l'image (réelle/virtuelle).

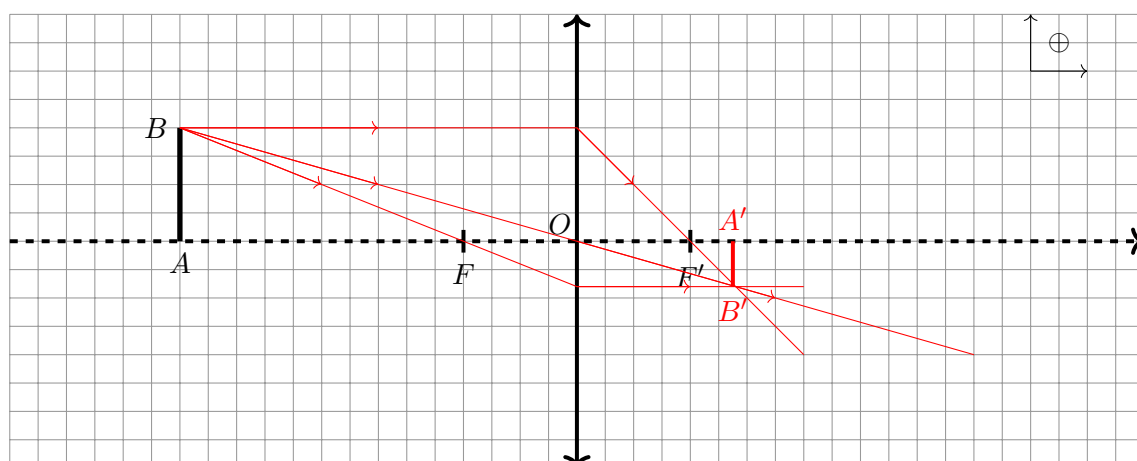
Animation pour s'entraîner aux tracés http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/lentilles/construction_lentille.php



IV.3.a. Cas des lentilles convergentes

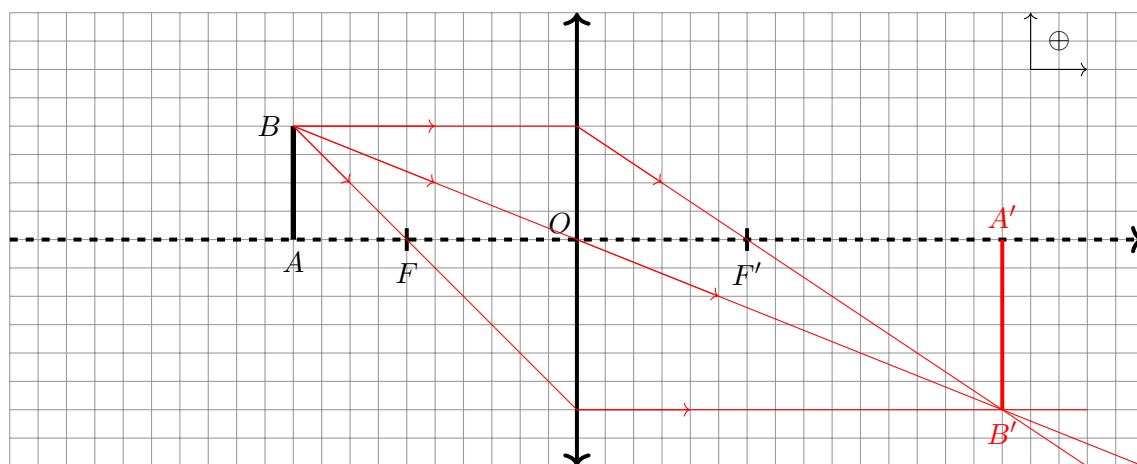
- Objet réel, tel $|\overline{OA}| > 2f'$

- Le rayon incident passant par B et par O n'est pas dévié.
- Le rayon incident passant par B et par F ressort parallèlement à l'axe optique.
- Le rayon incident passant par B et parallèle à l'axe optique ressort en passant par F' .



L'image est plus petite que l'objet, donc $|\gamma| < 1$.
 L'image est renversée, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} < 0$, donc $\gamma < 0$.
 L'objet est réel, donc $\overline{OA} < 0$.
 L'image est réelle, donc $\overline{OA'} > 0$.

- Objet réel, tel $f' < |\overline{OA}| < 2f'$



L'image est plus grande que l'objet, donc $|\gamma| > 1$.

L'image est renversée, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} < 0$, donc $\gamma < 0$.

L'objet est réel, donc $\overline{OA} < 0$.

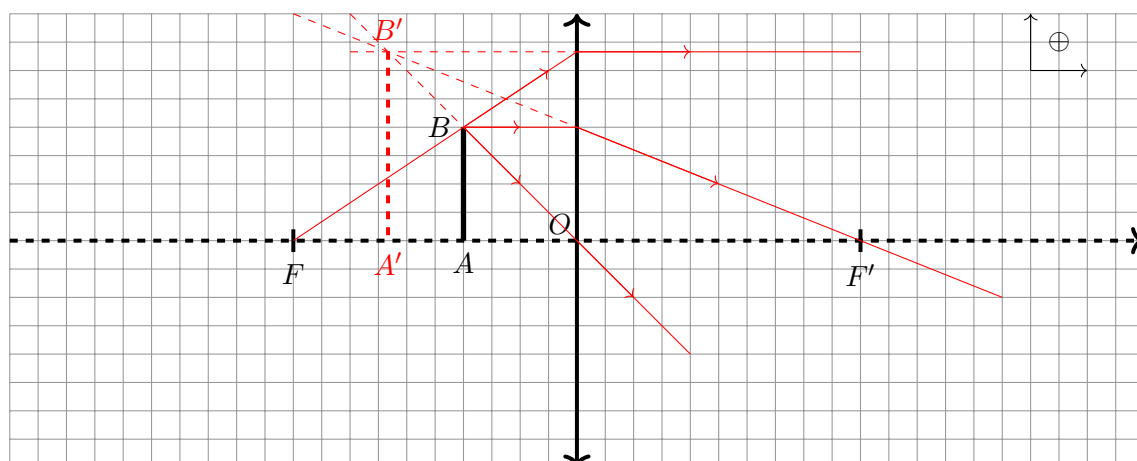
L'image est réelle, donc $\overline{OA'} > 0$.

• Objet réel, tel $|\overline{OA}| < f'$

— Le rayon incident passant par B et par O **n'est pas dévié.**

— Le rayon incident passant par B et par F ressort **parallèlement à l'axe optique.**

— Le rayon incident passant par B et parallèle à l'axe optique ressort **en passant par F' .**



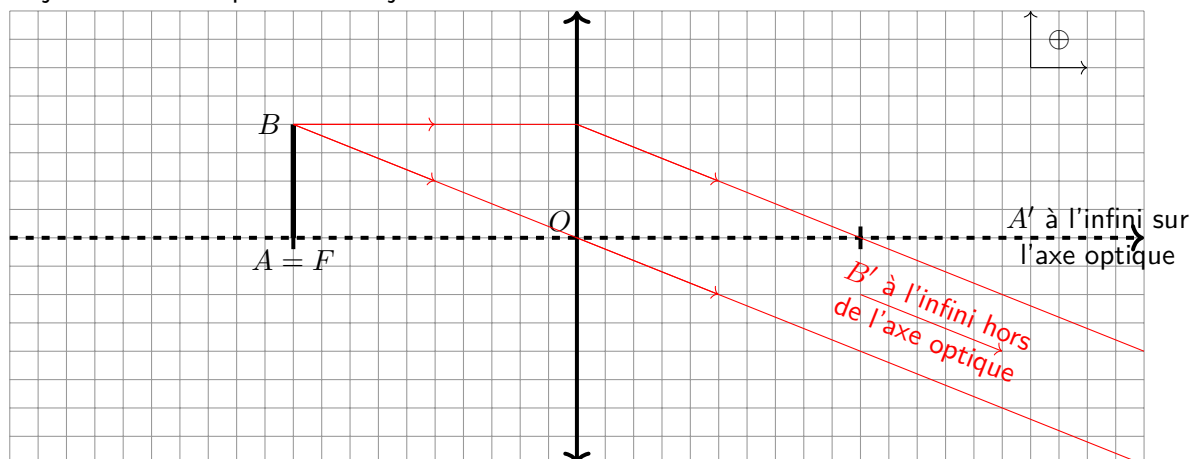
Les 3 rayons émergents divergent et ne se coupent pas. Les prolongements des 3 rayons émergents se coupent en B' , l'image est donc **virtuelle, donc $\overline{OA'} < 0$.**

L'objet est réel, donc $\overline{OA} < 0$.

L'image est plus grande que l'objet, donc $|\gamma| > 1$.

L'image est droite (de même sens que l'objet), $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} > 0$, donc $\gamma > 0$.

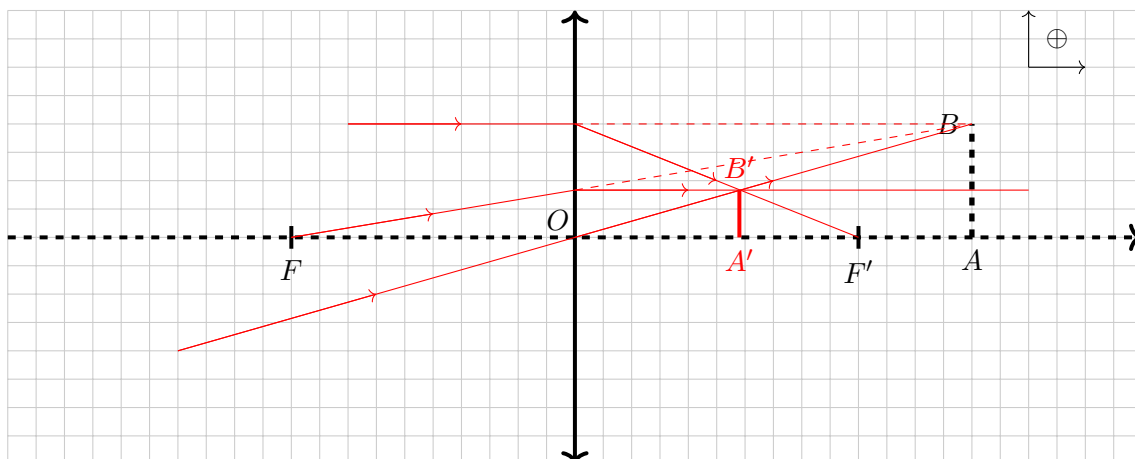
• Objet réel dans le plan focal objet



L'image est située à l'infini, avec A' à l'infini sur l'axe optique et B' à l'infini hors de l'axe optique.

- Objet virtuel

- Le prolongement du rayon incident passant par B et par O **n'est pas dévié.**
- Le prolongement du rayon incident passant par B et par F ressort **parallèlement à l'axe optique.**
- Le prolongement du rayon incident passant par B et parallèle à l'axe optique ressort **en passant par F' .**

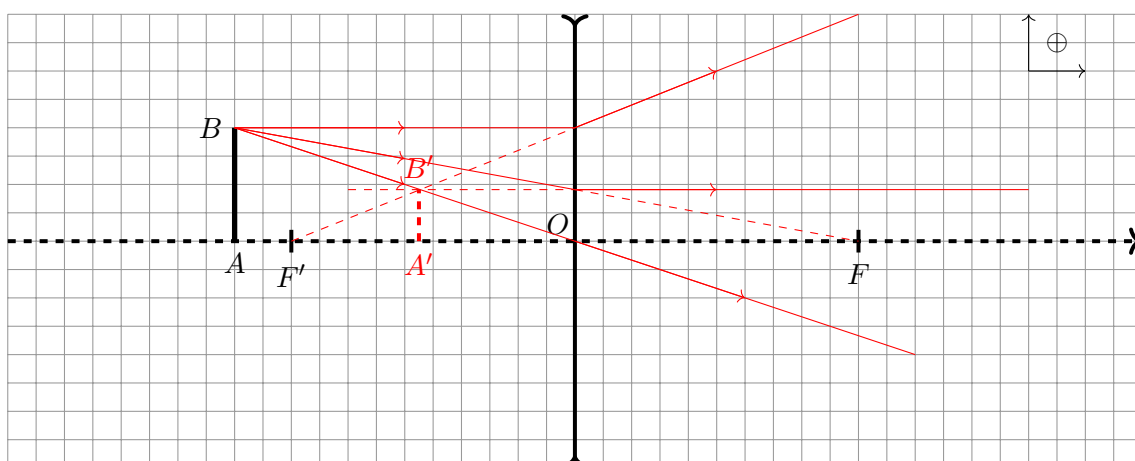


L'image est plus petite que l'objet, donc $|\gamma| < 1$.
 L'image est droite, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} > 0$, donc $\gamma > 0$.
 L'objet est virtuel, donc $\overline{OA} > 0$.
 L'image est réelle, donc $\overline{OA'} > 0$.

IV.3.b. Cas des lentilles divergentes

- Objet réel

- Le rayon incident passant par B et par O **n'est pas dévié.**
- Le rayon incident passant par B et dont le prolongement passe par F ressort **parallèlement à l'axe optique.**
- Le rayon incident passant par B et parallèle à l'axe optique a son prolongement qui passe par F' .



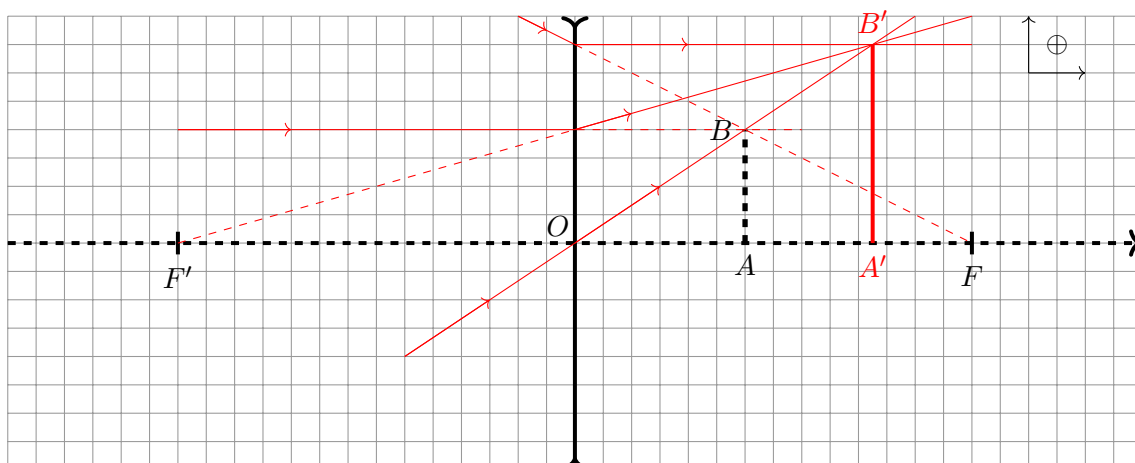
Les 3 rayons émergents ne se coupent pas. Les prolongements des 3 rayons émergents se coupent en B' , l'image est donc **virtuelle**.

L'image est plus petite que l'objet, donc $|\gamma| < 1$.
 L'image est droite, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} > 0$, donc $\gamma > 0$.
 L'objet est réel, donc $\overline{OA} < 0$.
 L'image est virtuelle, donc $\overline{OA'} < 0$.

- Objet virtuel $|\overline{OA}| < |f'|$

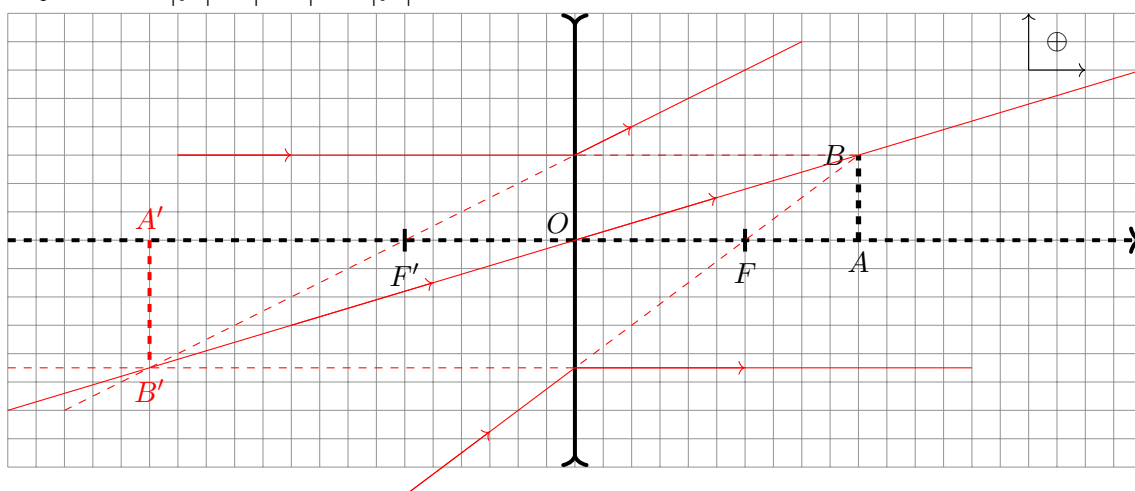
- Le rayon incident passant par B et par O **n'est pas dévié.**

- Le rayon incident dont le prolongement passe par B et par F , ressort **parallèlement à l'axe optique.**
- Le rayon incident parallèle à l'axe optique et dont le prolongement passe par B ressort **en passant par F' .**



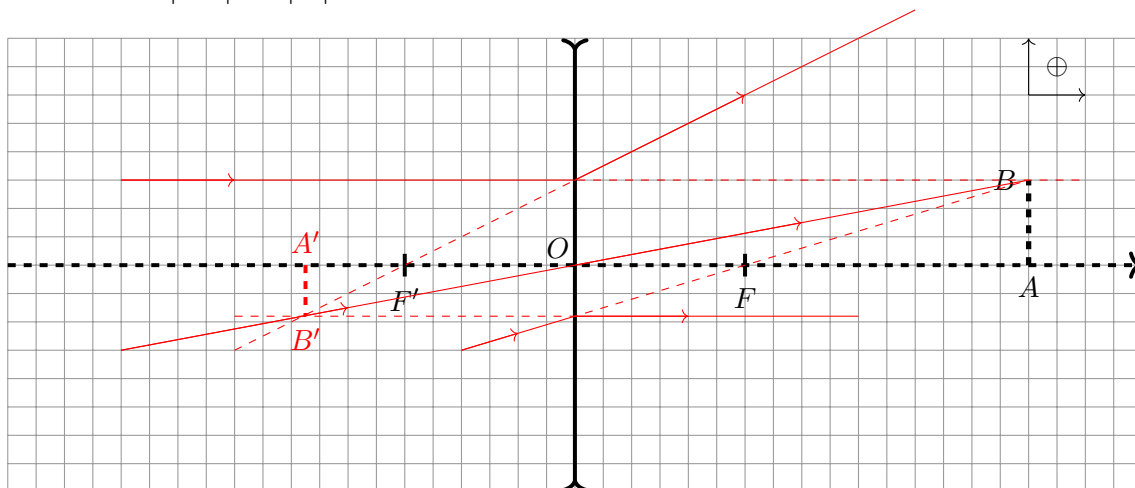
L'image est plus grande que l'objet, donc $|\gamma| > 1$.
 L'image est droite, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} > 0$, donc $\gamma > 0$.
 L'objet est virtuel, donc $\overline{OA} > 0$.
 L'image est réelle, donc $\overline{OA'} > 0$.

- Objet virtuel $|f'| < |\overline{OA}| < 2|f'|$



L'image est plus grande que l'objet, donc $|\gamma| > 1$.
 L'image est renversée, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} < 0$, donc $\gamma < 0$.
 L'objet est virtuel, donc $\overline{OA} > 0$.
 L'image est virtuelle, donc $\overline{OA'} < 0$.

- Objet virtuel $|\overline{OA}| > 2|f'|$



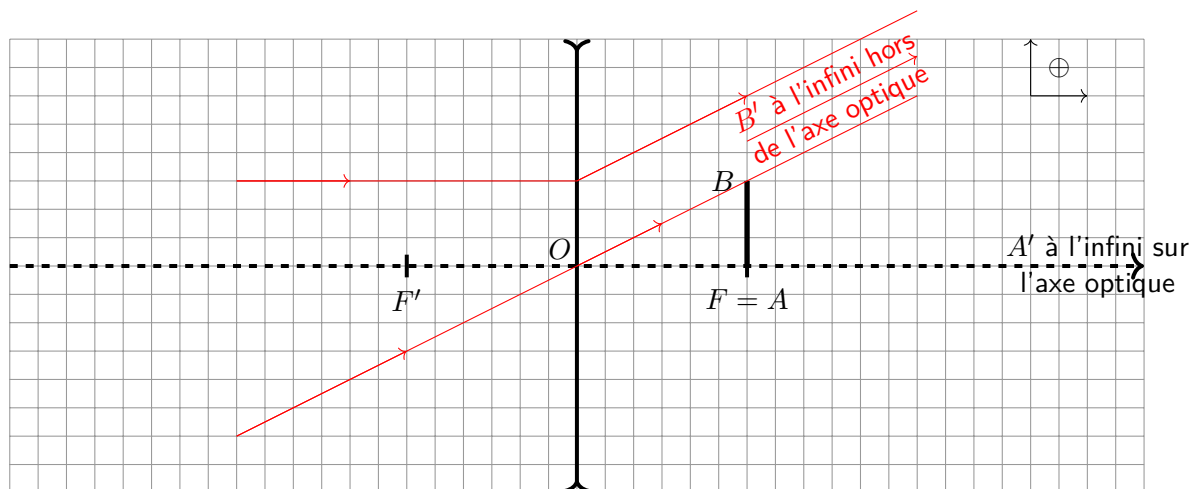
L'image est plus petite que l'objet, donc $|\gamma| < 1$.

L'image est renversée, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} < 0$, donc $\gamma < 0$.

L'objet est virtuel, donc $\overline{OA} > 0$.

L'image est virtuelle, donc $\overline{OA'} < 0$.

- Objet virtuel dans le plan focal objet



L'image est située **à l'infini, avec A' à l'infini sur l'axe optique et B' à l'infini hors de l'axe optique.**

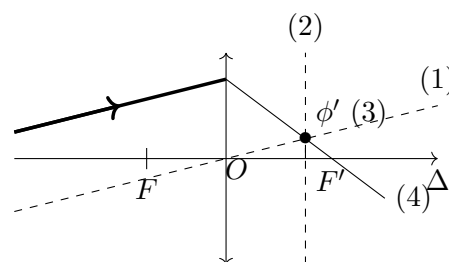
IV.4. Construction d'un rayon

✕ Méthode Construction du cheminement d'un rayon incident quelconque ✕

Si on a un rayon incident dont on souhaite tracer le rayon émergent :

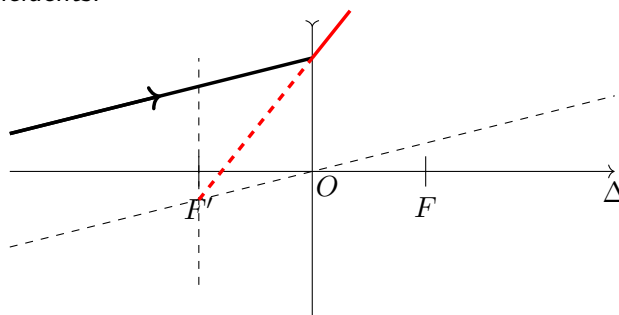
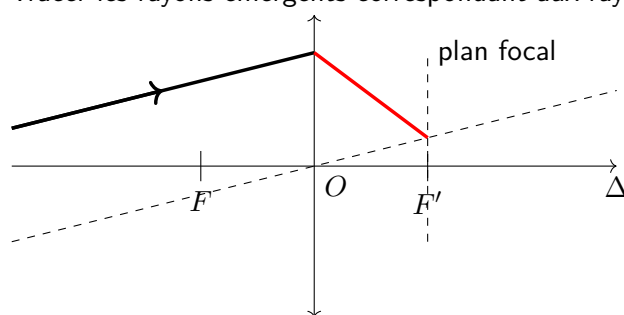
1. Tracer un rayon auxiliaire, en pointillés, parallèle au rayon incident inconnu, passant par O . Ce rayon auxiliaire n'est pas dévié.
2. Tracer en pointillés le plan focal image (plan transverse passant par F').
3. Repérer l'intersection entre le rayon auxiliaire et le plan focal image, ce point est un foyer image secondaire ϕ' .
4. Le rayon incident inconnu et le rayon auxiliaire étant parallèle entre eux ils se croisent dans le plan focal image : au point ϕ' repéré précédemment.

Il reste à tracer le rayon émergent issu du rayon incident passant par ce point ϕ' .



Application 4 : Tracé de rayons émergents

Tracer les rayons émergents correspondant aux rayons incidents.

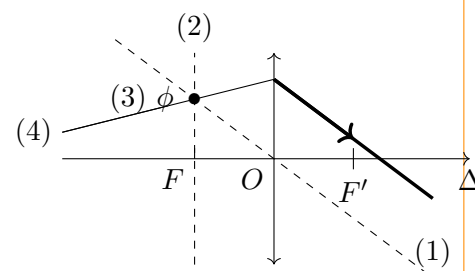


✕ Méthode Construction du cheminement d'un rayon émergent quelconque ✕

Si on a un rayon émergent dont on souhaite tracer le rayon incident qui lui a donné naissance :

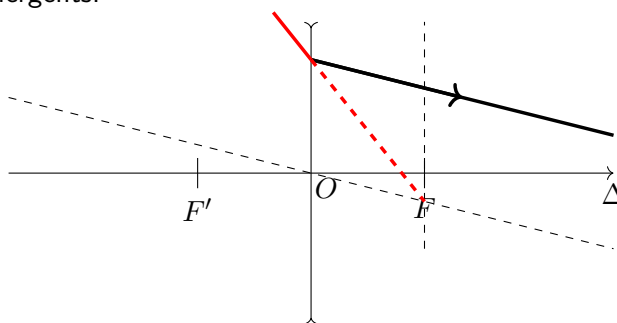
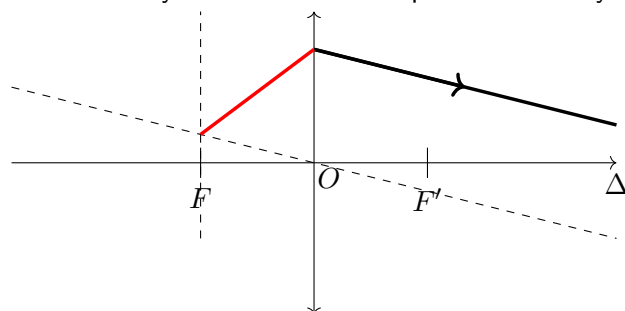
1. Tracer un rayon auxiliaire, en pointillés, parallèle au rayon émergent inconnu, passant par O . Ce rayon auxiliaire n'est pas dévié.
2. Tracer en pointillés le plan focal objet (plan transverse passant par F).
3. Repérer l'intersection entre le rayon auxiliaire et le plan focal objet, ce point est un foyer objet secondaire ϕ .
4. Le rayon émergent inconnu et le rayon auxiliaire émergent de la lentille parallèlement, donc ils proviennent d'un même plan focal objet : le foyer secondaire objet ϕ .

Il reste à tracer le rayon incident passant par ce point objet ϕ qui donne le rayon émergent.



Application 5 : Tracé de rayons incidents

Tracer les rayons incidents correspondant aux rayons émergents.



IV.5. Relation de conjugaison

Compétences

*** Capacité : Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et de Newton.

Définition

Relation de conjugaison : relation qui lie la position de l'image à la position de l'objet.

Grandeur algébrique : elle est notée $\overline{OA}$. La grandeur est positive si elle est dans le sens de la propagation de la lumière, négative sinon.

Grandissement γ : c'est le rapport des tailles de l'objet et de l'image. C'est aussi une grandeur algébrique, c'est-à-dire qu'un objet perpendiculaire à l'axe optique, sera compté positivement s'il est orienté vers le haut, négativement sinon.

Grandissement de Descartes

On montre (en utilisant le théorème de Thalès pour les triangles semblables OAB et $OA'B'$) que

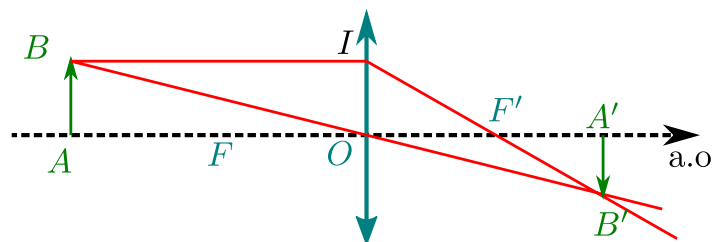
$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}.$$

Grandissement de Newton

$$\gamma = \frac{\overline{F'A'}}{-f'} = \frac{f'}{\overline{FA}}$$

Remarque

γ est appelé le **grandissement de la lentille**. Il est positif si l'image est droite (dans le même sens que l'objet sur l'axe perpendiculaire à l'axe optique). Il est négatif si l'image est renversée.

IV.5.a. Relation de Descartes**Démonstration :** Relation de Descartes

Le grandissement vaut $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$. Or $\overline{OI} = \overline{AB}$ et $\overline{OF'} = f'$.

Par ailleurs, considérant les triangles $OF'I$ et $A'F'B'$, le théorème de Thalès implique

$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{A'F'}} = \frac{\overline{OI}}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{AB}}{f'}$$

donc

$$\begin{aligned} \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} &= \frac{\overline{A'F'}}{f'}, \\ &= \frac{\overline{A'O} + \overline{OF'}}{f'} \\ &= \frac{-\overline{OA'} + f'}{f'} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \end{aligned}$$

Soit en divisant par $\overline{OA'}$,

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

DONC

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

(1)

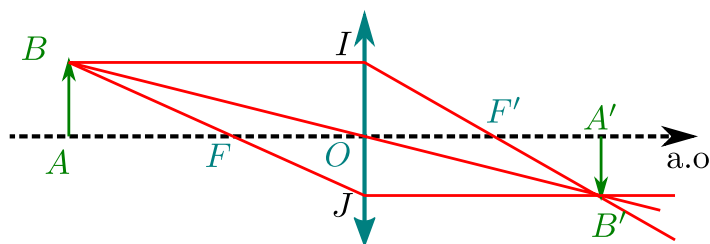
□

Relation de Descartes

La relation de conjugaison pour une lentille de distance focale f' avec origine au centre optique, appelée **relation de Descartes** est :

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

IV.5.b. Relation de Newton**Démonstration :** Relation de Newton



Par application du théorème de Thalès dans les triangles $OF'I$ et $A'F'B'$ d'une part, et les triangles ABF et OJF d'autre part, on a

$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{OI}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} \quad \text{et} \quad \frac{\overline{OJ}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}}.$$

Or $\overline{OI} = \overline{AB}$ et $\overline{OJ} = \overline{A'B'}$. Le grandissement γ devient alors

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}}$$

D'où

$$\overline{F'A'} \times \overline{FA} = \overline{F'O} \times \overline{FO} = -f'^2$$

□

Relation de Newton

La relation de conjugaison avec origine aux foyers, appelée **relation de Newton** est :

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

Remarque

La relation de Newton est utile dans le cas de l'appareil photographique en particulier.

IV.6. Projection de l'image d'un objet réel

Compétences

Capacité : Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.

Animation

Animation : Méthode de Bessel - Condition $D > 4f'$ http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/focometrie/bessel.php



✕ Méthode Établir la condition $D \geq 4f'$ pour la réalisation d'une projection ✕

On souhaite déterminer une condition sur la distance D qui sépare un objet et l'écran sur lequel on souhaite projeter l'image de cet objet à l'aide d'une lentille convergente de distance focale f' .

1. Faire un schéma de la situation et poser $D = \overline{AA'}$.
2. Appliquer la relation de conjugaison de Descartes.
3. Exprimer $\overline{OA'}$ en fonction de $\overline{OA}$ et D : $\overline{OA'} = \overline{OA} + D$.
4. Travailler l'équation précédente pour obtenir une équation du deuxième degré vérifiée par $\overline{OA}$:

$$\overline{OA}^2 + D\overline{OA} + Df' = 0$$

5. En exploitant le fait que discriminant de l'équation précédente doit être positif pour obtenir des solutions

réelles, obtenir la condition reliant D et f' pour réaliser une projection.

Démonstration : Considérons le montage suivant :

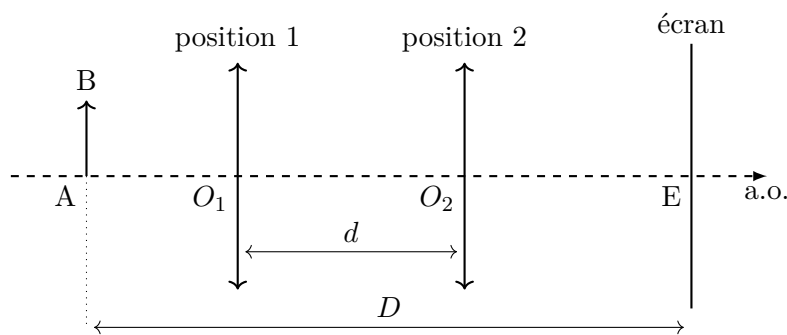


Fig. 9 Dispositif expérimental pour la méthode de Bessel

Les points A et A' sont deux points réels conjugués par la lentille L de distance focale f' . On peut donc utiliser la relation de conjugaison de Descartes :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA}.$$

En notant $D = \overline{AA'}$, et $p = \overline{OA}$, il vient

$$D = \overline{AO} + \overline{OA'} = \frac{\overline{AO} \cdot f' + \overline{AO} \cdot \overline{OA} + f' \cdot \overline{OA}}{f' + \overline{OA}} \quad (2)$$

$$= \frac{-p^2}{p + f'} \quad \text{avec} \quad p = \overline{OA} \quad (3)$$

$$\text{soit} \quad p^2 + Dp + Df' = 0. \quad (4)$$

Les racines de ce polynôme fournissent les positions p_1 et p_2 de la lentille pour lesquelles l'image est nette sur l'écran. Les solutions sont

$$\begin{cases} p_1 = \frac{-D - \sqrt{D(D - 4f')}}{2} \\ p_2 = \frac{-D + \sqrt{D(D - 4f')}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

si et seulement si $\Delta = D(D - 4f') \geq 0$ soit

$$D \geq 4f'. \quad (6)$$

□

V. Systèmes optiques réels

V.1. L'œil

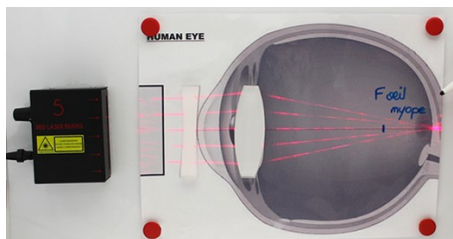
Compétences

L'œil. Punctum proximum, punctum remotum.

*** Capacité : Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur plan fixe. Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation ***

Expérience de cours

S'appuyer sur le modèle de l'œil du kit optique Twinse. (Œil + défauts + corrections).



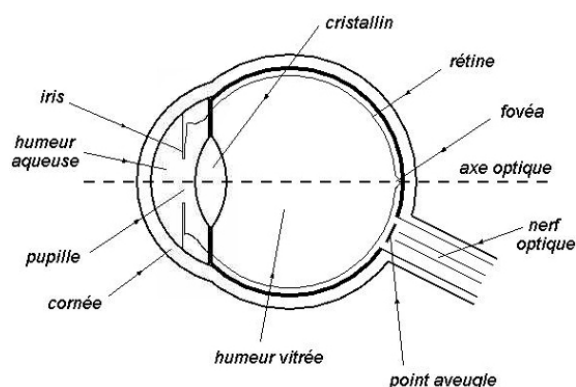
V.1.a. Modélisation

L'œil est décrit comme un ensemble de milieux transparents d'indices différents. La lumière incidente traverse successivement :

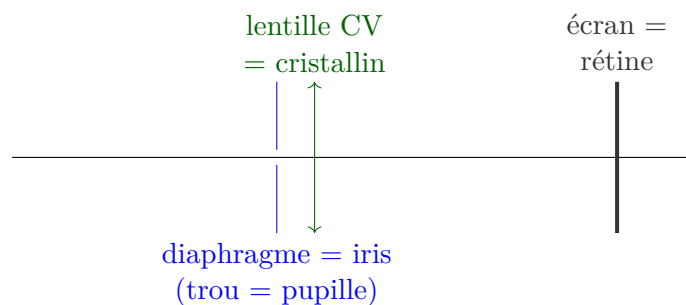
- L'**iris** qui délimite un **diaphragme**, la pupille, dont le diamètre varie en fonction des conditions de vision, notamment de la luminosité.
- La cornée, définissant un dioptre entre l'air et l'humeur aqueuse d'indice voisin de 1,336.
- Le **cristallin** assimilable à une **lentille** de propriétés variables (géométrie et indice) par l'action des muscles ciliaires.
- Un milieu liquide, appelé humeur vitrée d'indice voisin de 1,336.

Le **capteur de lumière** est la **rétine**, constituée de cellules diverses, cônes et bâtonnets, contribuant à la perception des couleurs et jouant des rôles différents selon que la vision est diurne ou nocturne.

Le nerf optique transmet l'information au cerveau.



À retenir ♥ **Modélisation optique de l'œil**



V.1.b. Limite de résolution angulaire

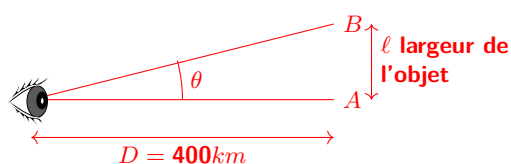
La rétine ayant une structure discontinue, puisque les cellules photosensibles qui la composent possèdent une taille non nulle, la capacité de l'œil à distinguer des rayons de directions voisines a une limite. On parle de **limite de résolution angulaire**. La valeur précise de cette limite dépend de l'individu (chacun se voit attribuer une acuité visuelle lors d'un examen ophtalmologique), du caractère nocturne ou diurne et de multiples autres facteurs. De plus, la rétine n'est pas homogène : le maximum d'acuité visuelle est obtenu lorsque les rayons sont proches de l'axe, au niveau de la tache jaune (ou fovea).

À retenir ♥ **Limite de résolution angulaire**

Ordres de grandeur : Du fait de la structure discontinue de la rétine, la résolution angulaire de l'œil est limitée, l'ordre de grandeur pour l'œil humain est 3×10^{-4} rad, ce qui correspondant à 1 minute d'angle (1/60 degré).

Application 6 : Depuis l'ISS

Quelle est la taille du plus petit objet distinguable par un astronaute à bord de l'ISS (située à environ 400 km de la terre) ?



$$\tan(\theta) = \frac{\ell}{D}$$

L'objet est distingué si $\theta > \theta_\ell = 1'$, soit $\ell > D \tan(\theta)$

Avec $\theta = \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{180} \text{ rad} \ll 1 \text{ rad}$

Ainsi $\ell > D\theta = 116 \text{ m}$

V.1.c. Rôle des constituants

On considère un unique œil, fixe et sans défaut, observant un objet situé sur son axe de vision.

Observation à l'infini : Lors de l'observation d'un objet à l'infini, l'œil normal forme l'image sur la rétine. On parle d'une vision sans accommodation.

Observation à distance finie : Si l'objet se rapproche, l'image formée n'est plus nette : les muscles ciliaires agissent alors sur le cristallin pour effectuer une mise au point : on parle d'accommodation. La vergence de la lentille est alors modifiée jusqu'à ce que l'image soit à nouveau située sur la rétine. Le foyer F' est donc avancé par rapport à la rétine, l'ensemble cornée cristallin devient plus convergent. **Pour permettre la vision d'un objet à distance finie, l'œil normal doit accommoder. La vergence du cristallin augmente jusqu'à ce que l'image se forme sur la rétine.**

Limite d'accommodation : Cette faculté d'accommodation possède une limite : l'élasticité du cristallin et la capacité d'action des muscles doivent être pris en compte pour déterminer quelle distance limite de l'objet est compatible avec la mise au point. On définit un point sur l'axe : le **punctum proximum (P.P.)**, observable avec une vision nette. La distance limite d'accommodation $d_m = OPP$ dépend de multiples facteurs notamment de l'âge de l'individu.

Ordres de grandeur : Punctum proximum : on retiendra une valeur de l'ordre de 25 cm, qui correspond à une moyenne pour une personne adulte.

À retenir Plage d'accommodation

- L'œil ne voit un objet net que si son image se forme sur la rétine.
- L'œil emmétrope ("normal") voit un objet net que si l'objet se trouve entre le **punctum proximum** de l'ordre de 25 cm et l'infini.

Pour aller plus loin :

V.1.d. Quelques défauts de vision (HP)

Animation

Fonctionnement œil + correction <https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/instruments/correction.php>

Image visualisée avec et sans correction http://proftr.fr/AccesLibre/Simulateurs_en_ligne/simulOPTIQUE/simulOPTIQUE.html



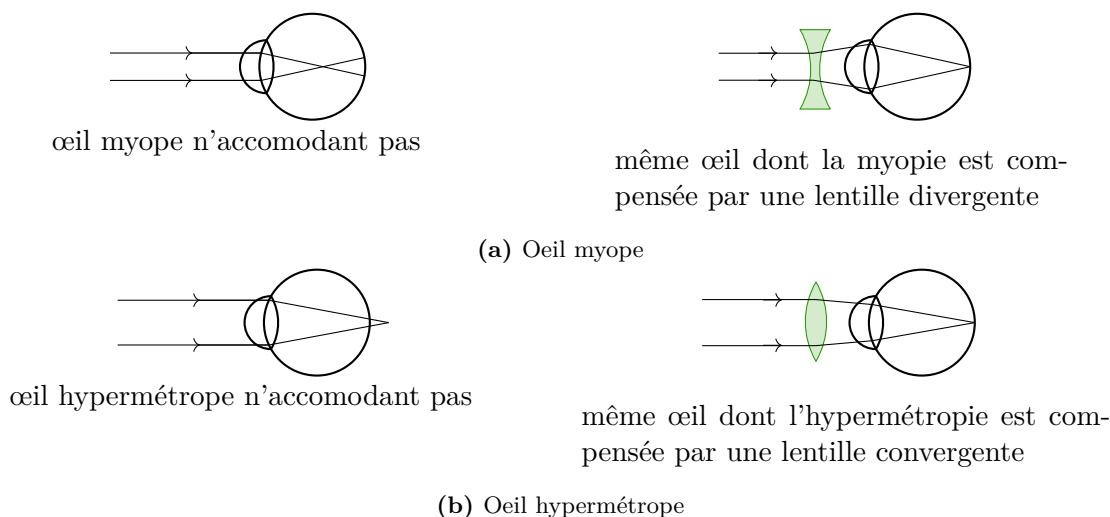


Fig. 10 Défaut et correction adaptée pour des oeils myope et hypermétrope.

L'œil norme ou emmétrope, considéré ici présente un foyer image situé exactement sur la rétine, en l'absence d'accommodation. Son champ de vision s'étend donc de la distance d_m à l'infini. Une proportion importante de la population présente un défaut de vision comme l'hypermétropie ou la myopie.

- **L'œil myope** : En l'absence d'accommodation, un œil myope non corrigé a son foyer situé devant la rétine : il lui est donc impossible d'effectuer la mise au point sur un objet lointain. On appelle *punctum remotum* PR ou point le plus éloigné, le point sur l'axe qui permet à un œil myope une observation sans accommodation. Le conjugué du PR est situé sur la rétine lorsque l'œil est au repos. En revanche, lors de l'accommodation maximale, un œil myope parvient à observer un objet à courte distance : le PP peut être très près de l'œil. C'est grâce à une lentille divergente que l'on corrige la myopie.
- **L'œil hypermétrope** : L'œil hypermétrope lorsqu'il n'accommode pas, a son foyer situé derrière la rétine. De ce fait, pour observer un objet à l'infini, une accommodation est nécessaire (cet effort provoque une fatigue). Une autre conséquence est l'accroissement de la distance d_m . En pratique on pallie cette insuffisance de convergence en plaçant une lentille convergente devant l'œil. L'association lentille cornée cristallin doit être telle qu'en l'absence d'accommodation, le foyer image soit situé sur la rétine.

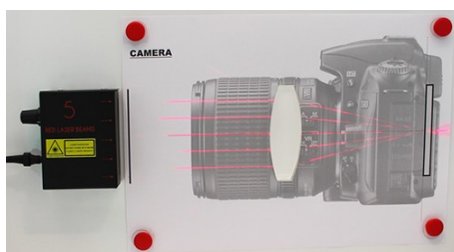
V.2. L'appareil photo

Compétences

L'appareil photographique.

*** Capacité : Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur. Étudier l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image ***

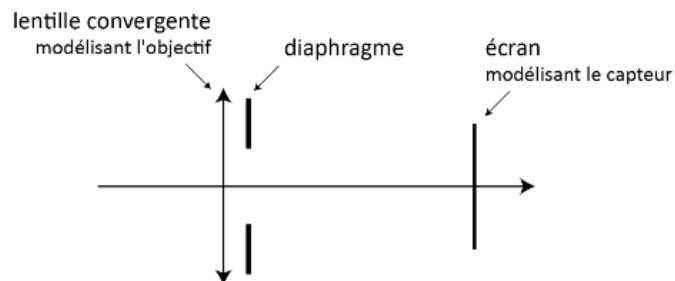
Expérience de cours



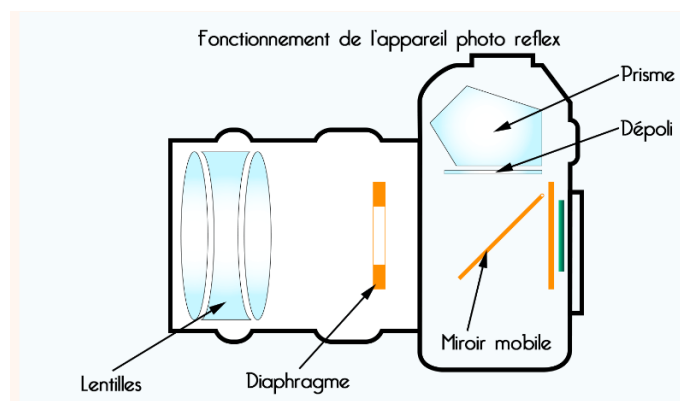
S'appuyer sur le kit optique Twinse.

V.2.a. Constitution

À retenir Modélisation d'un appareil photo



(a) Appareil photo argentique



(b) Appareil photo numérique

On utilise une lentille mince : l'objectif afin de former sur un capteur (anciennement pellicule, désormais capteur CCD) une image nette d'un objet réel AB . On peut faire varier la distance objectif-pellicule afin de réaliser la mise au point.

Dans la réalité, l'objectif est un ensemble de lentilles minces permettant les éventuelles distorsions ou aberrations. Dans notre modèle de l'appareil photographique : **on considère une lentille mince unique dans les conditions de Gauss.**

On remarque que l'image est renversée, mais un système de miroirs (prisme de visée) permet d'obtenir à travers le viseur l'image droite.

Le **diaphragme d'ouverture** permet de contrôler la quantité de lumière entrant dans le système.

L'obturateur permet de contrôler le temps de pose, c'est-à-dire le temps d'exposition à la lumière.

Animation

Fonctionnement général d'un appareil photo https://www.pcc1.fr/physique_chimie_college_lycee/lycee/premiere_1S/mise_au_point_appareil_photo_flash.htm



V.2.b. Profondeur de champ

Compétences

Capacité : Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné.

Sur une photographie, tous les points ne sont pas nets : pourquoi ?

Définition

La **profondeur de champ** est la distance entre deux points objet extrêmes de l'axe optique dont les images sont nettes sur la photo.

Lorsqu'on fait la mise au point de l'appareil sur un point de l'objet, son image se forme sur le film/capteur (on conjugue l'objet et le capteur par l'objectif) : chaque élément ponctuel de l'objet est restitué par un point image. En photo, le critère de netteté est donné par la résolution du capteur, ie la taille des cellules constituant le capteur. Ainsi si un point objet n'est pas conjugué au capteur, son image sur ce dernier sera une tâche, alors l'objet sera vu flou (cf. Fig. 13 à gauche). Si toutefois cette tâche est plus petite que la taille e des cellules constituant le capteur (on peut contrôler la taille de cette tâche grâce à du diaphragme d'ouverture), alors elle sera perçue comme un point et on aura une image nette (Fig. 13). La profondeur de champ est alors directement contrôlée par le **diaphragme d'ouverture**.

Des objets, placés un peu devant ou derrière le plan de mise au point ne formeront pas des images nettes sur le capteur si leur tâche de dimension δ est plus grande que e (diamètre du cercle de confusion). La netteté ne s'étendra alors pas devant et derrière le plan de netteté. On est hors de la profondeur de champ.

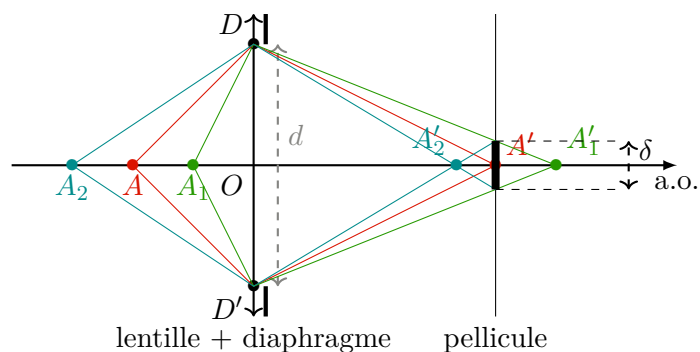


Fig. 12 Tracé des rayons extrêmes nets sur l'image.

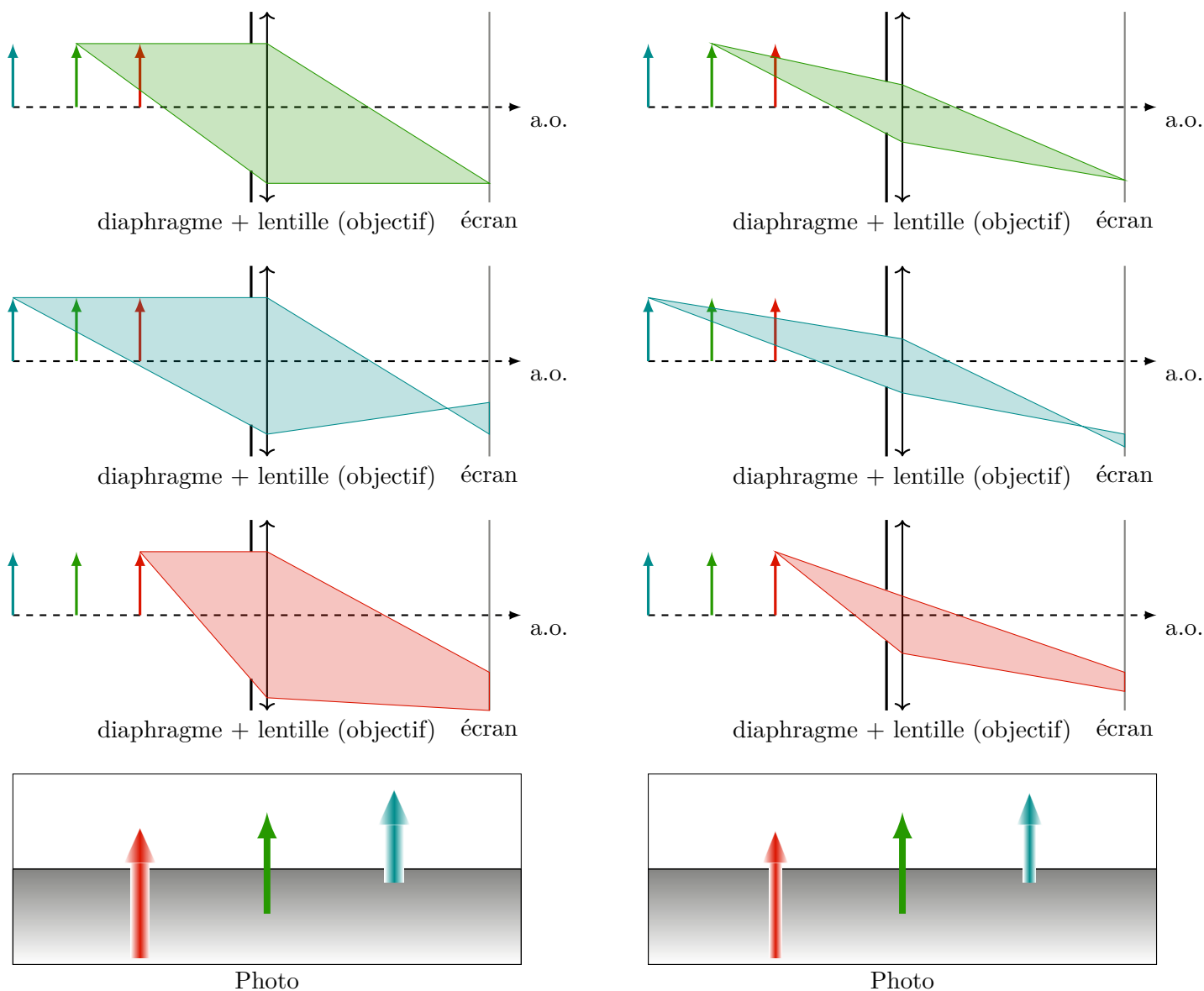


Fig. 13 Netteté sur l'image.

Pour aller plus loin :

Synthèse

Pour augmenter la profondeur de champ, il faut fermer le diaphragme. Cela revient à sélectionner des rayons peu écartés de l'axe optique et peu inclinés : on se place donc dans les conditions de Gauss et le système est stigmatique approché.

Nombre d'ouverture Sur les appareils, l'ouverture d est indiquée par « f/nombre », par exemple $f/3.5$ ou $f/22$, où les valeurs 3.5 ou 22 sont celle du nombre d'ouverture. Cette quantité sans unité notée N correspond donc au rapport $f/N = d$ soit $N = f/d$ caractérisant la profondeur de champ.

Afin de modifier la profondeur de champ, en tant qu'expérimentateur, nous pouvons également jouer sur la distance objet-objectif. Lorsque le point A s'approche de l'objectif, A' s'éloigne de l'objectif, donc δ augmente, la profondeur de champ diminue.

Synthèse

Pour augmenter la profondeur de champ, il faut éloigner l'objet de l'appareil photo. Cela revient à sélectionner des rayons peu écartés de l'axe optique et peu inclinés : on se place dans les conditions de Gauss et le système est stigmatique approché.

Influence de la focale f' Sur un appareil photographique, la distance focale f' de l'objectif peut être modifiée.

On fixe la position objectif-objet mis au point (rouge) pour les deux tracés ainsi que la taille du diaphragme d et la taille du grain du récepteur e . On fait le tracé rouge puis les vert et bleu en « remontant » la propagation de la lumière : on impose les rayons à droite de la lentille et on construit les rayons incidents correspondants pour trouver PDC.

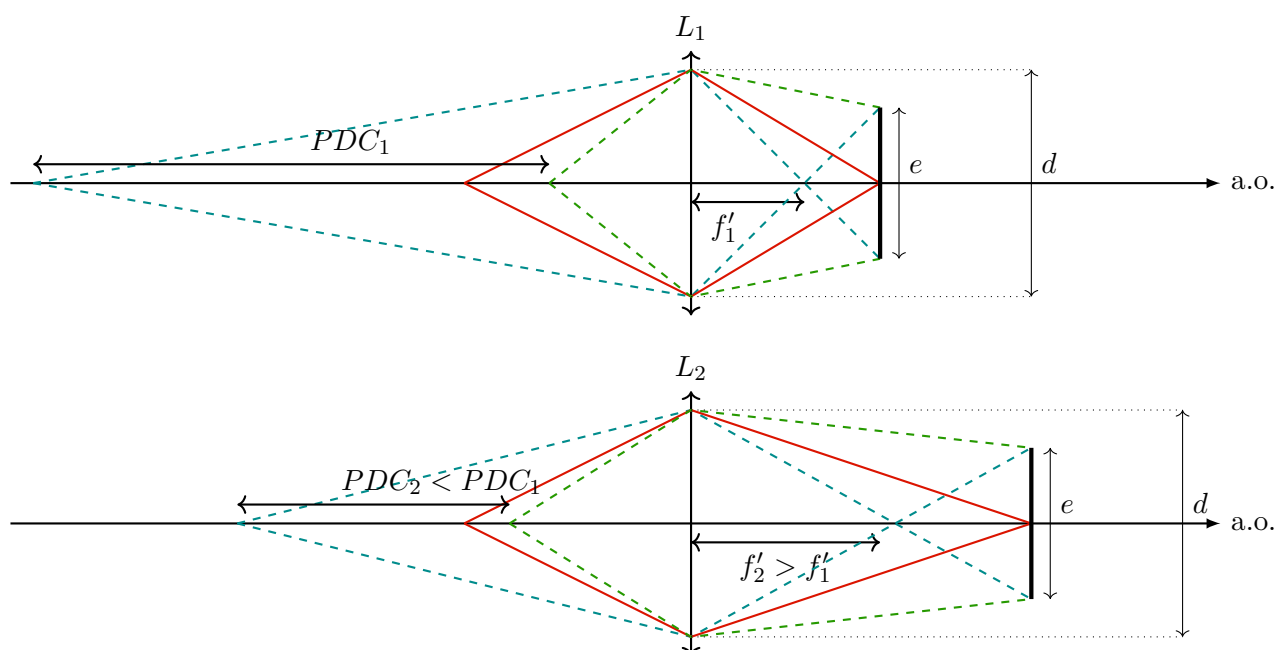


Fig. 14 Profondeur de champ pour deux lentilles L_1 et L_2 de focales f'_1 et $f'_2 > f'_1$. On constate que $PDC_1 < PDC_2$.

Synthèse

Pour augmenter la profondeur de champ, il faut diminuer la distance focale de l'objectif de l'appareil photo.

V.2.c. Paramètres influençant la formation de l'image

Sur un zoom (objectif à focale variable) portant une inscription du type 18-55mm et 1:3.5-5.6, le « 1:3.5-5.6 » représente en fait l'ouverture maximale de cet objectif à ses extrêmes de longueur focale. L'objectif peut donc ouvrir au maximum à $f/3.5$ à 18 mm ($d = f/N = 5,1$ mm) et au maximum à $f/5.6$ à 55 mm ($d = f/N = 9,8$ mm). En effet, sur les objectifs courants, l'ouverture maximale change avec la focale.

On constate que même si d varie, la quantité de lumière reçue semble la même. Peut-être que l'indication 1/1000, 1/250, ... nous renseigne aussi sur l'exposition, c'est-à-dire l'action du rayonnement lumineux sur le capteur (ou sur la pellicule).

L'exposition est influencée par 3 paramètres :

- La sensibilité ISO : c'est la sensibilité du capteur (ou de la pellicule) à la lumière.,
- L'ouverture du diaphragme : c'est le diamètre d'ouverture du diaphragme au déclenchement,
- La vitesse d'obturation : c'est le temps d'ouverture du diaphragme au déclenchement.



Fig. 15 Influence du nombre d'ouverture N avec F/N .

Quel est l'effet de ces paramètres ?

- Quand on augmente la sensibilité, en toute logique il y a plus de lumière captée,
- Quand on augmente l'ouverture, plus de lumière peut rentrer. Le diaphragme sera ouvert à un plus grand diamètre au déclenchement,
- Quand on augmente le temps d'ouverture, plus de lumière peut rentrer (attention pour augmenter le temps d'ouverture, on diminue la vitesse d'obturation, car plus la vitesse est faible, plus le temps est long).

Synthèse

L'augmentation de la **sensibilité**, de l'**ouverture** ou du **temps** fait rentrer plus de lumière, et donc augmente l'exposition.

Ainsi, si d augmente mais que la vitesse d'obturation est plus élevée (temps plus court), alors l'exposition peut être la même. La durée d'ouverture de l'obturateur est le temps de pose. Les valeurs habituelles en secondes sont $\frac{1}{500}; \frac{1}{250}; \frac{1}{125}; \frac{1}{60}; \frac{1}{30}; \frac{1}{15}; \frac{1}{8}; \frac{1}{4}; \frac{1}{2}; 1$. Ce sont en fait les inverses de ces valeurs qui apparaissent sur la bague de réglage de l'appareil photo. Par exemple l'indication 125 correspond à une durée d'exposition de $\frac{1}{125}$ s.

V.3. La lunette astronomique)

Compétences

Système optique à plusieurs lentilles.

Un instrument optique est une association de plusieurs lentilles et/ou miroirs. **Il doit délivrer une image $A'B'$ à l'infini** afin que l'œil emmétrope l'observe sans fatigue. Cet instrument peut permettre d'observer un objet à l'infini (il est alors afocal : lunette astronomique par ex) ou à distance finie (viseur, microscope).

Plaçons nous dans le cas d'une lunette, destinée à l'observation d'objets lointains : Elle permet d'observer un objet à l'infini et en donne une image à l'infini (afocale).

- Lunette de Galilée permettant l'observation astronomique
- Lunette terrestre : observation d'animaux lointains... etc
- Visée de faisceaux parallèles (lunette d'un goniomètre).

Elle est constituée de deux lentilles :

- l'**objectif (coté objet)** est nécessairement une lentille convergente ;
- l'**oculaire (coté œil)** est soit une lentille convergente soit divergente.

L'objet à l'infini a une image intermédiaire A_iB_i dans le plan focal image de l'objectif. Pour que l'image de A_iB_i par l'oculaire soit à l'infini, il faut que A_iB_i soit dans le plan focal objet de l'oculaire. La lunette est donc réglée à l'infini si le foyer objet de l'oculaire est confondu avec le foyer image de l'objectif :

Pour une lunette afocale, il faut que $F_{oculaire} = F'_{objectif}$.

La propriété caractéristique de la lunette est son grossissement angulaire $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ avec α l'angle sous lequel est vu l'objet et α' est l'angle sous lequel est observée l'image par l'œil.

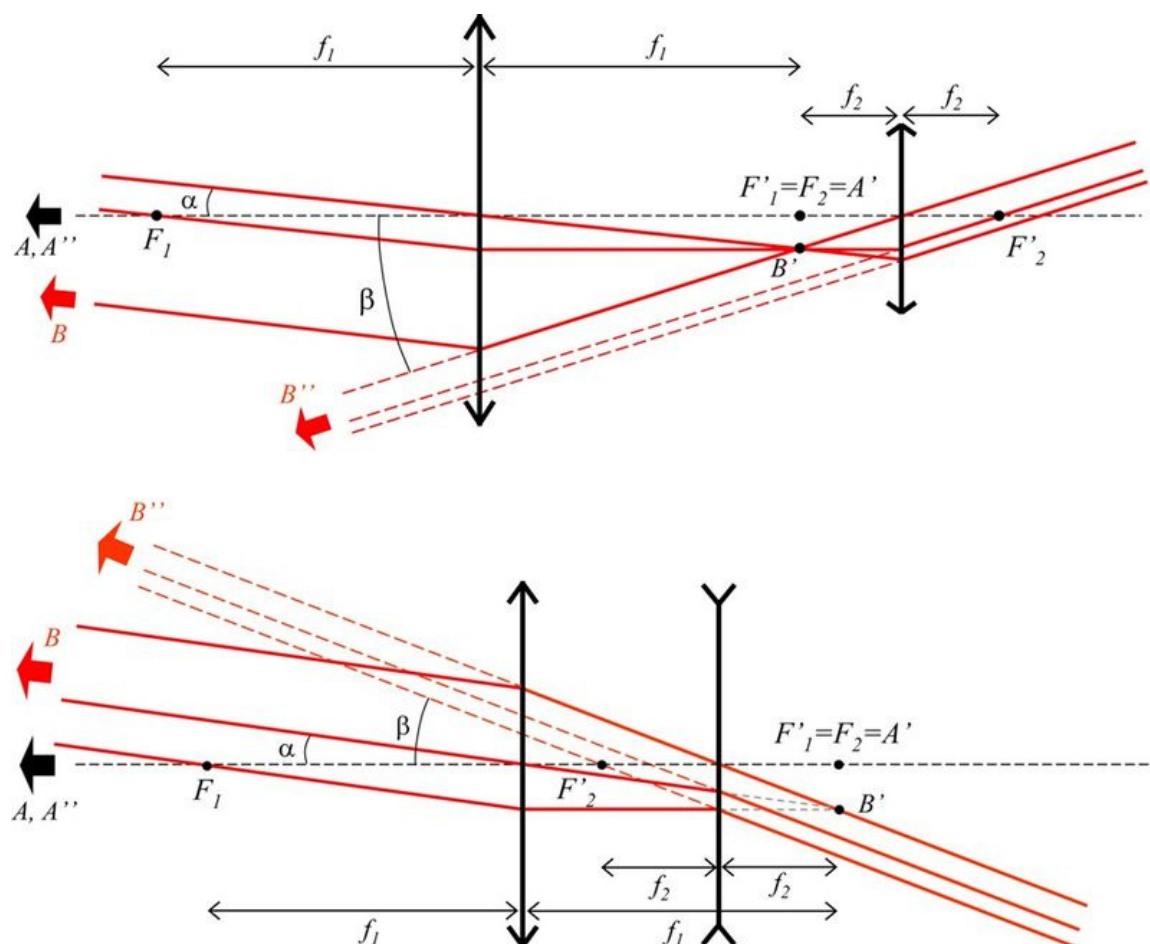


Fig. 16 Lunette astronomique (en haut) et terrestre (en bas).

V.4. Microscope

Pour observer des objets très petits, on utilise un microscope constitué de deux systèmes optiques transparents complexes qui peuvent être modélisés par deux lentilles minces convergentes.

L'objectif est une lentille convergente de petite distance focale.

Ce n'est pas un système afocal : il doit donner d'un objet situé à distance finie une image à l'infini. L'image intermédiaire doit se former dans le plan focal objet de l'oculaire, mais qui n'est pas confondu avec le plan focal image de l'objectif.

On caractérise les microscopes par le **grossissement** ($\neq$ grandissement) défini par $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$, où α est l'angle sous lequel on voit l'objet à l'œil nu situé au punctum proximum (souvent pris par convention à 25 cm), et α' est l'angle sous lequel on voit l'image à travers le microscope.

Ouverture :

Les télescopes sont également utilisés pour observer les étoiles, à l'aide de miroirs sphériques, hors-programme en classe préparatoire, car ils offrent de meilleurs grossissements angulaires et sont plus faciles à fabriquer que des lentilles.