OPTIQUE 3 : Étude d'instruments d'optique

Rapports de Jury

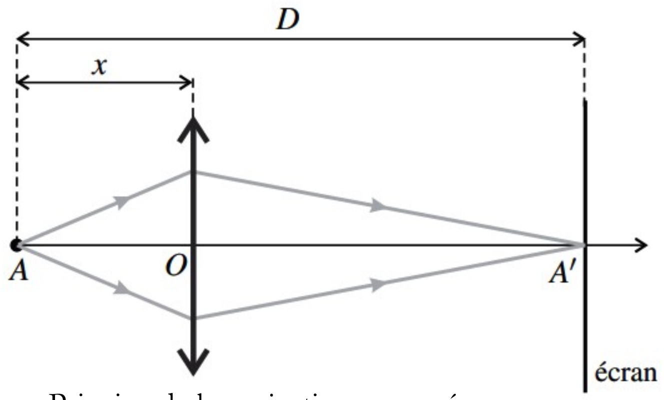
Concernant le matériel utilisé en optique, trop de candidats ne savent pas reconnaître une lentille divergente d'une lentille convergente. Les termes utilisés sont souvent approximatifs et il y a souvent confusion entre les différents instruments (lunette, viseur, collimateur...). Certains instruments mentionnés dans le sujet voient leur orthographe traumatisée dans les comptes-rendus, révélant un cruel manque de culture chez certains candidats (l'oculaire devient l'oriculaire ou l'occulaire selon les cas...).

En optique, le jury note une nette régression dans les connaissances sur les tracés de rayons à travers les systèmes optiques à lentilles. Rappelons qu'un tracé de rayons suit un raisonnement et reflète une réalité expérimentale. Beaucoup (plus de 50 % !) de candidats font des observations correctes mais ne font pas les tracés de rayons demandés (avouant à l'examinateur que « le tracé de rayons n'est pas leur point fort »), ou font un tracé de rayons qui ne reflètent pas la réalité observée ou la situation expérimentale (quel peut bien être le signe de la focale de l'oculaire ? que veut dire « voir à l'infini » ?). Cette déconnexion totale entre la réalité expérimentale et la compréhension des phénomènes est inquiétante.

I Projection d'une image sur un écran.

I.1) Position du problème

On veut projeter l'image d'un objet rétroéclairé sur un écran (diapositive par exemple). **On souhaite avoir une image agrandie le plus possible**, aussi lumineuse et nette que possible, avec une distance **D entre l'objet et l'écran qui est imposée** par les conditions extérieures. Pour cela on doit utiliser une lentille nécessairement convergente car il faut obtenir une image réelle d'un objet réel.



Principe de la projection sur un écran

Questions

- Comment choisir la distance focale de cette lentille ?
- Que vaut la distance objet-lentille notée x?
- Comment obtenir une image lumineuse et uniformément éclairée ?

I.2) Résolution du problème (À savoir refaire).

Réponse : On utilise la formule de conjugaison de Descartes, on isole x

$$\frac{1}{\overline{OA'}}-\frac{1}{\overline{OA}}=\frac{1}{f'} \quad \text{on remplace} \quad \frac{1}{D-x}-\frac{1}{-x}=\frac{1}{f'}\Rightarrow \quad \frac{1}{D-x}+\frac{1}{x}=\frac{1}{f'}$$

$$\frac{x+(D-x)}{(D-x)x}=\frac{1}{f'} \Rightarrow \frac{D}{(D-x)x}=\frac{1}{f'} \Rightarrow \frac{Dx-x^2}{D}=f' \Rightarrow -x^2+Dx-f'D=0$$

on cherche les racines d'une équation polynomiale d'ordre 2 d'inconnu x telle que $\Delta=D^2-4f'D$

Rmq 1 : Pour avoir des solutions réelles il faut **nécessairement** $\Delta\geq 0\Rightarrow D^2\geq 4f'D\Rightarrow D\geq 4f'$

À retenir et à savoir redémontrer :

Si la distance D entre l'objet et l'écran est imposée, on peut former une image réelle seulement si $D\geq 4f'$

Si cette condition est vérifiée on a deux solutions pour la distance objet-lentille :

$$x_1=\frac{-D+\sqrt{D^2-4f'D}}{-2}=\frac{D-\sqrt{D^2-4f'D}}{2} \qquad x_2=\frac{-D-\sqrt{D^2-4f'D}}{-2}=\frac{D+\sqrt{D^2-4f'D}}{2}$$

on voit que $x_1<x_2$ Quelle distance permet de maximiser la taille de l'image ?

on sait que $\gamma<0$ car on forme une image réelle avec une lentille convergente : l'image est renversée

$\gamma=\frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}=\frac{D-x}{-x}$ sans calcul, on voit que plus x est grand, plus D-x sera faible et plus γ sera faible

Pour avoir une image agrandie il faut placer la lentille plus près de l'objet que de l'écran.

$$\boxed{x_1=\frac{D-\sqrt{D^2-4f'D}}{2}}$$

Comme x_1 diminue si f diminue, pour une distance objet-écran fixée, l'image est d'autant plus grande que la distance focale de la lentille convergente utilisée est petite

I.3) Prise en compte des conditions de Gauss

Pour que l'image soit de bonne qualité, il faut respecter les conditions de Gauss : les rayons doivent être proches de l'axe optique de la lentille et peu inclinés par rapport à cet axe.
Or, en diminuant la distance objet-lentille, pour une taille de lentille donnée, on augmente l'angle d'inclinaison des rayons qui frappent la lentille sur ses bords. Il y a donc un compromis à trouver entre la taille de l'image et sa netteté.

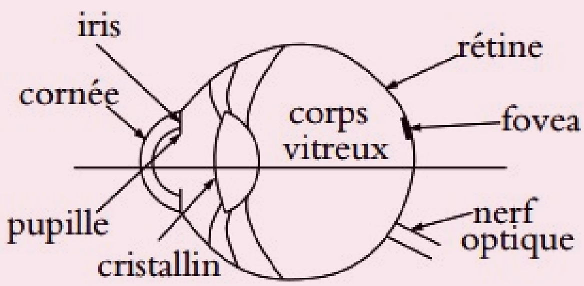
II l'œil

II.1) Description

- L'iris (partie colorée) est percé de la pupille dont le diamètre est variable (de 2 à 8 mm) et qui joue le rôle de diaphragme c'est-à-dire qui limite l'intensité lumineuse pénétrant dans l'œil.

- **La rétine** est constituée de cellules sensibles à la lumière (les cônes et les bâtonnets).

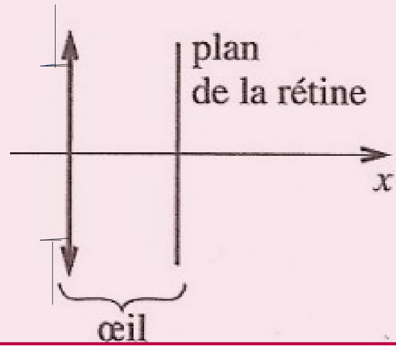
-**Le cristallin** est un muscle assimilable à une lentille mince biconvexe dont la distance focale est variable selon sa contraction.
Il donne d'un objet une image renversée sur la rétine.



II.2) Modélisation

L'ensemble de l'œil sera modélisé par un diaphragme (modélisant l'iris) placé devant une lentille mince convergente (modélisant le cristallin) formant une image un écran (modélisant la rétine)

Il faut être conscient que ceci est une approximation



II.3) Limite de résolution

L'œil ne distingue deux détails différents de l'objet que si leur image **se forme sur deux cellules différentes de la rétine**.

Dans de bonnes conditions d'éclairement (ni trop sombre, ni trop lumineux), l'œil distingue des détails vu sous un angle minimal d'environ 1 minute d'arc, soit 3.10^{-4} rad.

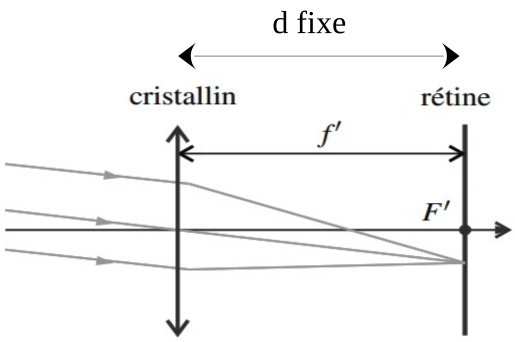
Cette valeur constitue ***la limite de résolution*** ou ***pouvoir séparateur de l'œil***. La résolution pratique dépend fortement des conditions d'éclairement et du contraste si bien que la limite précédente est rarement atteinte

II.4) Plage d'accommodation

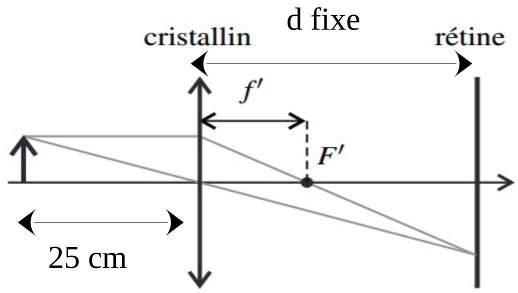
L'œil ne peut voir une image nette que si elle se forme sur la rétine.
Def : Un œil au repos (cristallin non contracté) **voit à une distance maximale**. Le point situé à cette distance porte le nom de **Punctum Remotum** noté P.R..

Voc : Pour voir des objets plus proches, le cristallin doit se contracter pour être plus convergent (sa vergence augmente), on dit que l'œil accommode.

Def : Le point le plus proche que peut voir net un œil est appelé Punctum Proximum noté P.P.. Il correspond à la distance minimale de mise au point.
La zone située entre le P.P. et le P.R. est appelé champ en profondeur de l'œil.



Formation de l'image d'un objet au P.R



Formation de l'image d'un objet au P.P

f' diminue quand on regarde des objets plus proche

Pour un œil normal, le P.R. est à l'infini et le P.P. à environ 25 cm pour un adulte

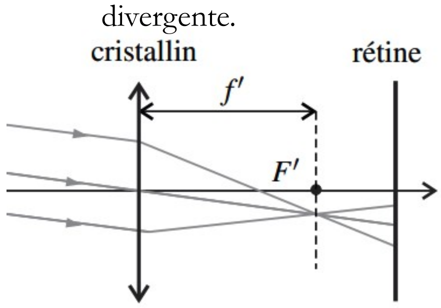
Conséquence importante : un œil normal voit correctement **sans se fatiguer (pas d'accommodation)** lorsque l'objet observé est situé à l'infini.

Ainsi, dans la plupart des instruments d'optique à vision direct (où on regarde à travers comme microscope, et la lunette astronomique) l'image finale doit être à l'infini (les rayons qui sortent doivent être parallèle entre eux) pour que l'observateur ne se fatigue pas.

(l'image en sortie de l'instrument joue le rôle d'objet pour l'œil)

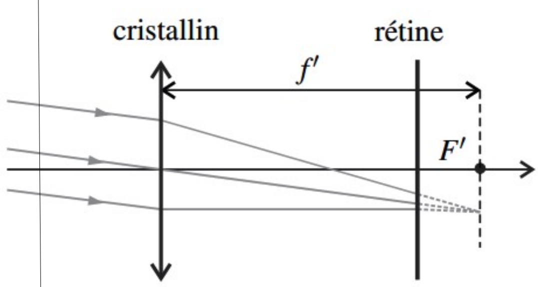
II.5) Défauts de l'œil (H.P) (voir TD exercice)

La myopie Un œil myope possède un cristallin trop convergent.
Par conséquent, le myope sans ses lunettes voit flou de loin Il faut rendre l'œil moins convergent donc la correction se fait par l'utilisation d'une lentille divergente.



Œil myope sans accommodation

L'hypermétropie. Un œil hypermétrope possède un cristallin insuffisamment convergent.
L'œil doit donc accommoder pour voir à l'infini sinon l'image se forme derrière la rétine. Il faut rendre l'œil plus convergent donc la correction se fait par l'utilisation d'une lentille convergente



Œil hypermétrope sans accommodation

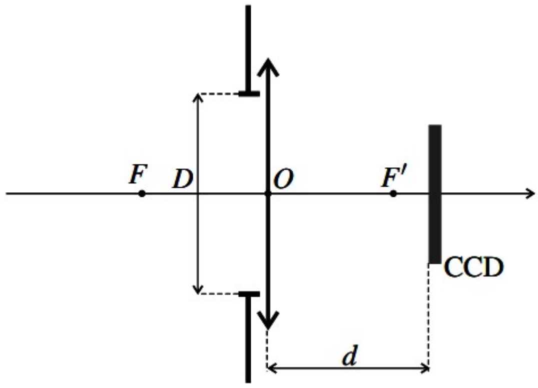
- *Presbytie* :

L'œil presbyte a des difficultés à accommoder. C'est un problème qui est dû au vieillissement, le cristallin perdant progressivement sa plasticité.Les objets proches sont moins bien vus et le champ en profondeur diminue.

III L'appareil photographique

III.1) Modélisation

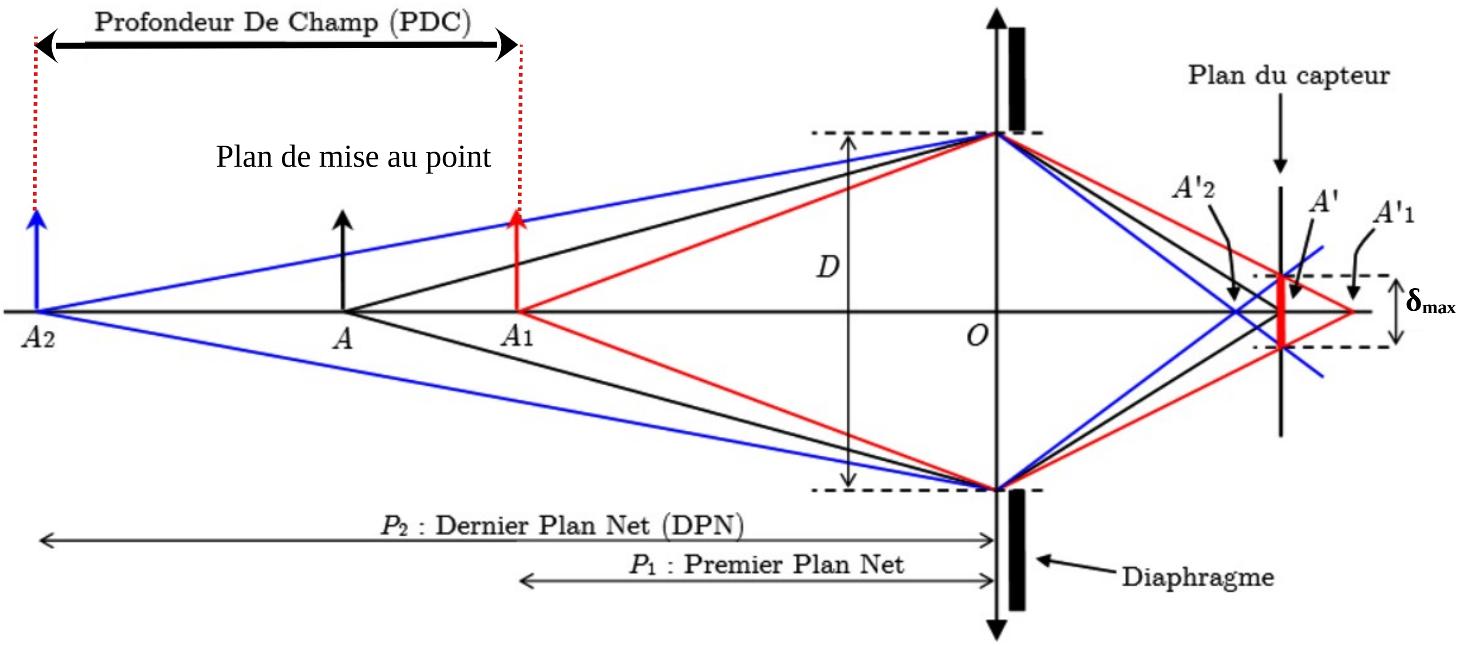
- Pour simplifier, on modélise l'objectif de l'appareil par une lentille convergente unique de distance focale f', appelée dans la suite simplement focale.
- La lumière entrant dans l'objectif doit traverser le diaphragme, de diamètre D réglable, que l'on modélisera par une ouverture circulaire placée juste devant la lentille mince précédente.
- L'image se forme sur un capteur, en général un capteur CCD
- la distance d est réglable



Modélisation de l'appareil photographique

III.2) Profondeur de champ

voir GIF



Pour une distance lentille-capteur fixée, On sait qu'il existe seulement un plan (plan de mise au point) dont on peut former une image nette sur le capteur.
Des points sur l'axe optique situés à l'avant ou à l'arrière de ce plan ne pourront avoir une image nette. Par exemple sur la figure ci-dessus la lumière issue de A_1 et A_2 fait sur le capteur une tache de diamètre δ qui a la forme du diaphragme d'ouverture
Pourtant en pratique sur un appareil photo on peut voir nets plusieurs objets situés les uns derrière les autres

Définition : **On appelle profondeur de champ la distance entre le point de l'axe optique net le plus proche de l'objectif et le point net le plus éloigné de l'objectif.**

III.3) Influence du diaphragme

Problématique ? **Quelle est la condition pour que A_2 et A_1 soit nets sur la photographie ? Quel est le rôle du diamètre d'ouverture D ?**

- Si δ est inférieur à la taille d'une cellule élémentaire du capteur (soit un pixel de l'image finale), B sera aussi net que A sur l'image enregistrée. Mais, cette condition est inutilement contraignante parce qu'on ne distingue pas les pixels à l'unité sur une image numérique.

Pour que A_1 et A_2 soit net, il suffit que δ soit plus petit qu'une distance δ_{max} qui dépend des conditions de visualisation de la photographie et qui est en gros de l'ordre de 3 fois la taille d'un pixel.

Rmq : La profondeur de champ diminue si le diamètre D du diaphragme d'ouverture augmente.

Exercice construire la profondeur de champ pour les deux réglages du diaphragme ci-dessous

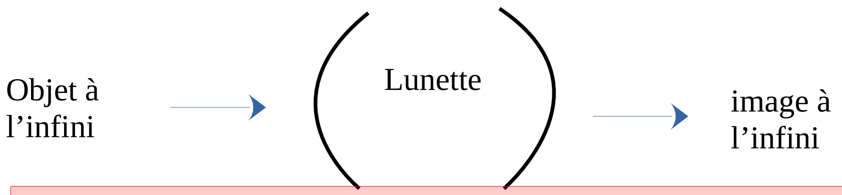
Méthode :
- On construit les rayons provenant de la monture du diaphragme qui forme la tache de diamètre δ_{max} sur le plan du capteur.
- Deux rayons convergent avant le plan en un point A_2' et deux autres en un point A_1'
On trace le rayon parallèle à celui passant par A_1'
- on construit par projection orthogonale sur l'axe optique les points A_1 et A_2 (aplanétisme)
- la distance entre A_1 et A_2 est la profondeur de champ

IV Les lunettes

IV.1) Définition

Les lunettes permettent d'observer des objets observés sont à une distance grande devant la distance focale, on peut alors considérer qu'ils sont à l'infini : **on dit que la lunette est réglée à l'infini**

Comme de plus les rayons sortent de la lunette parallèle entre eux, on peut dire que l'image formée se trouve à l'infini



Voc : L'objet et l'image étant à l'infini, il s'agit d'un système optique afocal.

La lunette sont en général constituées de deux lentilles , un oculaire (proche de l'œil) et un objectif (proche de l'objet qu'on observe)

Foyer F_1' et F_1 Foyer F'_2 et F_2

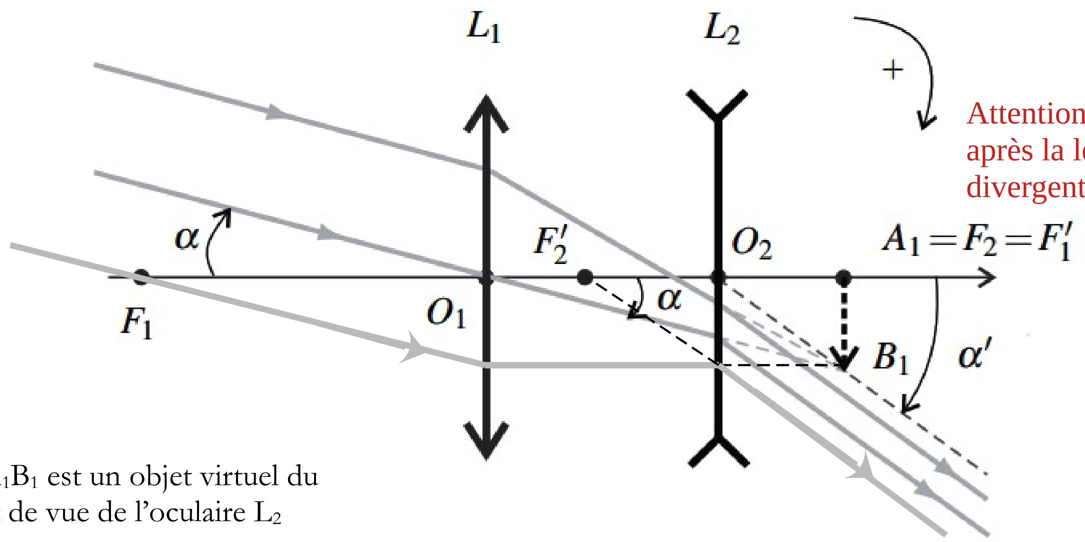
$$\text{Objet à l'}\infty \xrightarrow{\text{objectif}} A_1B_1 \xrightarrow[O_2]{\text{oculaire}} \text{Image à } \infty$$

À Retenir : Pour obtenir un système afocal, il faut donc disposer les lentilles de manière à ce que $F_1' = F_2$

IV.2) La lunette de Galilée (ou lunette terrestre)

La lunette de Galilée est la lunette la plus simple qui permette d'observer des objets terrestres.
On modélise l'objectif par une lentille convergente L_1 de distance focale f_1 et l'oculaire par une lentille divergente L_2 de distance focale f_2'
Réalisé le tracé des rayons lumineux pour $f_1' = 60$ cm et $f_2' = -10$ cm

<u>**Schéma lunette de Galilée**</u>



Rmq : A_1B_1 est un objet virtuel du point de vue de l'oculaire L_2

Grossissement :

Pour les lunettes, qui sont afocales, on ne peut pas définir un grandissement car on ne connaît pas la taille des objets/images qui sont à l'infini. On définit plutôt le grossissement :

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

α' est l'angle sous lequel on voit l'image de l'objet travers la lunette

α est l'angle sous lequel on verrait l'objet à l'infini sans lunette

Expression en fonction des distances focales

Dans le triangle $O_1A_1B_1$ rectangle en A_1 on a $\tan(\alpha)=\frac{-\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}}$ (α > 0 et $\overline{A_1B_1}<0$ d'où le moins)

Dans le triangle $O_2A_1B_1$ rectangle en A_1 on a $\tan(\alpha')=\frac{-\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}}$ (α' > 0 et $\overline{A_1B_1}<0$ d'où le moins)

Dans le cadre de l'approximation de Gauss : $\tan(\alpha')\approx\alpha'$ et $\tan(\alpha)\approx\alpha$

Donc $G=\frac{\alpha'}{\alpha}=\frac{\frac{-\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}}}{\frac{-\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}}}=\frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_2A_1}}$ mais comme $A_1=F_1'$ et que $A_1=F_2$ alors $\overline{O_2A_1}=\overline{O_2F_2}=f_2=-f'_2$

De même $\overline{O_1A_1}=\overline{O_1F'_1}=f_1'$

finalement $\boxed{G=-\frac{f_1'}{f_2'}>0}$ **Positif car la lunette terrestre ne renverse pas l'image**

À savoir retrouver

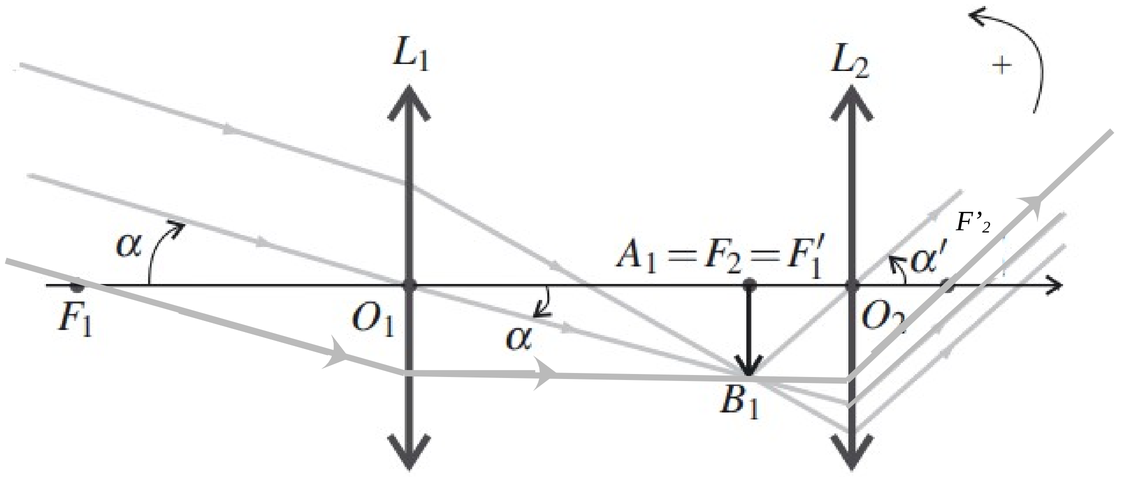
(et car $f_2'<0$, $f_1'>0$)

IV.3) La lunette astronomique

La lunette astronomique est aussi une lunette permettant d'observer des objets à très grandes distances. On modélise l'objectif par une lentille convergente L_1 de distance focale f'_1 et l'oculaire par une lentille convergente L_2 de distance focale f_2'

Réaliser le tracé des rayons lumineux pour f_1' = 60 cm et f_2' = 10 cm

Schéma lunette astronomique



Dans le triangle $O_1A_1B_1$ rectangle en A_1 on a $\tan(\alpha)=\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}}$ (sur le schéma α< 0 et $\overline{A_1B_1}<0$ donc $\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}}<0$)

Dans le triangle $O_2A_1B_1$ rectangle en A_1 on a $\tan(\alpha')=\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}}$ (α' > 0 et $\overline{A_1B_1}<0$ mais $\overline{O_2A_1}$ aussi donc pas de moins)

Dans le cadre de l'approximation de Gauss : $\tan(\alpha')\approx\alpha'$ et $\tan(\alpha)\approx\alpha$

Donc $G=\frac{\alpha'}{\alpha}=\frac{\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}}}{\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}}}=\frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_2A_1}}$ mais comme $A_1 = F_2$ alors $\overline{O_2A_1}=\overline{O_2F_2}=f_2=-f'_2$

De même comme $A_1 = F_1'$ $\overline{O_1A_1}=\overline{O_1F'_1}=f_1'$

finalement $\boxed{G=-\frac{f_1'}{f_2'}<0}$ négatif **car la lunette astro renverse l'image**