

Dispositifs optiques

Au programme

Savoirs

- ◇ 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.
- ◇ Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur.

Savoir-faire

- ◇ Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné.
- ◇ Étudier l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image.



Sommaire

I Œil	2
A Présentation et modélisation	2
B Caractéristiques	2
II La loupe	4
III L'appareil photo réflex	6
A Description	6
B Champ d'un appareil photo	6
C La mise au point	7
D La profondeur de champ	8
IV Systèmes optiques à plusieurs lentilles	10
A Association quelconque de lentilles	10
B Lunettes astronomiques	12

I Œil

A Présentation et modélisation

Un œil est constitué de trois parties :

Vocabulaire

L'**iris**, partie colorée, est percée de la pupille dont le diamètre est variable ((2 ; 8) mm). Il joue le rôle de *diaphragme*, permettant de limiter la puissance lumineuse pénétrant dans l'œil ;

Le **cristallin**, milieu transparent ayant un effet de lentille mince, accroché à des muscles permettant d'en changer la focale selon leur contraction ;

La **rétine**, l'« écran » de l'œil, constituée de cellules sensibles à la lumière (les cônes et les bâtonnets).

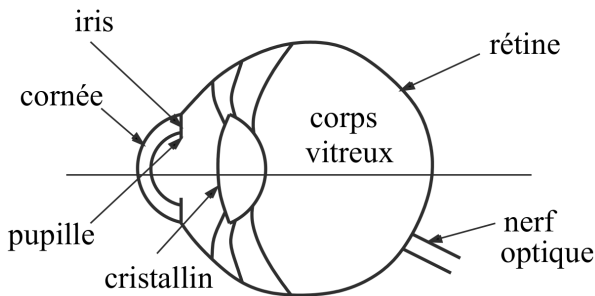
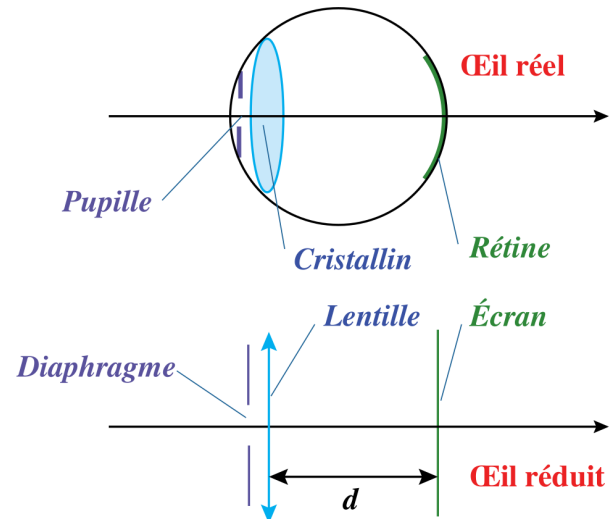


FIGURE 4.1 – Structure de l'œil.

Modèle de l'œil

En optique, on le décrit donc par une **lentille mince convergente de vergence variable** associée à un **écran fixe**, telle que $d \approx 22,3$ mm.



Modèle de l'œil réduit

FIGURE 4.2 – Modèle de l'œil en optique.

B Caractéristiques

I.B.1 Plage d'accommodation

L'œil ne voit net que si l'image se forme sur la rétine, comme pour tout dispositif optique avec un écran. Selon la distance de l'objet à une lentille, on a vu dans le chapitre 3 que la distance de l'image pouvait varier : ainsi, pour toujours voir net, un œil fait varier la vergence du cristallin pour s'accommoder, en augmentant sa vergence (lentille \oplus convergente) pour les objets proches.

Punctum remotum, proximum

On appelle **punctum remotum** (PR) le point objet **le plus éloigné** qu'un œil voit *net*.

Valeur

Pour un œil **sans défaut** (emmétrope), le PR est à **l'infini**.

On appelle **punctum proximum** (PP) le point objet **le plus proche** qu'un œil voit *net*.

Valeur

Pour un œil **sans défaut** (emmétrope), le PP est à $\approx 25 \text{ cm}$.

Schéma exemple

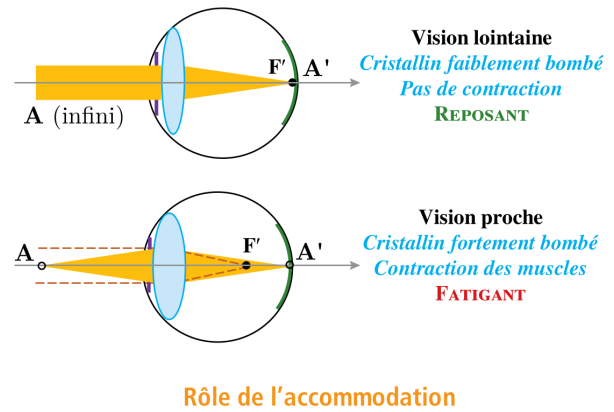


FIGURE 4.3 – Principe de l'accommodation d'un œil.

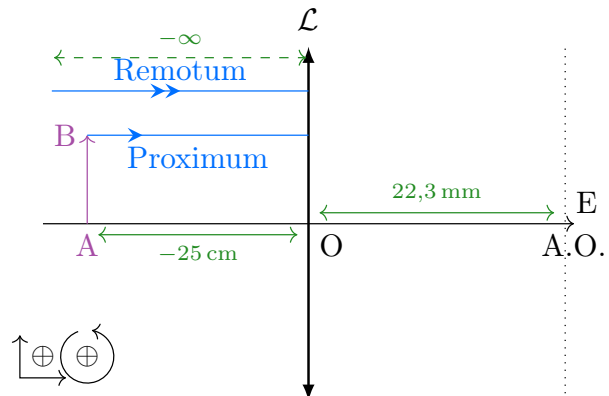
Exercice :

Quelles sont les valeurs maximale et minimale de la focale du cristallin pour un œil emmétrope ? On rappelle que la distance cristallin-rétine est $d \approx 22,3 \text{ mm}$.

Pour le remotum on a directement que la focale doit être égale à la distance cristallin-rétine, puisqu'un objet à l'infini se forme dans le plan focal image. Pour le proximum, on utilise la relation de conjugaison avec $A' = E$, $\overline{OA} = -25 \text{ cm}$ et on trouve f' :

$$\overline{OF'}_{\text{repos}} = 22,3 \text{ mm}, \quad \overline{OF'}_{\text{acco}} = \frac{\overline{OE} \overline{OA}}{\overline{OA} - \overline{OE}}$$

A.N. : $\overline{OF'}_{\text{acco}} = 21 \text{ mm}$



Réglage instrument optique

Le principe des instruments optiques est d'avoir de meilleures caractéristiques que l'œil humain, mais que l'image formée soit visible par un œil. Pour que cela se fasse sans fatigue,

L'image finale d'un instrument d'optique doit être à l'infini.

I.B.2 Résolution angulaire

Comme tout capteur, l'œil distingue deux points sources si leurs images se forment sur deux cellules différentes de la rétine. On caractérise cette capacité par le pouvoir de résolution.

Pouvoir de résolution

Le pouvoir de résolution (ou séparateur) d'un capteur optique est l'**angle minimal** que doivent former deux rayons pour être perçus comme provenant de **deux points différents**.

Résolution

Dans de bonnes conditions d'éclairage (luminosité moyenne), le pouvoir séparateur d'un œil emmétrope est $\alpha \approx 1' = 3 \times 10^{-4} \text{ rad}$. Cela revient à distinguer deux détails séparés de 1 mm à une distance de 3 m.

I.B.3 Défauts de l'œil

Défauts de l'œil

Myopie : cristallin **trop** convergent. P.R. pas à l'infini. Corrigé par lentille divergente.

Hypermétropie : cristallin **pas assez** convergent. P.P. plus éloigné que l'œil emmétrope. Corrigé avec lentille convergente.

Presbytie : les muscles du cristallin vieillissent et ont du mal à accommoder. Pour la faciliter, on utilise une lentille convergente.

Schéma

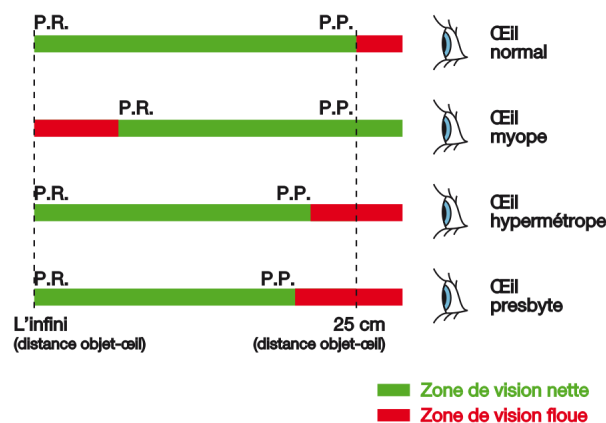


FIGURE 4.4 – Schéma des défauts de l'œil.

II La loupe

Le point le plus proche permettant une vision nette étant fixé (P.P.), pour mieux voir un objet, il faut utiliser un instrument : c'est ce que permet la loupe.

Effet loupe et accommodation

Pour obtenir l'effet loupe, il faut que l'objet soit situé entre le **centre optique** d'une lentille *convergente* et son **foyer objet** : on obtient alors une image **virtuelle, droite et agrandie**.

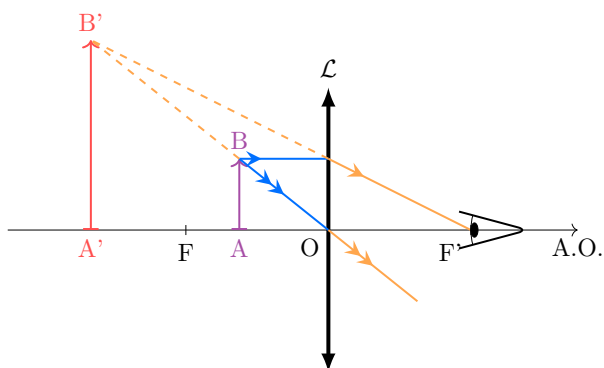


FIGURE 4.5 – Loupe avec accommodation

De plus, afin que l'œil puisse observer cette image sans accommodation, celle-ci doit être **à l'infini**. La meilleure position de l'objet est celle où il sera **sur le foyer principal objet**.

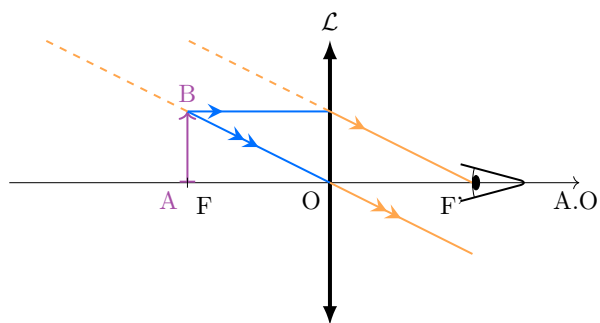


FIGURE 4.6 – Loupe sans accommodation

Exercice

L'image obtenue avec une loupe peut-elle être plus ou moins grande ? La distance objet-lentille joue-t-elle sur la taille de l'image observée ?

La réponse est non :

- ◇ Si on approche l'objet de la lentille, l'image devient moins grande (voir figure 4.7), mais elle est vue plus près ;
- ◇ Si on éloigne l'objet de la lentille (en gardant $|\overline{OA}| < |\overline{OF}|$), l'image devient plus grande (voir figure 4.7), mais elle est vue plus loin !

L'angle θ' défini sur cette figure est le même quel que soit le cas, il ne dépend que de la lentille : avec les dispositifs optiques, c'est cet angle qui est notre grandeur d'intérêt, plutôt que le grandissement transversal qui vaut pour une image sur un écran.

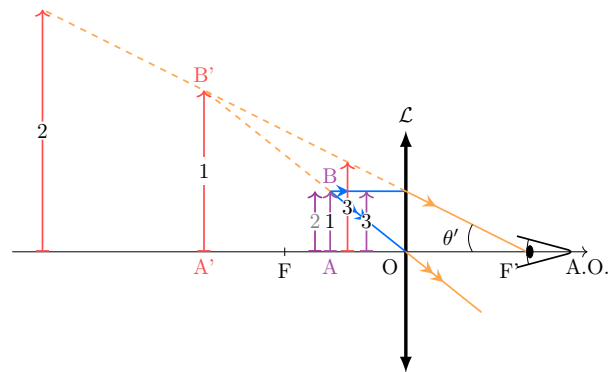


FIGURE 4.7 – Image obtenue avec une loupe dans plusieurs cas de distance objet-lentille

Grossissement

On définit alors le grossissement d'un dispositif optique par le rapport

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

Avec

- ◇ L'angle θ' sous lequel est vu l'image ;
- ◇ L'angle θ sous lequel est vu l'objet depuis l'œil à la distance de vision minimale de l'œil emmétrlope soit $d_m = 25 \text{ cm}$.

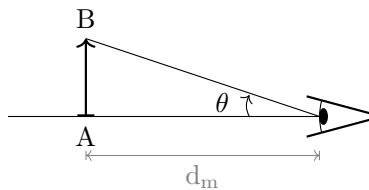


FIGURE 4.8 – Définition de θ

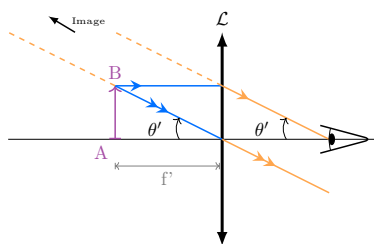


FIGURE 4.9 – Définition de θ'

Loupe et grossissement

Une loupe a un grossissement fixé, tel que

$$G = \frac{d_m}{f'}$$

Grossissement loupe

Avec les schémas 4.8 et 4.9, en appelant h la hauteur de l'objet et en supposant qu'on a des petits angles ($\tan(\theta) \approx \theta$), on a

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\frac{h}{f'}}{\frac{h}{d_m}} = \frac{d_m}{f'}$$

III L'appareil photo réflex

A Description

Définition et schéma

On appelle appareil photo réflex un appareil qui utilise un seul objectif pour la visée et pour la prise de vue. Pour se faire, l'appareil utilise un miroir plan incliné à 45° sur l'axe optique de l'objectif et un pentaprisme :

- ◇ Pour la visée, le miroir plan renvoie la lumière vers le pentaprisme qui la transmet à l'œil par l'intermédiaire du viseur ;
- ◇ Lorsque la photographie appuie sur le déclencheur, ce miroir plan pivote de façon à laisser passer la lumière vers le capteur.

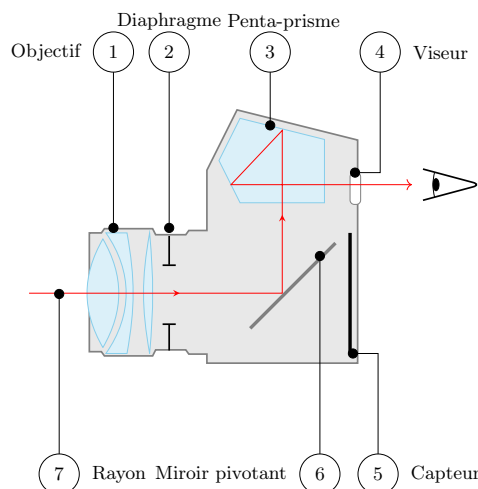


FIGURE 4.10 – Description d'un appareil photo réflex

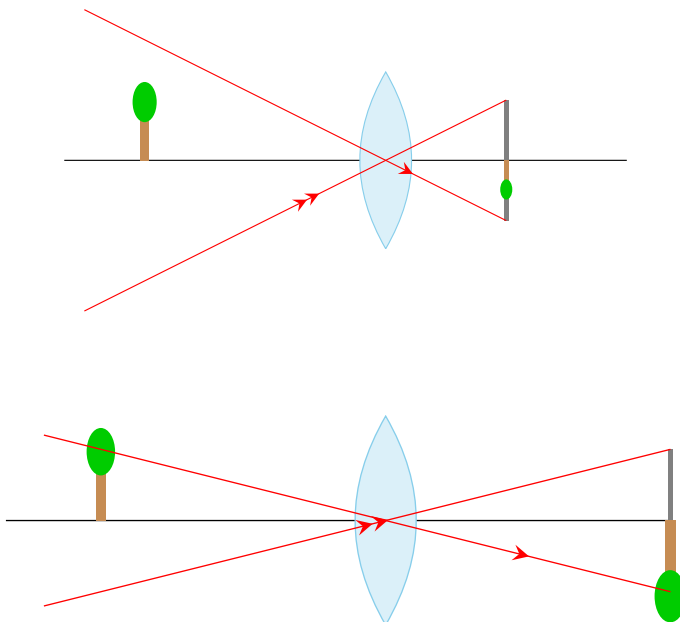
Attention

Dans le cadre de notre pratique d'optique en première année de CPGE, on modélisera simplement un appareil photo comme l'association d'une lentille et d'un écran mobile !

B Champ d'un appareil photo

III.B.1 Influence de la focale de l'objectif

Voici des photos prises du même endroit avec un appareil muni d'un unique capteur mais avec des objectifs de focales différentes. À droite le schéma illustrant chaque situation :



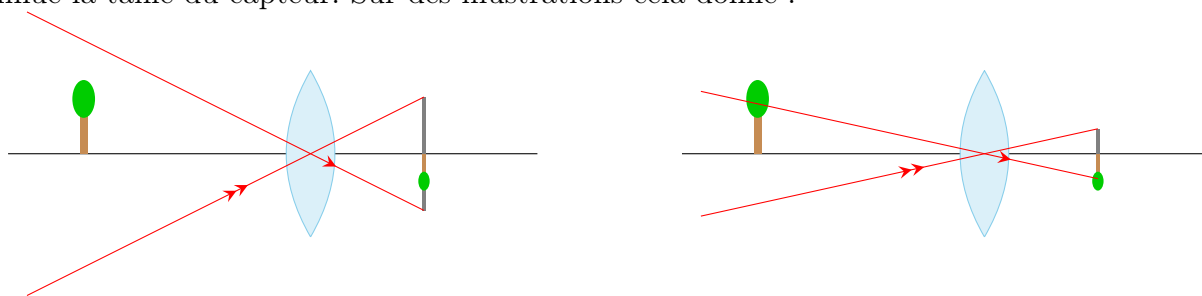
Influence focale

Plus la focale est grande, plus le champ est étroit, plus on capture un détail de l'image.

On dit que la première photo est prise avec un grand angle (focale courte, encombrement de l'appareil minimum), la deuxième est prise avec un téléobjectif (focale longue, encombrement important).

III.B.2 Influence de la taille du capteur

Voyons maintenant ce qu'il se passe si on garde une focale de 25 mm (première photo) mais que l'on diminue la taille du capteur. Sur des illustrations cela donne :

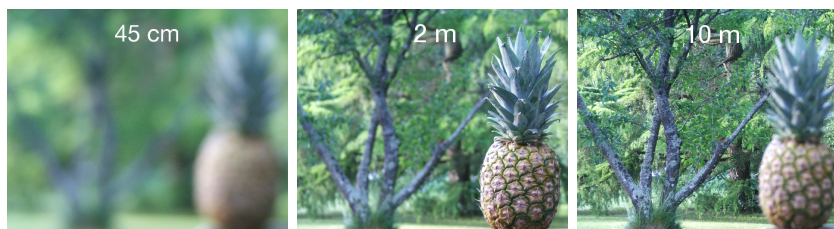


Remarque

Ainsi, grand angle ne signifie pas forcément courte focale, car cela dépend de la taille du capteur.

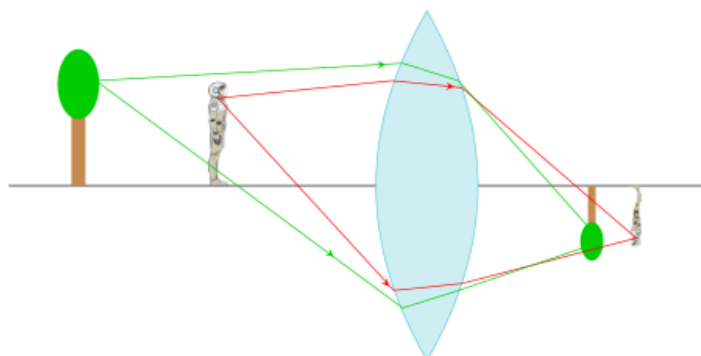
C La mise au point

Voici trois photos prises dans les mêmes conditions (même appareil, même focale, même endroit de prise de vue) mais avec trois mises au point différentes :

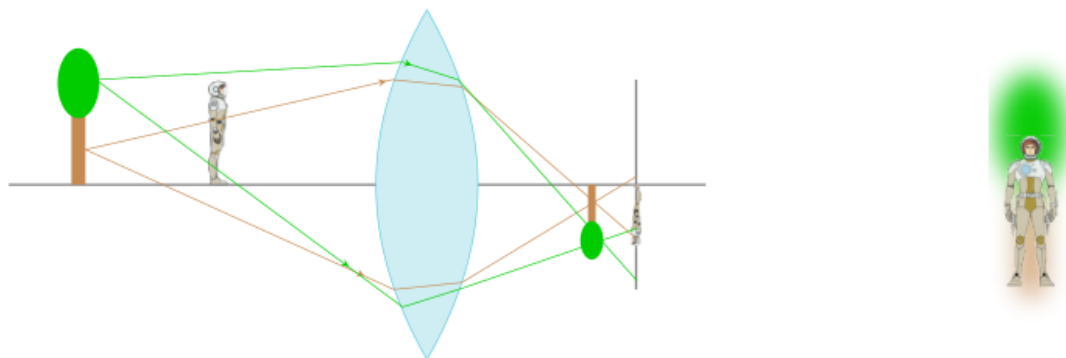


C'est elle qui détermine ce qui sera net sur la photo finale et ce qui ne le sera pas. On la règle donc de façon à **choisir le sujet** à photographier. Elle peut se régler automatiquement (souvent en appuyant à mi-course sur le déclencheur), ou bien manuellement via une bague qui tourne autour de l'objectif. Sur cette bague, la mise au point est gradué en mètres : « je veux faire la mise au point à 5 m de l'appareil ». Un objectif indique généralement les distances minimales et maximales de mise au point.

Prenons l'exemple d'une scène avec un humain situé devant un arbre :



Je dois choisir qui je veux photographier. Si je choisis l'humain, je dois placer mon capteur au niveau de l'image de l'humain, les points objets de l'arbre donneront des taches images, ce qui donnera un arrière plan composé d'un arbre flou.



Donc la bague de mise au point doit agir sur la position du capteur par rapport à l'objectif pour sélectionner l'image à « imprimer » (dans le cas de l'humain, je fais la mise au point sur un objet proche, je dois éloigner mon capteur de l'objectif). Sur les appareils basiques, il y a vraiment déplacement, sur de plus perfectionnés, des lentilles de l'objectif se déplacent pour obtenir la mise au point voulue.

D La profondeur de champ



Sur la première photo, nous voyons que le batracien est net, mais l'avant plan et l'arrière plan sont flous, la profondeur de champ est faible. Sur la deuxième, les sabots comme la tête de l'animal sont nets alors qu'ils ne sont pas situés sur le même plan : la profondeur de champ est grande.

Profondeur de champ

Profondeur de champ = distance entre les **deux points extrêmes** dont les **images sont vues nettes**.

III.D.1 Profondeur de champ et distance de mise au point

Profondeur de champ et mise au point

Plus la distance de mise au point est grande,
plus la profondeur de champ est grande.

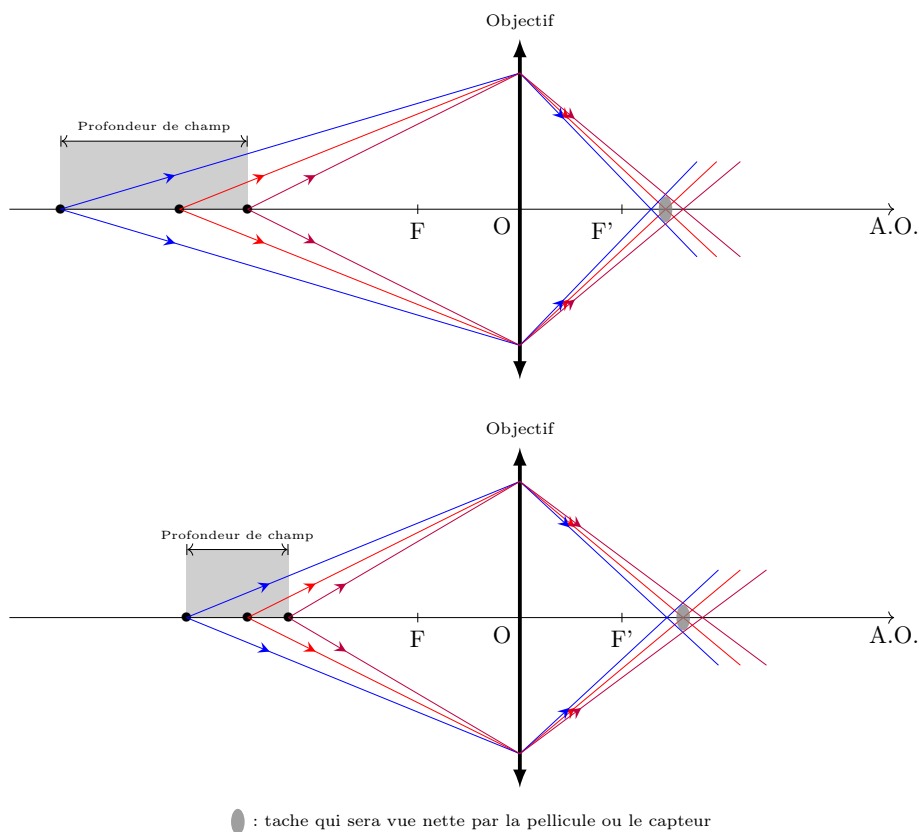


FIGURE 4.11

III.D.2 Profondeur de champ et focale

PdC et focale

Plus la focale est courte, plus la profondeur de champ est grande.

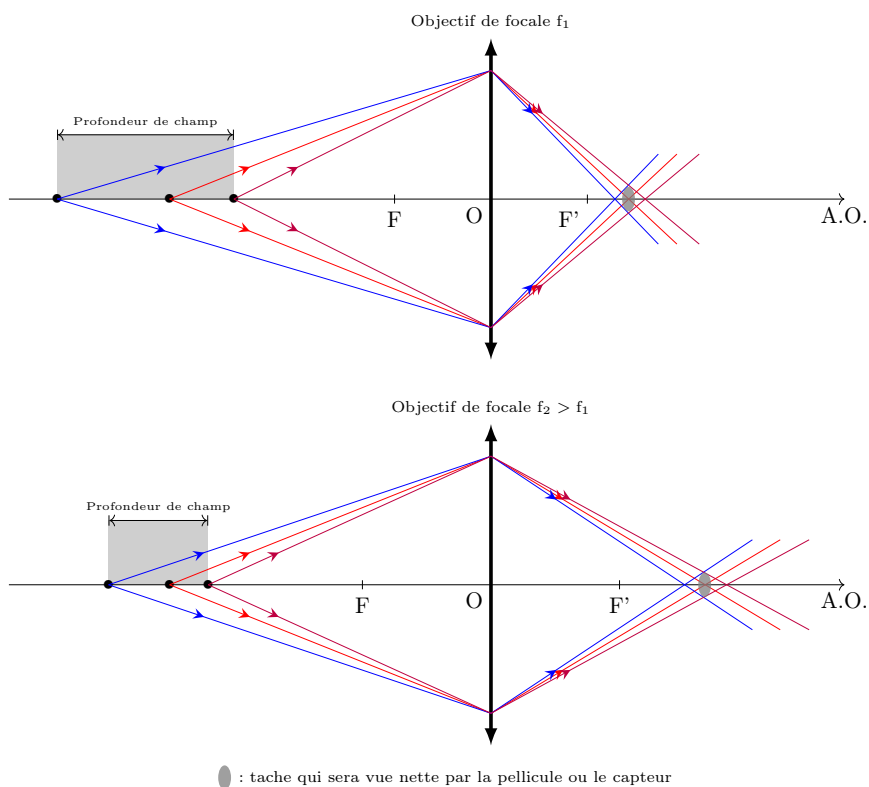


FIGURE 4.12

III.D.3 Profondeur de champ et ouverture

L'ouverture, c'est-à-dire le diamètre d'entrée de l'objectif, se règle à l'aide d'un diaphragme. Plus l'ouverture est petite et plus la profondeur de champ sera grande ; mais attention, la taille de l'ouverture influe sur la quantité de lumière qui imprégnera le capteur. Cette ouverture est indiquée en fonction de la focale de l'objectif : une ouverture de $\frac{f}{22}$ est plus petite qu'une ouverture de $\frac{f}{4}$.

Voici deux schémas qui montrent pourquoi la réduction de l'ouverture agrandit la profondeur de champ :

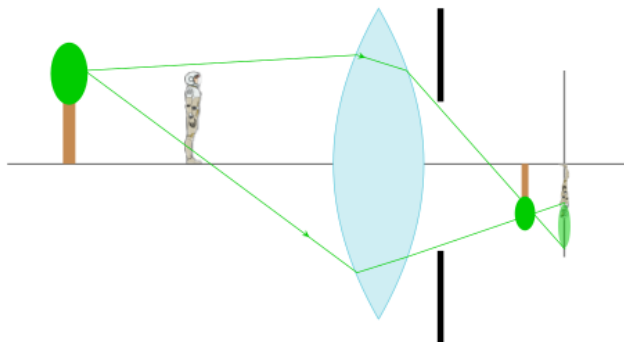


FIGURE 4.13

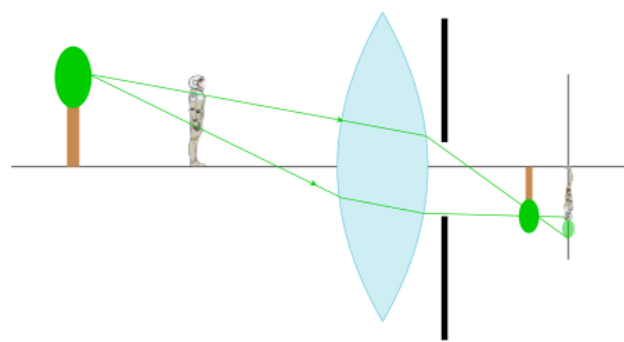


FIGURE 4.14

Avec un diaphragme ouvert, les feuilles des arbres créent une tache lumineuse assez large sur le capteur, et ne seront pas vues nettes.

En réduisant l'ouverture, cette tache est plus petite. Si elle est inférieure à la taille d'un pixel du capteur, les feuilles seront vues nettes.

L'objet qui donnera une tache aussi grosse que les feuilles d'arbre du premier schéma sera plus loin en avant ou en arrière de l'humain, la zone de netteté sera plus réduite.

III.D.4 Résumé et conclusion

Résumé caractéristiques appareil photo

- | | |
|--|--------------------------------|
| ◇ Focale ↗ ⇒ champ ↘ ; | ◇ Focale ↗ ⇒ PDC ↘ ; |
| ◇ Position capteur ↗ ⇒ mise au point ↘ ; | ◇ Position capteur ↗ ⇒ PDC ↘ ; |
| ◇ Taille capteur ↗ ⇒ champ ↗ ; | ◇ Ouverture ↗ ⇒ PDC ↘ . |

Typiquement, on utilise une profondeur de champ faible, donc une grande ouverture pour effectuer des portraits, et une profondeur de champ importante lorsqu'il s'agit de photographier un paysage. Mais en même temps que l'on règle celle-ci, il faut penser à régler le temps d'exposition du capteur (le temps pendant lequel le miroir plan du reflex pivotera), car la photo risquerait d'être sur-exposée (pour un portrait) ou sous-exposée (pour un paysage).

IV Systèmes optiques à plusieurs lentilles

A Association quelconque de lentilles

Les associations de lentilles ne présentent pas de difficultés particulières, une fois les techniques de construction maîtrisées. Il faut cependant savoir toujours se repérer dans les constructions.

IV.A.1 Entraînement

Association quelconque de lentilles convergentes

Deux lentilles minces convergentes \mathcal{L}_1 de centre optique O_1 et \mathcal{L}_2 de centre optique O_2 sont disposées selon le schéma ci-dessous. Trouver la position de l'image finale $A'B'$ de l'objet AB donnée par l'association $\mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2$, et donner la nature de tous les objets et images.

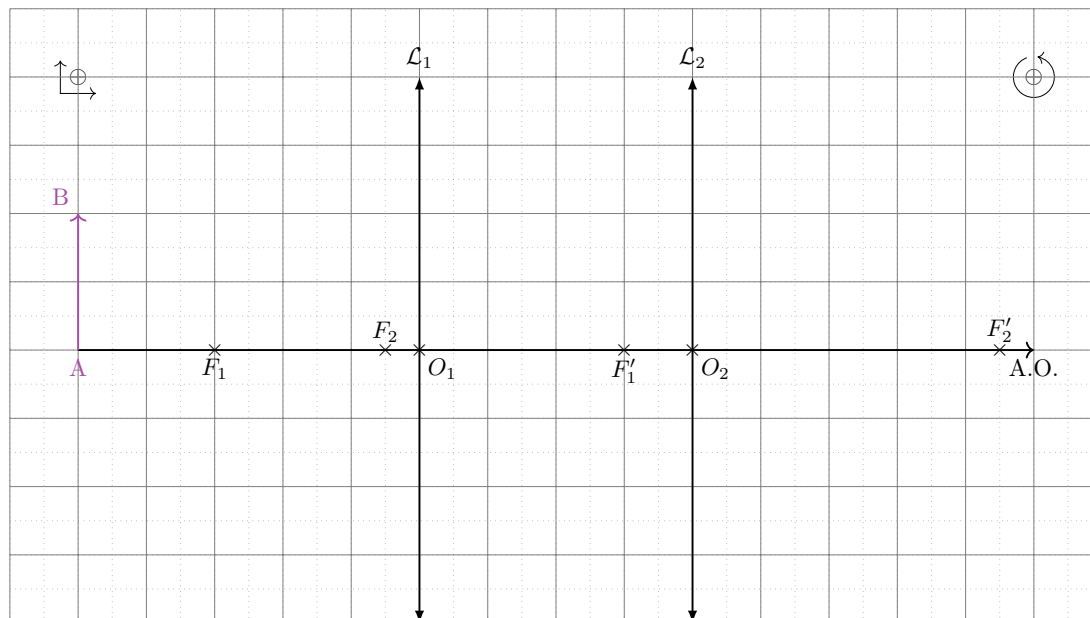


FIGURE 4.15 – Association de lentilles convergentes

Association quelconque de lentilles mixtes

Une lentille mince convergente \mathcal{L}_1 de centre optique O_1 et une divergente \mathcal{L}_2 de centre optique O_2 sont disposées selon le schéma ci-dessous. Trouver la position de l'image finale $A'B'$ de l'objet AB donnée par l'association $\mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2$, et donner la nature de tous les objets et images.

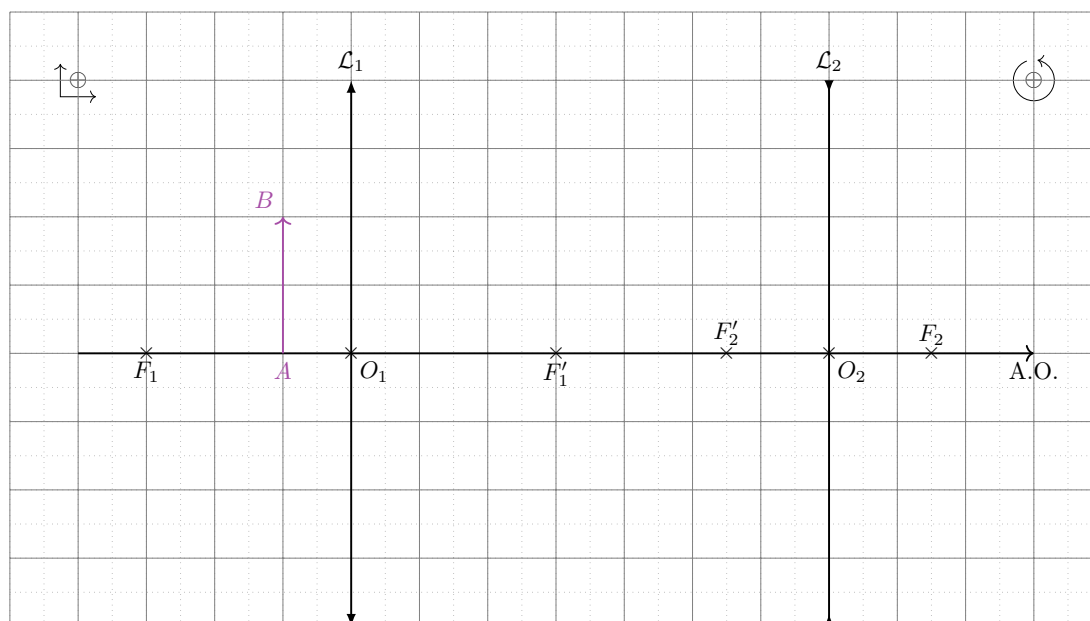


FIGURE 4.16 – Association de lentilles mixtes

Microscope

Un microscope est une association de deux lentilles convergentes qui donne une image à l'infini d'un objet à distance finie : $\overline{AB} \xrightarrow[\text{O}_1]{\mathcal{L}_1} \overline{A_1B_1} \xrightarrow[\text{O}_2]{\mathcal{L}_2} +\infty$

B Lunettes astronomiques

IV.B.1 Définition

On appelle lunette astronomique un système optique composé d'une lentille convergente appelée **objectif** (dirigée vers l'objet) et d'une lentille appelée **oculaire** (dirigée vers l'œil), telle qu'un **objet à l'infini donne une image à l'infini**.

On appelle ce type de système un système **afocal**. Une lunette est dite de **Kepler** si l'oculaire est **convergent**, et de **Galilée** s'il est **divergent**.

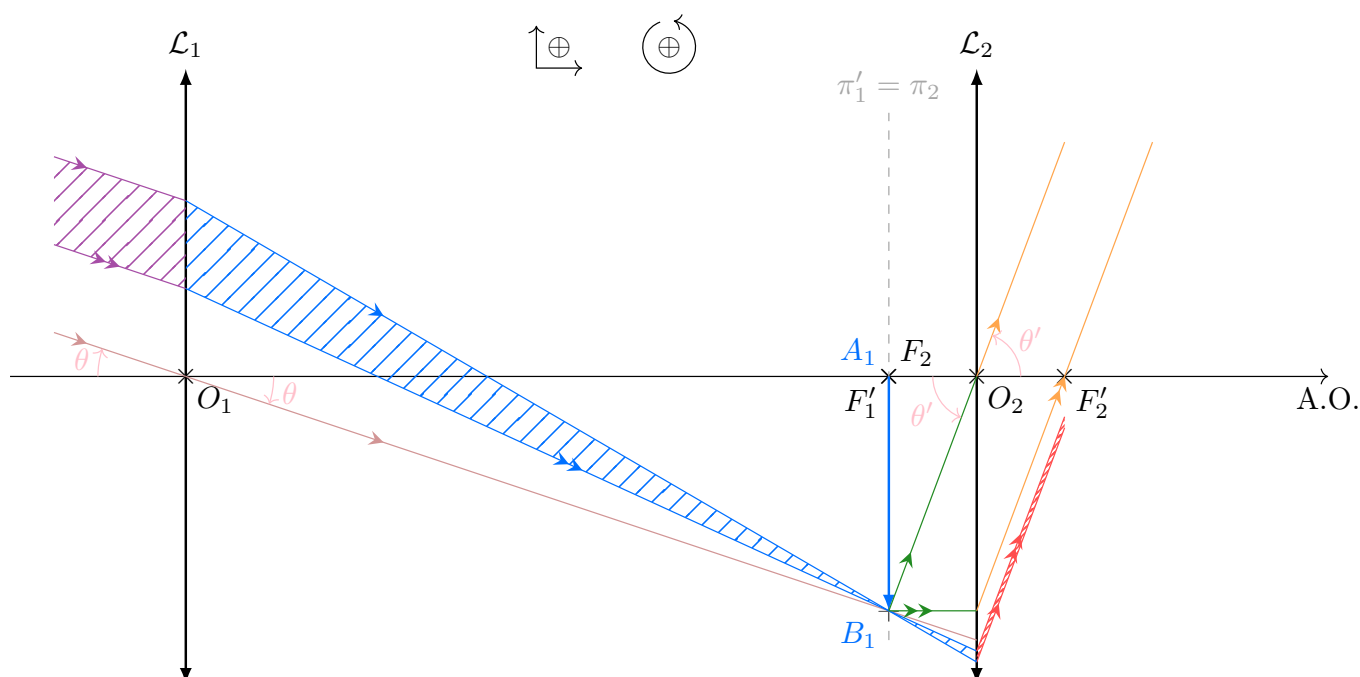


FIGURE 4.17 – Schéma d'une lunette de Kepler.

IV.B.2 Caractéristiques

Encombrement

On appelle *encombrement* la distance $\overline{O_1O_2}$ entre l'objectif et l'oculaire.

Calcul d'encombrement

Soit l'objectif \mathcal{L}_1 de centre O_1 et de vergence $V_1 = 3,125 \delta$, et l'oculaire \mathcal{L}_2 de centre O_2 et de vergence $V_2 = 25 \delta$. Quel est l'encombrement du système ?

Le système étant afocal, on a

$$\overline{AB} \xrightarrow[\text{O}_1]{\mathcal{L}_1} \overline{A_1B_1} \xrightarrow[\text{O}_2]{\mathcal{L}_2} \overline{A'B'}$$

$-\infty \xrightarrow{\text{A}_1 = \text{F}_1'} \text{A}' = +\infty$
 $\text{A}_1 = \text{F}_2$

$$\begin{aligned} \overline{O_1O_2} &= \overline{O_1F_1'} + \overline{F_2O_2} \\ &= f_1' + f_2' \\ &= \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \\ \overline{O_1O_2} &= 36 \text{ cm} \end{aligned}$$

Grossissement

Pour les lunettes, on a G tel que

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

Grossissement

À partir de la figure 4.17 et en considérant des petits angles, on a $\theta' = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2F_2}}$, et $\theta = \frac{\overline{AB}}{\overline{O_1F'_1}}$; ainsi, comme $G = \frac{\theta'}{\theta}$, et que $\overline{O_2F_2} = -f'_2$, on a directement le résultat.

Grossissement

Comme on s'intéresse à des points à l'infini, c'est le **grossissement** qui nous intéresse. Cette équation est la même pour les deux lunettes, mais $f'_2 < 0$ pour une **lentille divergente** : l'une donne donc une image droite et l'autre renversée.

Cercle oculaire

On appelle **cercle oculaire** l'image de la monture de l'objectif donnée par l'oculaire.

Utilité du cercle oculaire

Il correspond à la section la plus étroite du faisceau sortant de l'oculaire, où l'œil reçoit le maximum de lumière.

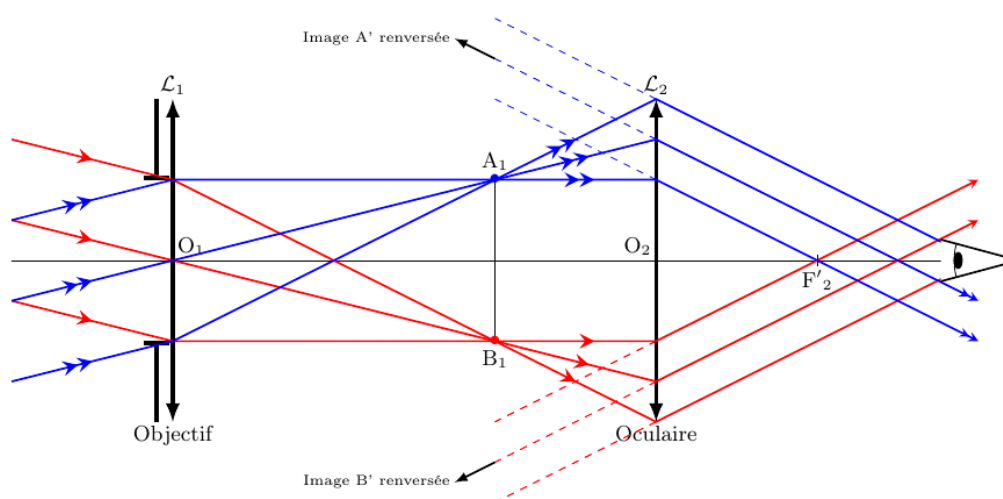
Lunette et cercle oculaire

FIGURE 4.18 – Images de 2 points objets à l'infini.

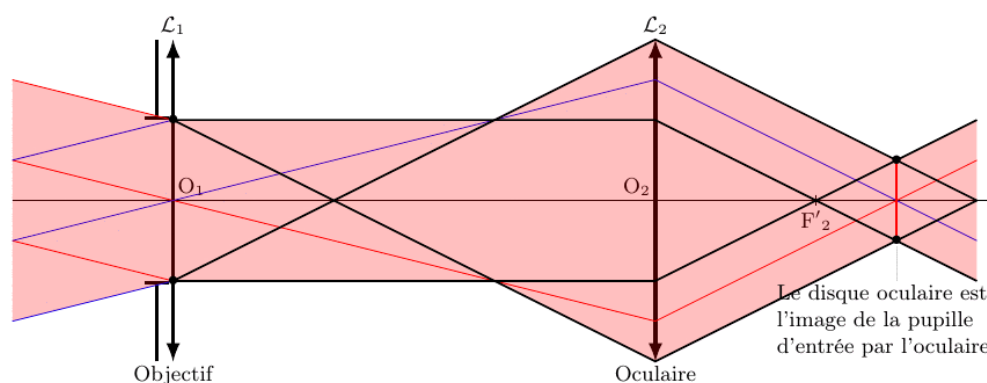


FIGURE 4.19 – Schématisation du cercle oculaire.

Association quelconque de lentilles

Corrigé

Association quelconque de lentilles convergentes

On schématise l'association par $\overline{AB} \xrightarrow[\mathcal{O}_1]{\mathcal{L}_1} \overline{A_1B_1} \xrightarrow[\mathcal{O}_2]{\mathcal{L}_2} \overline{A'B'}$. On part d'un objet réel pour avoir $\overline{A_1B_1}$ image réelle pour \mathcal{L}_1 mais objet virtuel pour \mathcal{L}_2 , et finalement $\overline{A'B'}$ image réelle.

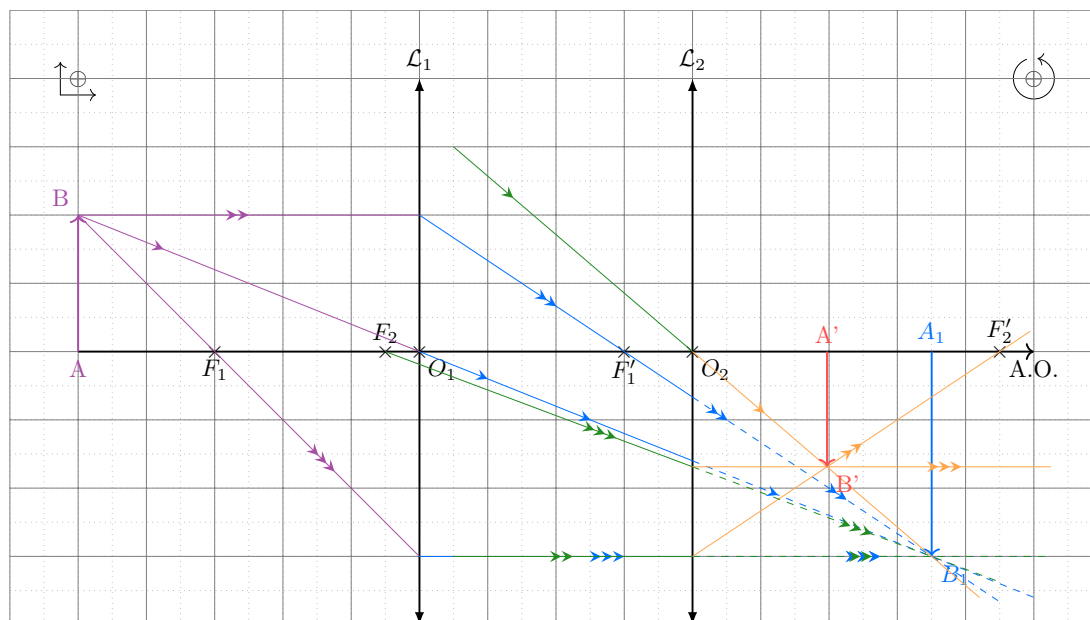


FIGURE 4.20 – Association de lentilles convergentes

Association quelconque de lentilles mixtes

On schématise l'association par $\overline{AB} \xrightarrow[\mathcal{O}_1]{\mathcal{L}_1} \overline{A_1B_1} \xrightarrow[\mathcal{O}_2]{\mathcal{L}_2} \overline{A'B'}$. On part d'un objet réel pour avoir $\overline{A_1B_1}$ image virtuelle pour \mathcal{L}_1 mais objet réel pour \mathcal{L}_2 , et finalement $\overline{A'B'}$ image virtuelle.

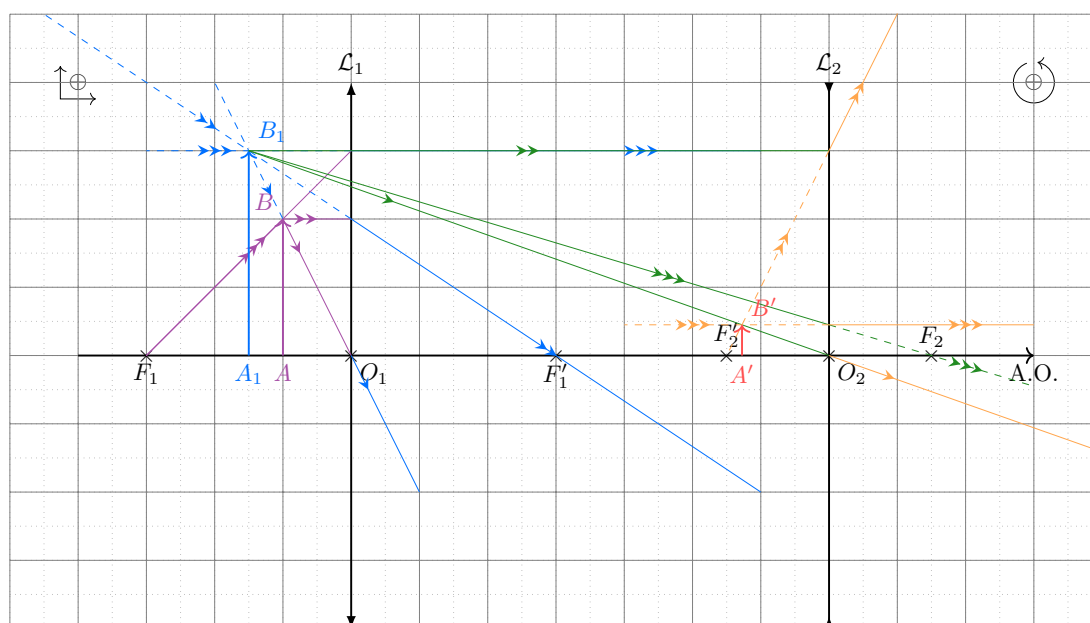


FIGURE 4.21 – Association de lentilles mixtes