Système optique et formation d'images : la lunette astronomique

Introduction :

L'association de deux lentilles pour créer une image agrandie d'un objet est une idée datant de la fin du XVI^{e} siècle. Plusieurs scientifiques s'y sont intéressés, cependant Galilée, physicien, mathématicien mais aussi astronome italien eu l'idée d'associer deux lentilles pour créer un instrument optique : la lunette astronomique. Une vingtaine d'années après la première description de cette association, nous avons pu observer les objets célestes.

Ce cours présentera la lunette astronomique et son mode de fonctionnement, puis détaillera la lunette la plus utilisée : la lunette astronomique afocale. Enfin, sera traité une caractéristique très importante des lunettes : le grossissement.

1 La lunette astronomique

a. Le modèle optique d'une lunette astronomique afocale

Définition

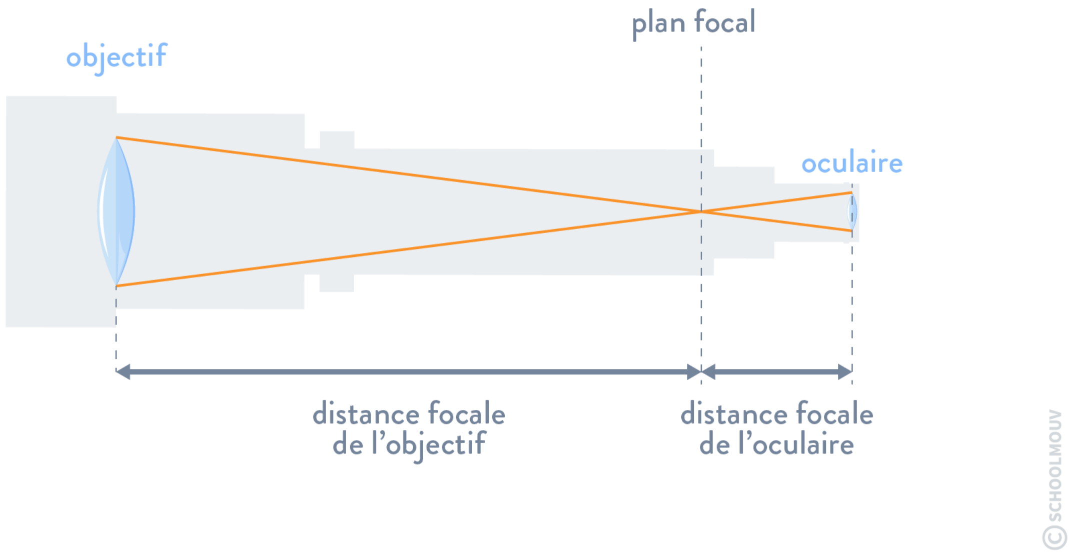
Lunette astronomique afocale :

La lunette astronomique est un dispositif optique qui permet d'obtenir une image agrandie, d'un objet très éloigné.

Une lunette astronomique est dite afocale si le point foyer image de l'objectif (F_1') est confondu avec le point foyer objet de l'oculaire (F_2).

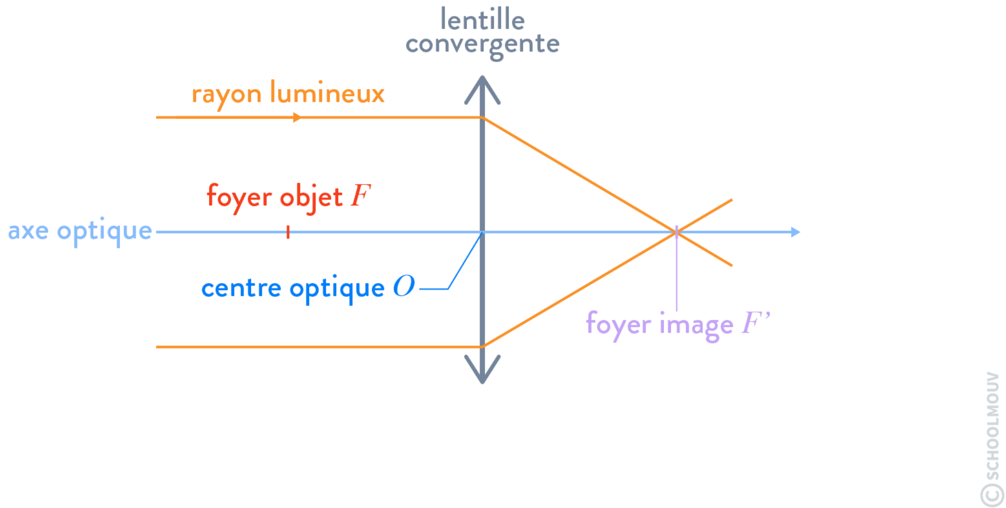
La lunette astronomique dispose de **deux lentilles convergentes** ayant le même axe optique :

- la première lentille est **l'objectif** et possède une distance focale importante ;
- la deuxième lentille est **l'oculaire** et possède une plus faible distance focale.



Rappel

Une lentille convergente se schématise ainsi :



b. Construction d'une image à travers une lunette astronomique afocale

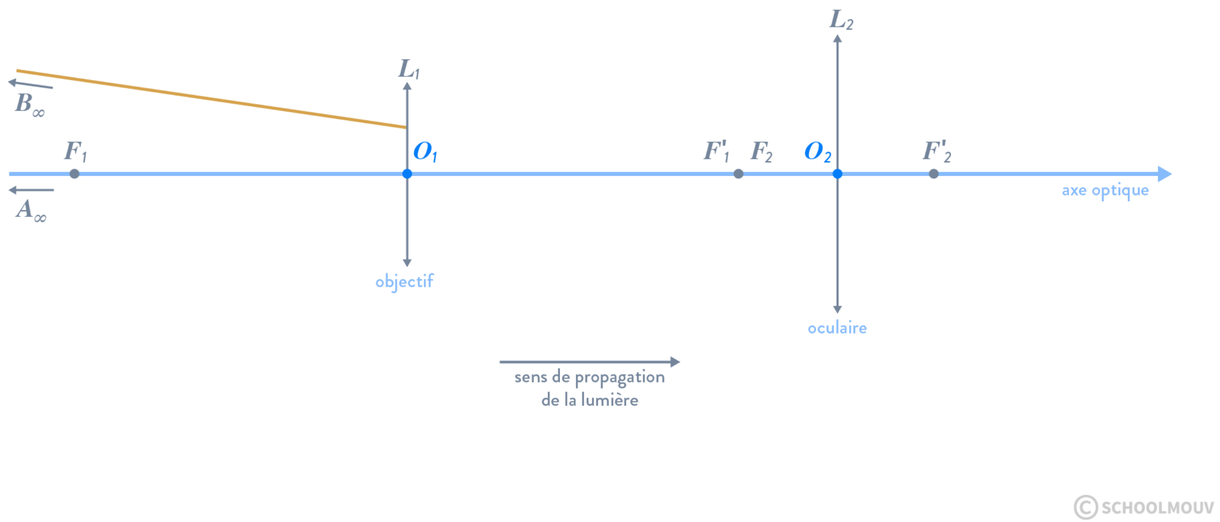
Nous allons voir comment une lunette astronomique afocale construit l'image d'un objet AB situé « à l'infini ».
Nous nous intéressons notamment aux rayons émis par le point B placé à l'infini : on considère que les rayons émis par un point placé « à l'infini » atteignent l'œil de l'observateur – ou l'objectif de la lunette – parallèles entre eux.

→ Une lunette astronomique sert à observer des images très lointaines, que l'on peut donc considérer comme « à l'infini ». Cette modélisation est donc justifiée.

Une lunette astronomique afocale renvoie à l'œil une image également « à l'infini ». Cela lui évite d'accommoder et permet une observation sans fatigue.
Ainsi, les rayons qui ont atteint l'objectif étaient parallèles entre eux, ceux qui sortent de l'oculaire le sont aussi : il n'y ni convergence ni divergence des rayons.

→ La lunette se comporte comme un instrument sans foyer, d'où le qualificatif **afocale**.

1 Considérons donc un objet AB situé à l'infini, avec le point B placé à l'infini, noté B_∞, et le point A aussi placé à l'infini, sur l'axe optique, noté A_∞. Nous représentons un rayon émis par le point B.



Attention

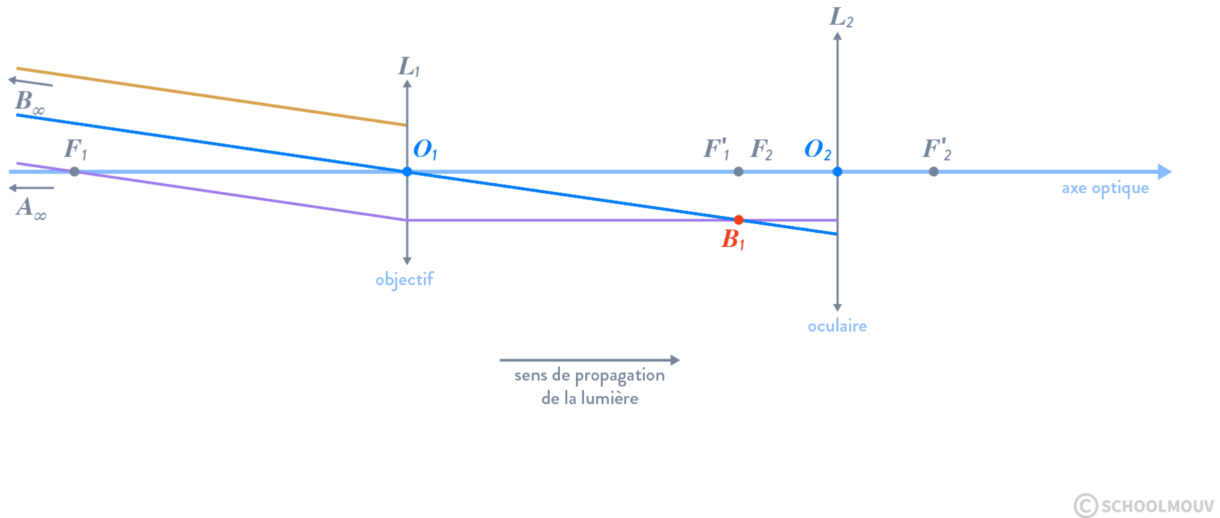
> Les images de ce cours ne sont volontairement pas à l'échelle, afin d'avoir des schémas plus lisibles.

2 Nous allons maintenant montrer comment ce rayon se comporte après avoir traversé la lentille de l'objectif L_1.

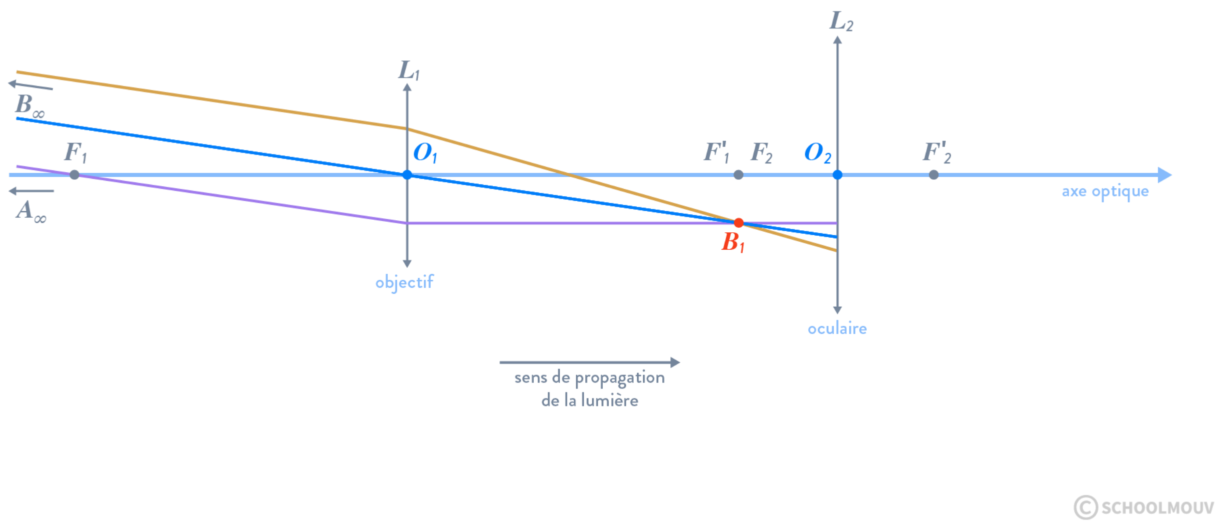
Les rayons qui proviennent de B à l'infini, après avoir traversé la lentille convergente L_1, vont tous se couper en un point.
Pour déterminer ce point d'intersection, nous allons nous servir de deux rayons particuliers, qui sont tous deux parallèles au rayon considéré :

- le rayon représenté en bleu, qui passe par le centre optique O_1 et qui n'est pas dévié ;
- le rayon représenté en violet, qui passe par le foyer objet F_1 de L_1 et qui émerge donc de manière parallèle à l'axe optique.

→ Les deux rayons particuliers se coupent en un point B_1, qui est l'image du point B placé à l'infini.



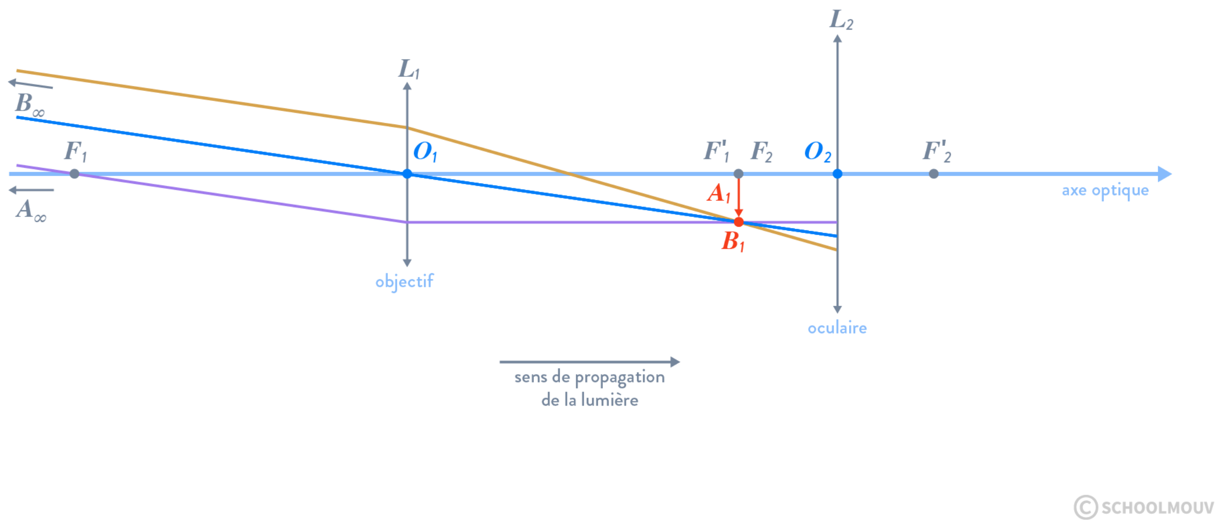
→ Et notre rayon initial émergent de L_1 passe aussi par ce point :



3. Le point A_1, image du point A placé à l'infini, est donc logiquement placé à la verticale de B_1, sur l'axe optique : il est confondu avec le foyer image de

l'objectif.

→ L'image d'un objet placé à l'infini se forme ainsi sur le **plan focal image** de l'objectif, c'est-à-dire le plan qui passe par F'_1 et qui est orthogonal à l'axe optique.



Démonstration

Nous pouvons d'ailleurs le montrer avec la **formule de conjugaison** que nous avons vue en première.
Le point A_1 est l'image du point A par la lentille L_1, de centre optique O_1 et de foyer image F'_1.

→ Nous avons donc, par la relation de conjugaison :

$$\frac{1}{\overline{OA_1}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'_1}}$$

Or, A est placé à l'infini, donc : $\overline{OA}$ tend vers $-\infty$ (nous travaillons pour rappel avec des mesures algébriques).
Et $\frac{1}{\overline{OA}}$ tend vers 0.

Nous arrivons donc à :

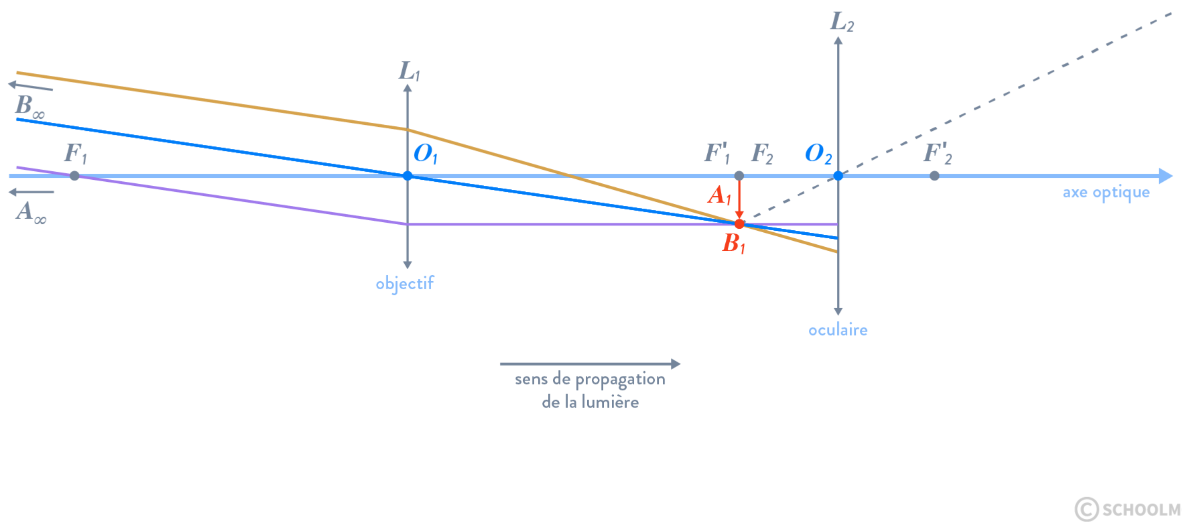
$$\frac{1}{\overline{OA_1}} - \overbrace{\frac{1}{\overline{OA}}}^{\rightarrow 0} = \frac{1}{\overline{OF'_1}}$$

→ A_1 et F'_1 sont confondus. L'image se forme sur le plan focal image.

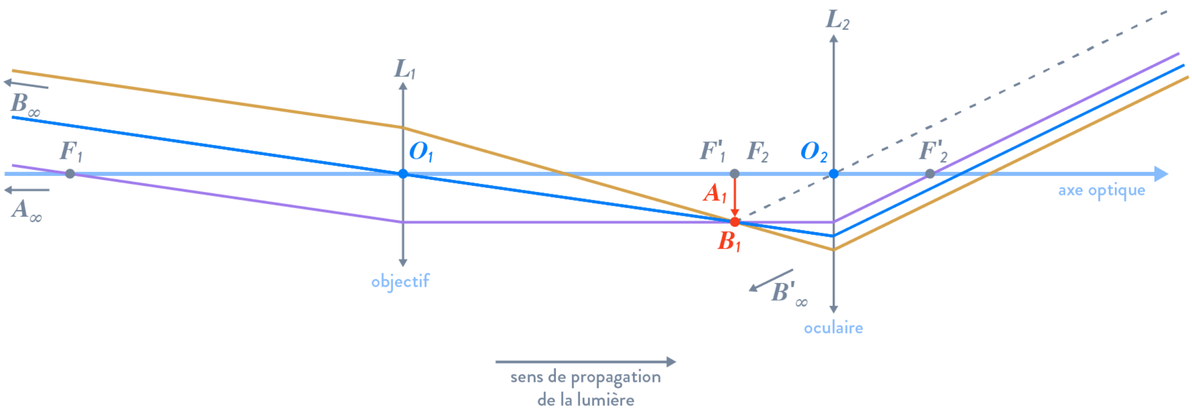
4 C'est cette image A_1B_1, appelée **image intermédiaire**, qui est l'objet observé par l'oculaire. Nous allons donc maintenant voir comment l'image finale se forme, en étudiant les trois rayons déjà tracés, issus de B_1, lorsqu'ils atteignent la lentille de l'oculaire L_2.

Nous l'avons dit, les rayons émergents de L_2 seront parallèles entre eux.

→ Traçons là aussi un rayon particulier, celui qui passe par le centre optique O_2 de L_2 et qui ne sera pas dévié :



Nous connaissons maintenant la direction des rayons émergents, nous pouvons prolonger les trois rayons considérés et obtenons l'image B', aussi à l'infini, que nous notons B'_∞ :



Remarquons que le rayon représenté en violet, qui est parallèle à l'axe optique, passe par le foyer image F_2' de la lentille de l'oculaire.
Précisons aussi que le point B_1 est placé sur le **plan focal objet** de L_2.

→ Tous les rayons provenant d'un point appartenant au plan focal objet d'une lentille convergente émergent de cette lentille parallèlement entre eux.

À retenir

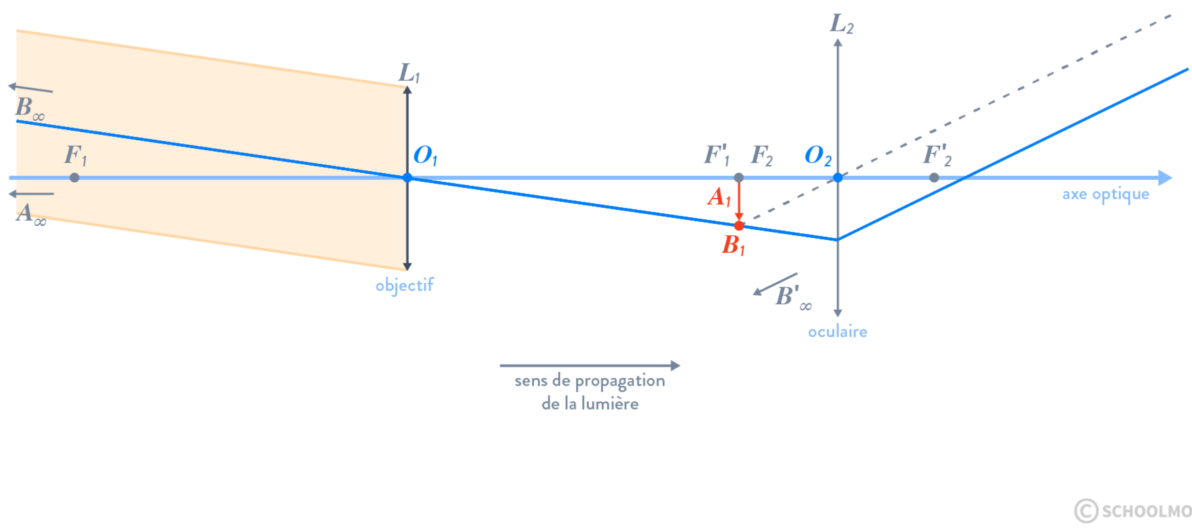
> Nous comprenons ainsi mieux pourquoi, dans une lunette astronomique afocale, le foyer image de l'objectif doit coïncider avec le foyer objet de l'oculaire si l'on veut que, à la sortie, l'image d'un objet placé à l'infini soit aussi à l'infini.

c. Construction du faisceau émergent issu d'un point objet situé à l'infini

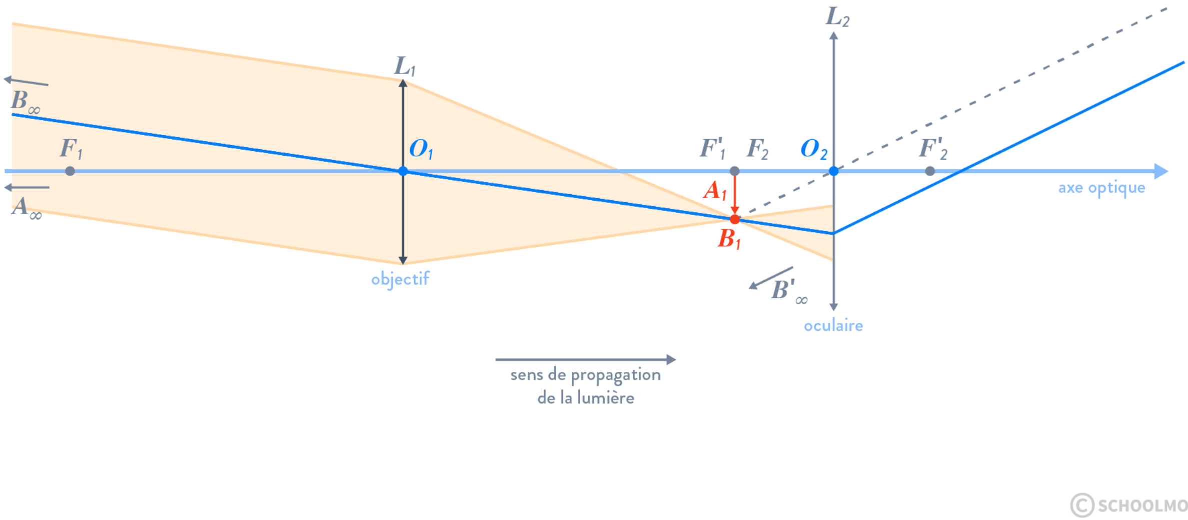
Dans la partie précédente, nous avons étudié quelques rayons issus du point B placé à l'infini. Nous allons maintenant nous intéresser à l'ensemble des rayons issus de B qui atteignent l'objectif, c'est-à-dire au faisceau lumineux qu'il capte.

1 Nous avons vu que le point image de B appartient au plan focal image de L_1. Nous ne gardons que le rayon qui passe par le centre O_1 et qui n'est pas dévié : B_1 est à l'intersection de ce rayon et du plan focal image.

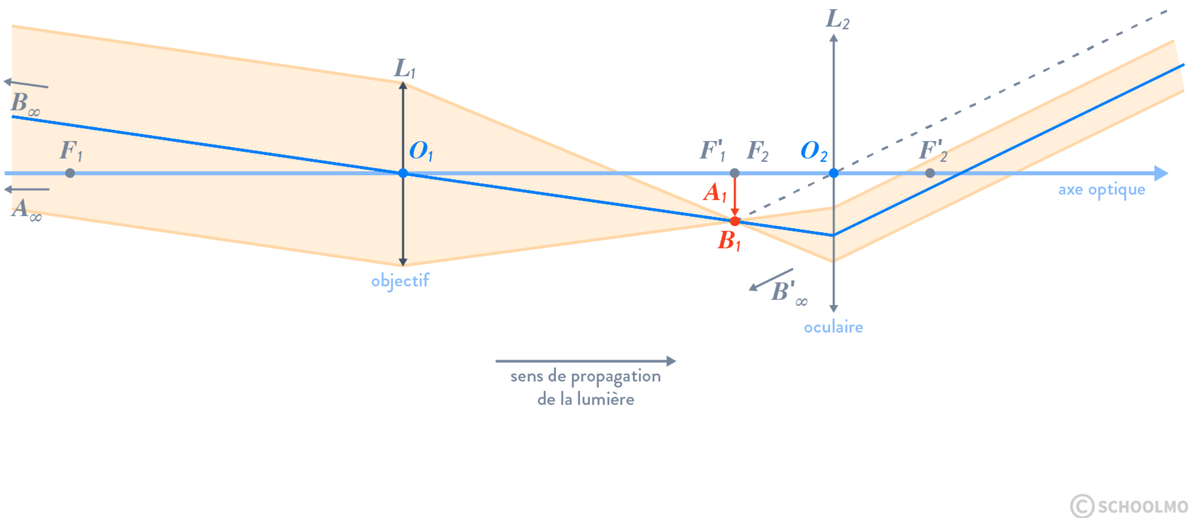
Nous représentons cette fois les rayons qui passent par les bords de la lentille de l'objectif et qui délimitent le faisceau lumineux capté (ils sont parallèles au rayon bleu) :



2 Nous prolongeons ces rayons, qui passent donc par B_1, pour avoir le faisceau qui émerge de L_1 :



3 Nous savons aussi prolonger les rayons après avoir traversé L_2, puisqu'ils sont parallèles entre eux (et donc à celui qui passe par O_2). Nous obtenons ainsi le faisceau émergent issu du point B placé à l'infini :



Le faisceau émergent est plus étroit que celui incident : il y a concentration de la lumière.

→ La lunette astronomique afocale permet ainsi d'avoir une image plus lumineuse.

Remarquons aussi que le diamètre de l'objectif est une caractéristique importante : plus il est grand, plus il collecte de lumière.

2 | Le grossissement d'une lunette astronomique

Nous venons de voir qu'une lunette astronomique permet de concentrer la lumière. Évidemment, elle permet aussi de grossir les objets observés.

Définition

Grossissement :

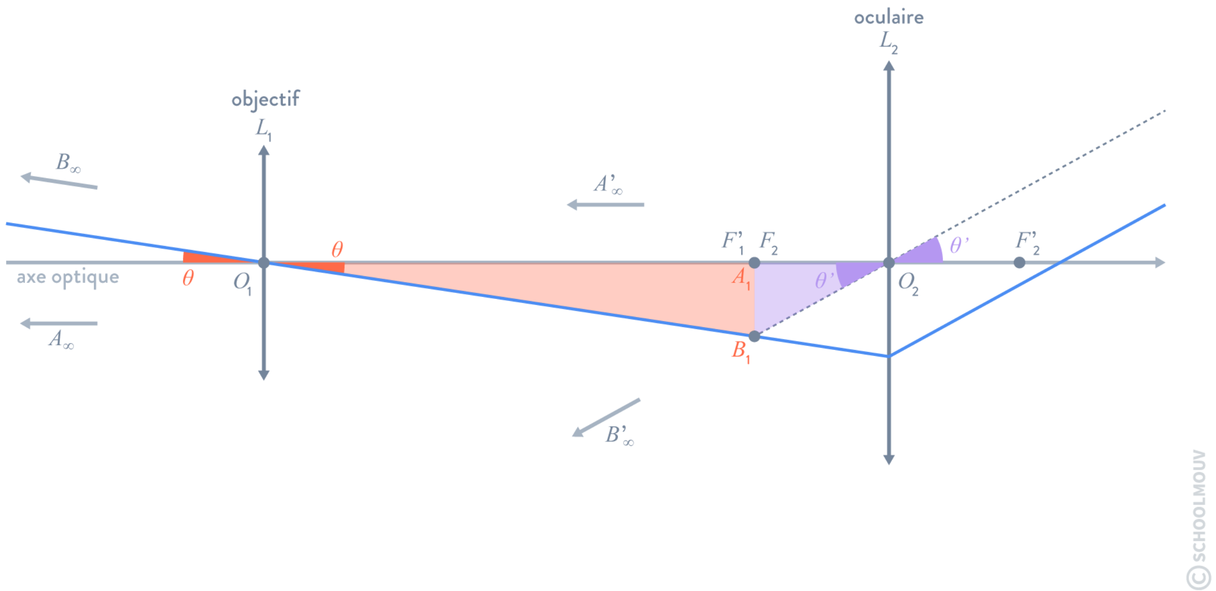
Le grossissement standard, noté G, d'une lunette astronomique est le rapport de l'angle θ' sous lequel est vu l'image formée $A'B'$ à travers la lunette et l'angle θ sous lequel est vu l'objet AB à l'œil nu.

→ L'intérêt de la lunette est d'augmenter l'angle θ pour mieux discerner les points A et B.

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

C'est une grandeur sans dimension.

Dans le cas d'une lunette astronomique afocale, on obtient le schéma suivant :



Les angles θ et θ' sont des petits angles exprimés en radian, ainsi nous pouvons faire l'approximation de ces petits angles :

- $\tan\ \theta \approx \theta$;
- $\tan\ \theta' \approx \theta'$.

Rappel

La distance focale image f' est positive dans le cas d'une lentille convergente, nous pouvons aussi noter que $f' = OF' = OF$.

De plus, la vergenceest l'inverse de la distance focale image et s'exprime en dioptrie (δ), c'est-à-dire en m^{-1}.

$$V = \frac{1}{f'}$$

- **Soit le triangle $O_1A_1B_1$ rectangle en A_1 :**

$$\begin{aligned}\tan(\theta) &= \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} \\ &= \frac{A_1B_1}{O_1A_1} \\ &= \frac{A_1B_1}{OF'_1} \\ &= \frac{A_1B_1}{f'_1}\end{aligned}$$

Ainsi, en appliquant l'approximation des petits angles en radian, nous obtenons :

$$\theta \approx \frac{A_1B_1}{f'_1}$$

- **Soit le triangle $O_2A_1B_1$ rectangle en A_1 :**

$$\begin{aligned}(\tan)\theta' &= \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} \\ &= \frac{A_1B_1}{O_2A_1} \\ &= \frac{A_1B_1}{OF_2} \\ &= \frac{A_1B_1}{f'_2}\end{aligned}$$

Ainsi, en appliquant l'approximation des petits angles en radian, nous obtenons :

$$\theta' \approx \frac{A_1B_1}{f'_2}$$

→ Le grossissement d'une lunette afocale est donc :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\frac{A_1B_1}{f'_2}}{\frac{A_1B_1}{f'_1}} = \frac{f'_1}{f'_2}$$

Avec :

- f'_1 la distance focale de l'objectif ;

- f'_2 la distance focale de l'oculaire.

À retenir

Le grossissement G d'une lunette astronomique afocale est donné par l'expression :

$$G = \frac{f'_1}{f'_2}$$

Avec :

- f'_1 la distance focale de l'objectif exprimée en mètre (m) ;
- f'_2 la distance focale de l'oculaire exprimée en mètre (m).

Ainsi, pour que la lunette grossisse l'objet, par rapport à si on l'observait sans lunette, il faut que la distance focale de l'objectif soit supérieure à la distance focale de l'oculaire.

→ Plus la distance focale de l'objectif est grande, plus la lunette grossit l'objet.

→ Plus la distance focale de l'oculaire est petite, plus la lunette grossit l'objet.

Exemple

1. Soit une lunette astronomique afocale artisanale constituée de deux lentilles convergentes : un objectif ayant une distance focale $f'_1 = 1,5\ \text{m}$ et un oculaire ayant une distance focale $f'_2 = 1\ \text{cm}$.
   - **Calculer la distance O_1O_2**

Cette lunette est afocale, ainsi le plan focal objet de l'oculaire est confondu avec le plan focal image de l'objectif. Donc,

$$\begin{aligned} O_1O_2 &= O_1F'_1 + F_2O_2 \\ &= f'_1 + f'_2 \\ &= 150 + 1 \\ &= 151\ \text{cm} \end{aligned}$$

- **Calculer le grossissement de cette lunette**

D'après la formule du grossissement on obtient :

$$\begin{aligned} G &= \frac{f_1'}{f_2'} \\ &= \frac{150}{1} \\ &= 150 \end{aligned}$$

Cette lunette grossit donc l'objet 150 fois, par rapport à une observation à l'œil nu.

2. Soit une lunette afocale commerciale constituée de deux lentilles convergentes, l'une de vergence $+2\delta$ et l'une $+20\ \delta$.

- **Identifier laquelle des deux lentilles est l'objectif**

Quand la vergence augmente en valeur absolue, la distance focale diminue. La lentille ayant une vergence de $+2\ \delta$ est donc l'objectif.

- **Calculez le grossissement de cette lunette**

$$G = \frac{f_1'}{f_2'} = \frac{\frac{1}{V_1}}{\frac{1}{V_2}} = \frac{V_2}{V_1}$$

Soit,

$$G = \frac{20}{2} = 10$$

3 Caractéristiques d'une lunette astronomique commerciale

Prenons l'exemple d'une lunette astronomique disponible dans le commerce, présentée comme lunette « 70/350 » et dont la fiche technique donne :

Diamètre optique	$70\ \mathrm{mm}$

Longueur focale	350 mm
Poids du tube	1 kg
Trépied	Hauteur max. : 160 cm
Oculaires fournis	20 mm
	$12,5 \text{ mm}$
	4 mm

Ainsi, l'indication « 70/350 » donne le diamètre de l'objectif : 70 mm, et la distance focale de la lentille de l'objectif : 350 mm.

→ Nous avons vu dans ce cours qu'il s'agit des caractéristiques les plus importantes pour une lunette astronomique afocale.

La fiche technique indique aussi les distances focales des oculaires fournis, et nous pouvons déduire les grossissements associés :

Oculaires fournis	20 mm	$G = \frac{350}{20} = 17,5$
	$12,5 \text{ mm}$	$G = \frac{350}{12,5} = 28$
	4 mm	$G = \frac{350}{4} = 87,5$

Conclusion :

La lunette astronomique afocale est le dispositif optique employé majoritairement pour regarder les objets dans le ciel. Elle est constituée de deux lentilles convergentes : l'objectif et l'oculaire. Le plan focal objet de l'oculaire et le plan focal image de l'objectif sont confondus.
Ainsi, les lunettes astronomiques afocales créent une image à l'infini à partir d'un objet situé à l'infini de la lunette.