

Dispositifs optiques

Sommaire

I Œil	3
I/A Présentation et modélisation	3
I/B Caractéristiques	3
II La loupe	5
II/A Fonctionnement	6
II/B Propriétés	7
III L'appareil photo	7
III/A Description	7
III/B Champ d'un appareil photo	8
III/C La mise au point	9
III/D La profondeur de champ	10
IV Systèmes optiques à plusieurs lentilles	12
IV/A Association quelconque de lentilles	12
IV/B Lunettes astronomiques	13

✂ Capacités exigibles

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur plan fixe. <input type="checkbox"/> Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation. <input type="checkbox"/> Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur. | <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné. <input type="checkbox"/> Étudier l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image. |
|---|--|

 ✓ L'essentiel

 📖 Définitions

<input type="checkbox"/> O4.1 : Modèle de l'œil	3
<input type="checkbox"/> O4.2 : Punctum remotum, proximum	3
<input type="checkbox"/> O4.3 : Résolution	4
<input type="checkbox"/> O4.4 : Défauts de l'œil	5
<input type="checkbox"/> O4.5 : Effet loupe et accommodation	6
<input type="checkbox"/> O4.6 : Grossissement	7
<input type="checkbox"/> O4.7 : Appareil photo	7
<input type="checkbox"/> O4.8 : Grain et tirage	8
<input type="checkbox"/> O4.9 : Profondeur de champ	10
<input type="checkbox"/> O4.10 : Ouverture	11
<input type="checkbox"/> O4.11 : Microscope	13
<input type="checkbox"/> O4.12 : Lunettes astronomiques	13
<input type="checkbox"/> O4.13 : Système afocal	13
<input type="checkbox"/> O4.14 : Encombrement	14
<input type="checkbox"/> O4.15 : Cercle oculaire	14

 ⚙️ Propriétés

<input type="checkbox"/> O4.1 : Grossissement loupe	7
<input type="checkbox"/> O4.2 : Grossissement lunette	14

 ☰ Démonstrations

<input type="checkbox"/> O4.1 : Grossissement loupe	7
<input type="checkbox"/> O4.2 : Grossissement lunette	14

 ✍️ Applications

<input type="checkbox"/> O4.1 : Distances focales extrêmes	4
<input type="checkbox"/> O4.2 : Yeux myope et hypermétrope	5
<input type="checkbox"/> O4.4 : Association lentilles convergentes	12
<input type="checkbox"/> O4.5 : Association lentilles mixtes	13
<input type="checkbox"/> O4.6 : Calcul d'encombrement	14

 ❤️ Points importants

<input type="checkbox"/> O4.1 : Influence focale	8
<input type="checkbox"/> O4.2 : PdC. et mise au point	10
<input type="checkbox"/> O4.3 : PdC et focale	11
<input type="checkbox"/> O4.4 : Résumé carac. appareil photo	12

 ⚠️ Erreurs communes

<input type="checkbox"/> O4.1 : Différence avec un œil	8
--	---

I Œil

I/A Présentation et modélisation

Un œil est constitué de trois parties :

♥ Notation O4.1 : Vocabulaire

- ◇ L'**iris**, partie colorée, est percé 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).

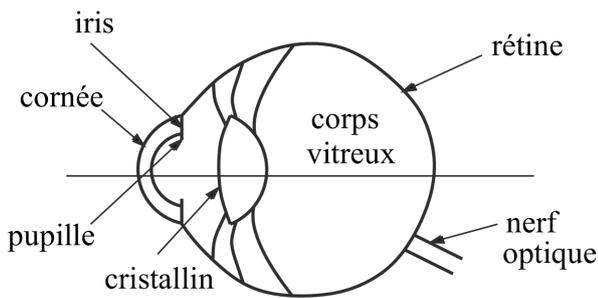


FIGURE 4.1 – Structure de l'œil.

♥ Définition O4.1 : 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.

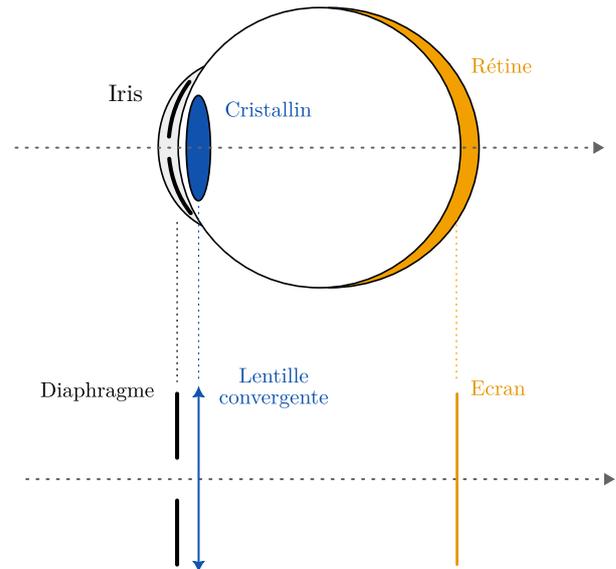


FIGURE 4.2 – Modèle de l'œil en optique.

I/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.

♥ Définition O4.2 : 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 cm**.

Exemple O4.1 : Accommodation

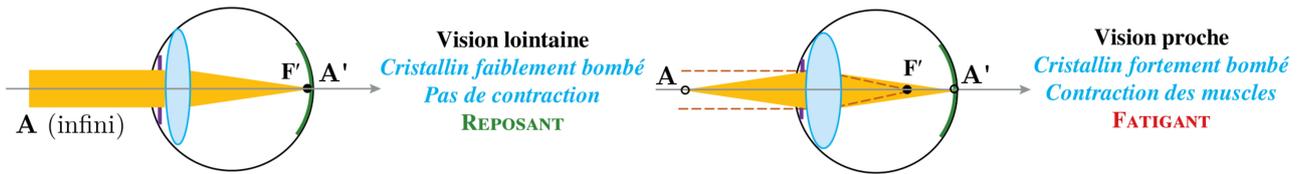


FIGURE 4.3 – Principe de l'accommodation d'un œil.

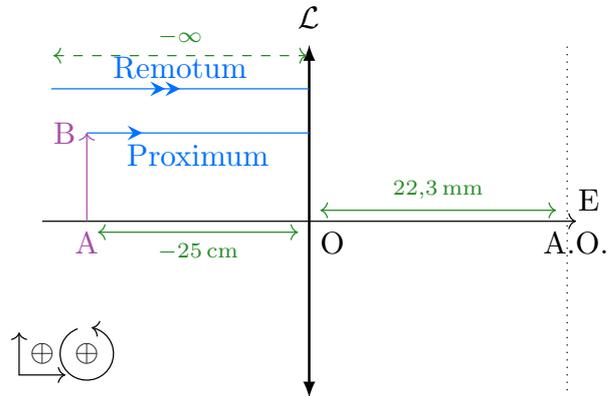
♥ Application O4.1 : Distances focales extrêmes

Quelles sont les valeurs maximale et minimale de la focale du cristallin pour un œil emmétrope ? On rappelle que la distance cristallin-rétine est $d \approx 22,3$ 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 $A' = E$, $\overline{OA} = -25$ 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. : $\overline{OF}'_{\text{acco}} = 21 \text{ mm}$



♥ Implication O4.1 : 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.

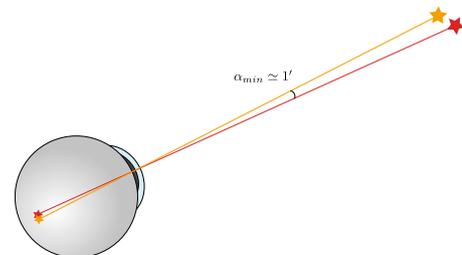
I/B) 2 Résolution angulaire

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.

♥ Définition O4.3 : 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**.

Exemple O4.2 : Résolution d'étoiles



♥ Ordre de grandeur O4.1 : 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 Défaits de l'œil

♥ Définition O4.4 : Défaits de l'œil

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

Hypermétropie : cristallin **pas assez** convergent. PP 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.

Exemple O4.3 : PR et PP selon défaut

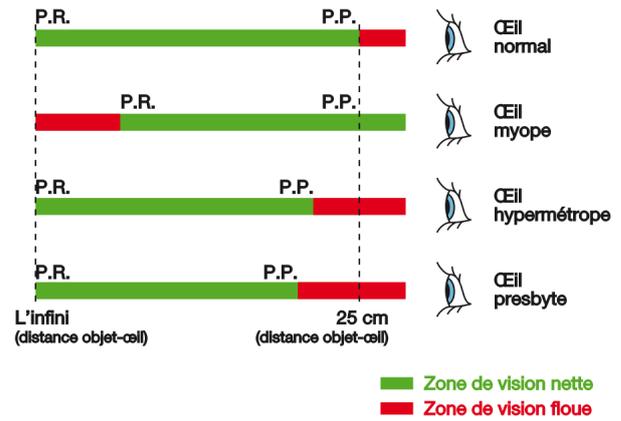


FIGURE 4.4 – Schéma des défauts de l'œil.

♥ Application O4.2 : Yeux myope et hypermétrope

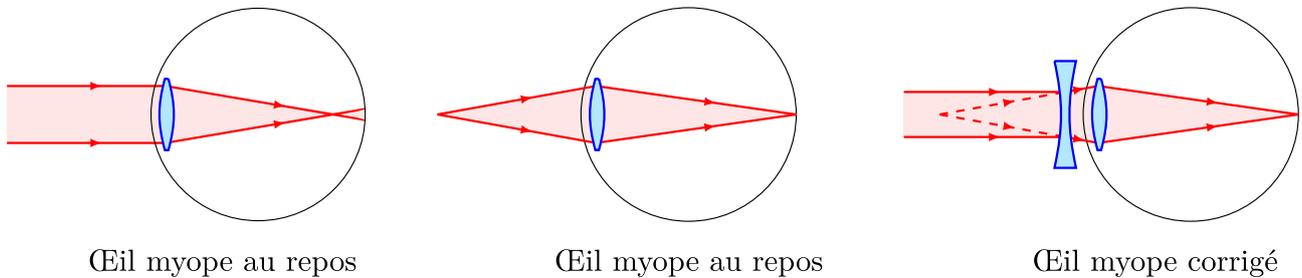


FIGURE 4.5 – Représentations d'un œil myope.

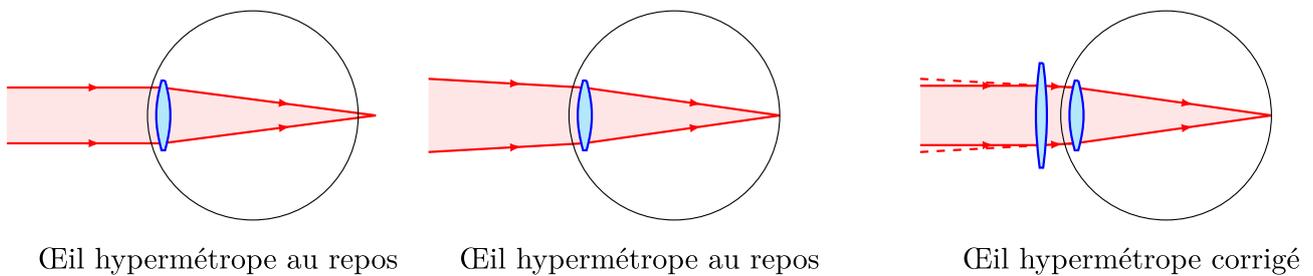


FIGURE 4.6 – Représentations d'un œil hypermétrope.

II La loupe

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

II/A Fonctionnement

♥ Définition O4.5 : 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**.

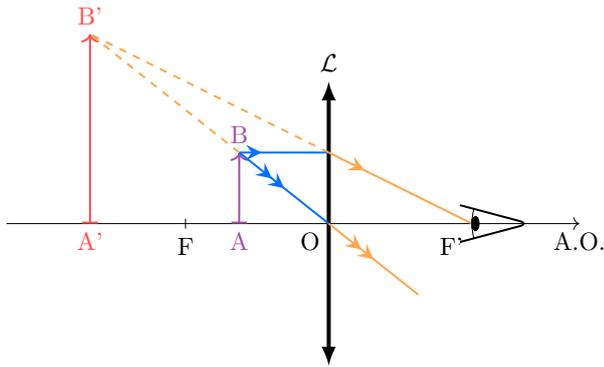


FIGURE 4.7 – Loupe avec accommodation

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**.

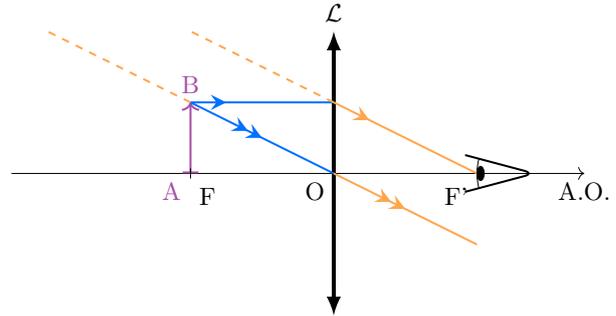


FIGURE 4.8 – Loupe sans accommodation

Application O4.3 : Loupe et taille d'une image

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 4.9), 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 4.9), 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.

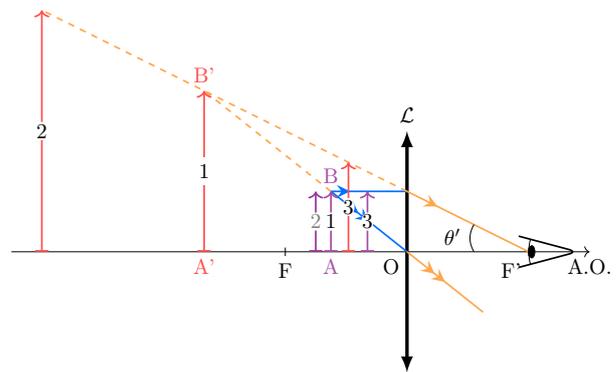


FIGURE 4.9 – Image obtenue avec une loupe dans plusieurs cas de distance objet-lentille

II/B Propriétés

♥ Définition O4.6 : 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 emmétrope soit $d_m = 25$ cm.

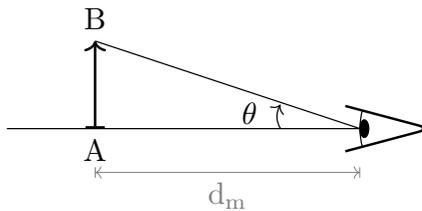


FIGURE 4.10 – Définition de θ

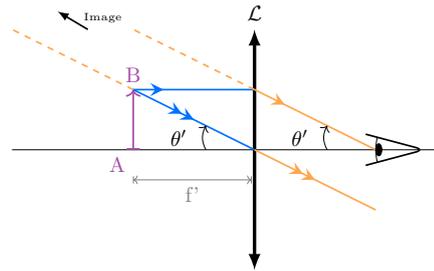


FIGURE 4.11 – Définition de θ'

♥ Propriété O4.1 : Grossissement

Une loupe a un grossissement fixé, tel que

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

♥ Démonstration O4.1 : Grossissement

Avec les schémas 4.10 et 4.11, 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

III/A Description

♥ Définition O4.7 : Appareil photo

On modélise un appareil photo par :

- ◇ Un diaphragme noté (D), de diamètre D ;
- ◇ Une lentille convergente notée (L), de focale f' ;
- ◇ Un capteur numérique matrice de cellules photosensibles (*pixels*), à distance d de (L).

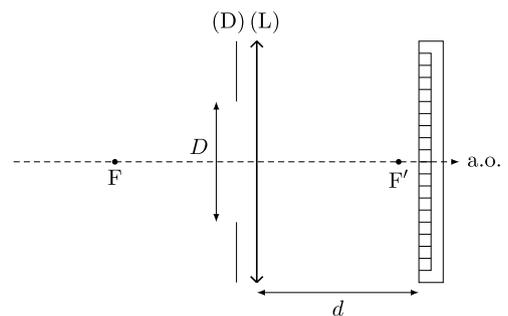


FIGURE 4.12 – Modèle d'appareil photo.

♥ Attention O4.1 : Différence avec un œil

- ◇ Pour l'œil, l'écran est fixe mais la focale est variable ;
- ◇ Pour l'appareil photo, la focale est fixe mais l'écran se déplace.

La distance objectif-captur, notée d , varie entre f' (pour viser à l'infini) et $f' + \delta$ (pour viser au plus proche).

♥ Définition O4.8 : Grain et tirage

Grain

On appelle **grain** la **taille d'un pixel**.
La surface du capteur s'exprime en termes de pixels (32×40 par exemple).

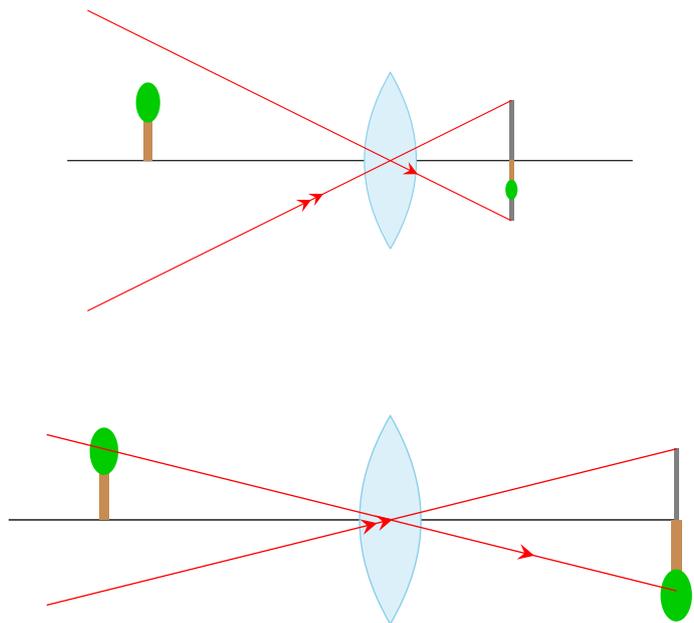
Tirage

On appelle **tirage** la **distance maximale de mouvement de l'écran**, soit δ .

III/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 :



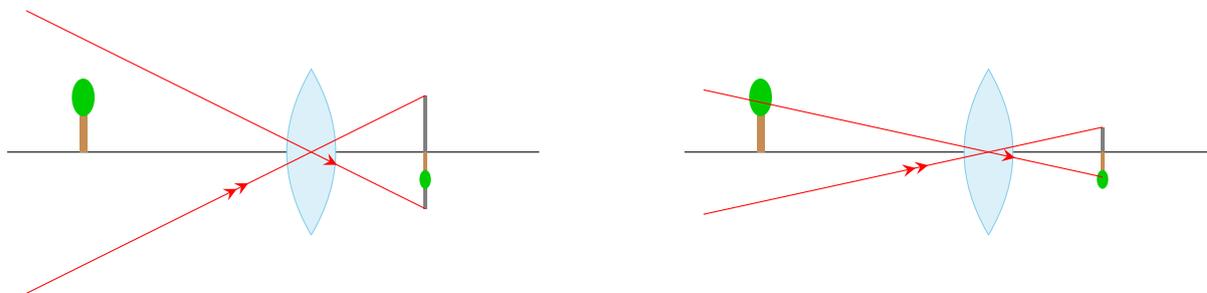
♥ Important O4.1 : Influence focale

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 :

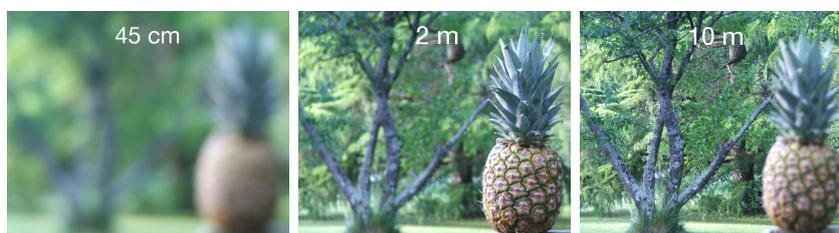


Remarque

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

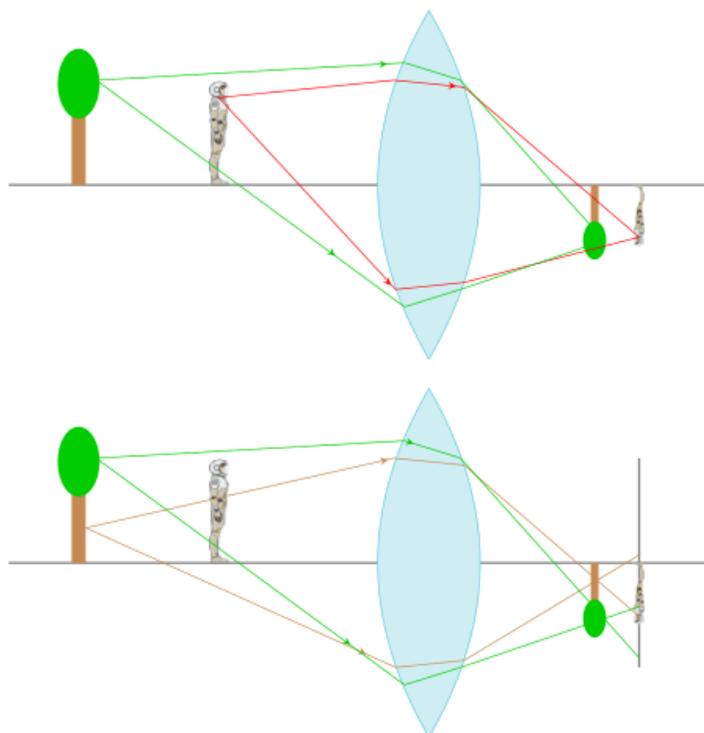
III/C La mise au point

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, 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

III/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.

♥ Définition O4.9 : 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

♥ Important O4.2 : Profondeur de champ et mise au point

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

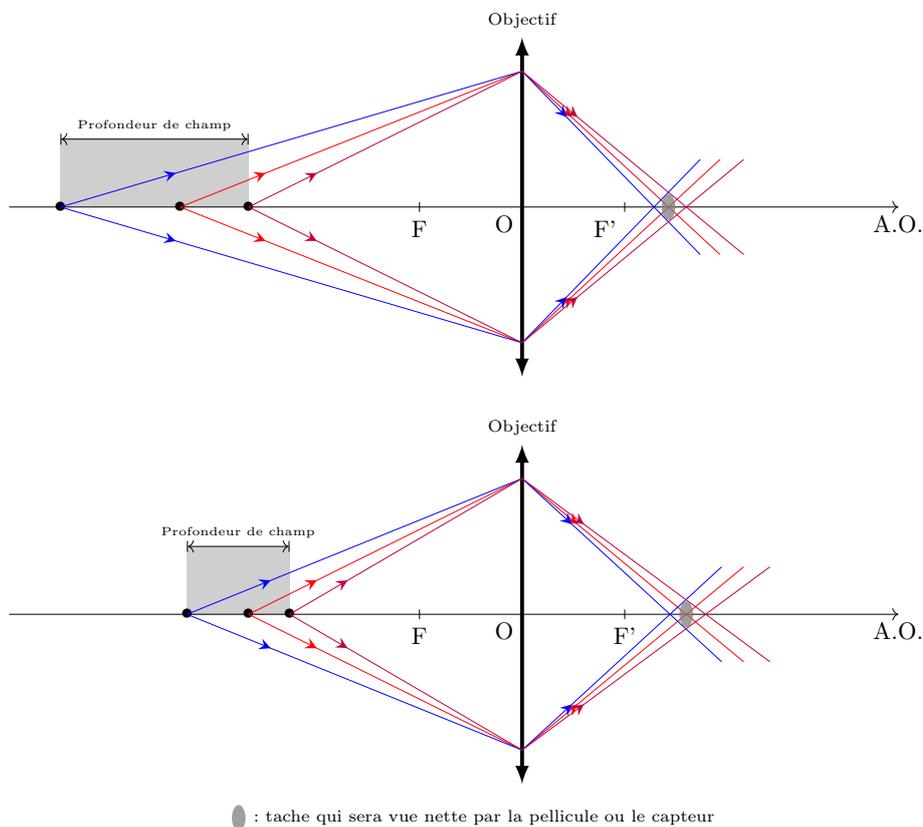


FIGURE 4.13

III/D) 2 Profondeur de champ et focale

♥ Important O4.3 : PdC et focale

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

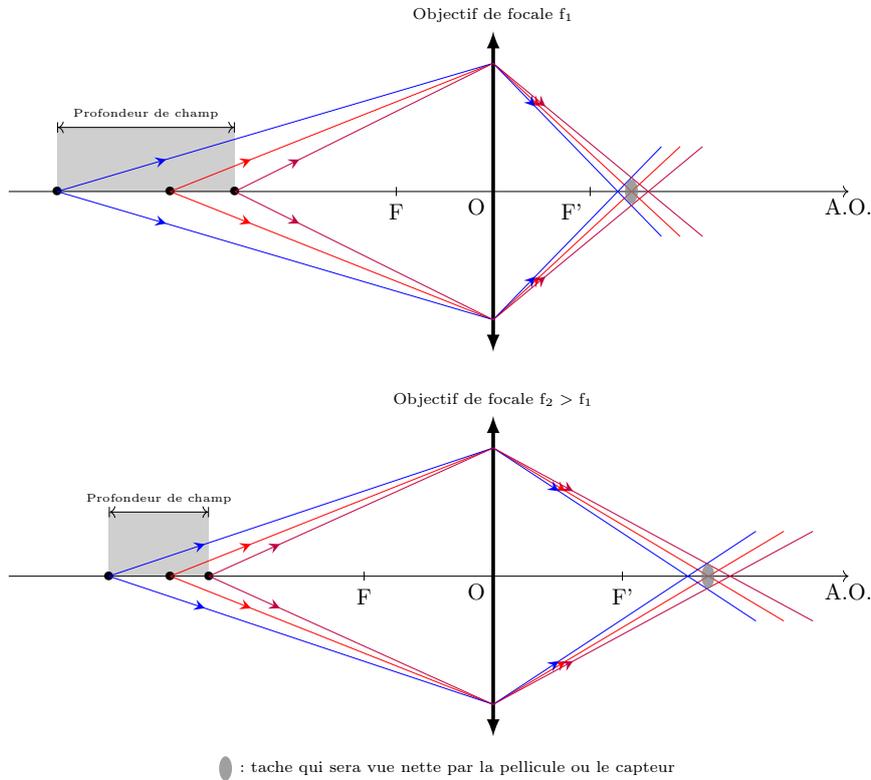


FIGURE 4.14

III/D) 3 Profondeur de champ et ouverture

♥ Définition O4.10 : Ouverture

L'ouverture se règle à l'aide d'un diaphragme. On la caractérise par le **nombre d'ouverture**

$$N = \frac{f'}{D}$$

avec D le diamètre du diaphragme.



FIGURE 4.15 – Exemples d'ouvertures.

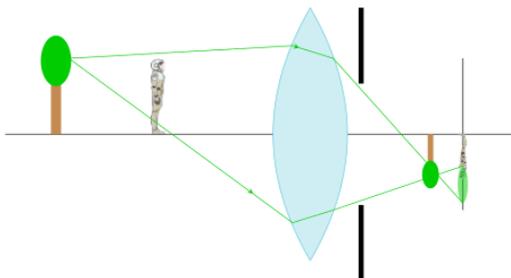


FIGURE 4.16 – Grande ouverture.

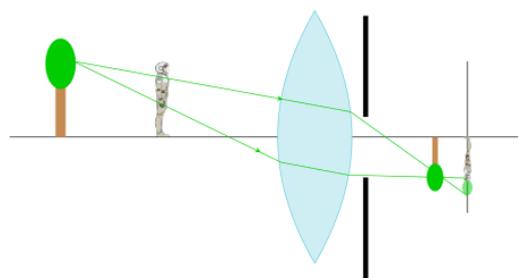


FIGURE 4.17 – Petite ouverture.

Les feuilles des arbres créent une tache lumineuse assez large sur le capteur, et ne seront pas nettes.

En réduisant l'ouverture, cette tache est plus petite. Les feuilles seront plus nettes.

♥ Application O4.5 : Association 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.

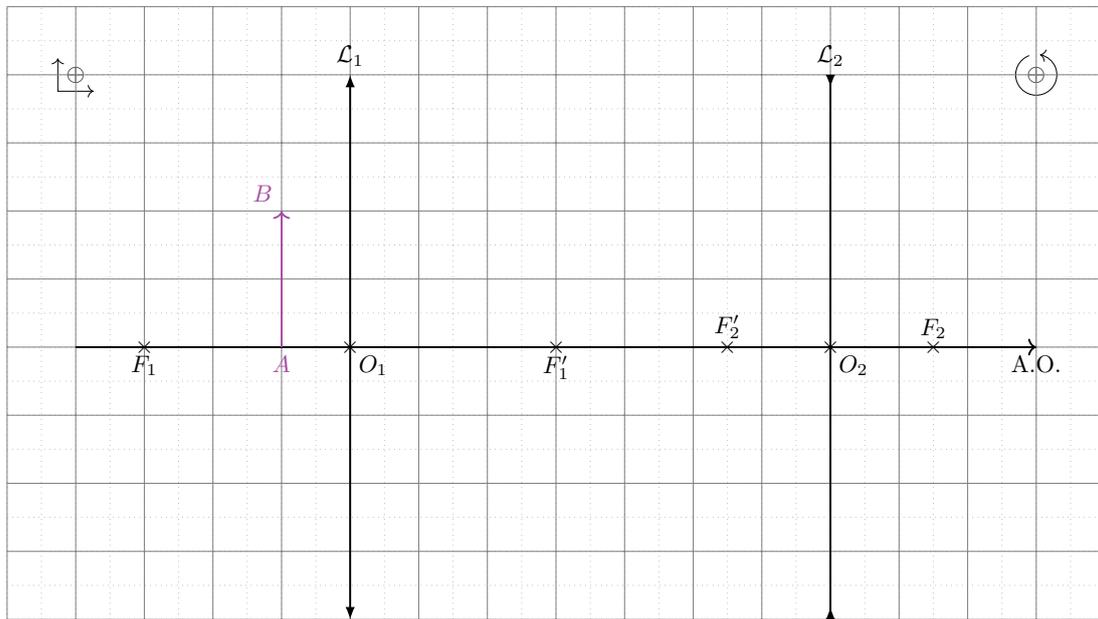


FIGURE 4.19 – Association de lentilles mixtes

♥ Définition O4.11 : Microscope

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

IV/B Lunettes astronomiques

IV/B) 1 Définition

♥ Définition O4.12 : Lunettes astronomiques

Système optique **afocal** composé :

- ◇ D'un **objectif**, lentille convergente;
- ◇ D'un **oculaire**, soit convergent (KEPLER) soit divergent (GALILÉE), où l'on place l'œil.

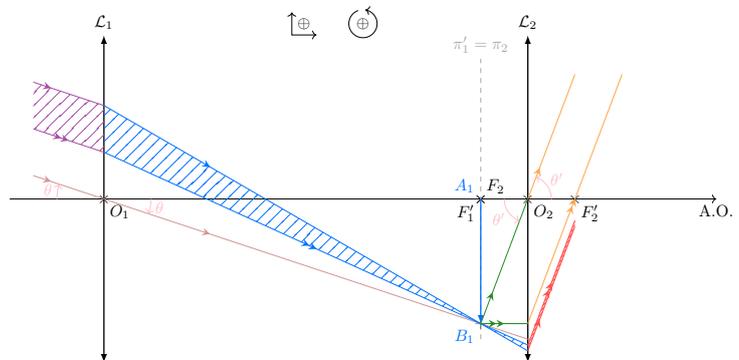


FIGURE 4.20 – Schéma d'une lunette de Kepler.

♥ Définition O4.13 : Système afocal

Par un système afocal, un **objet à l'infini** donne une **image à l'infini**.

IV/B) 2 Caractéristiques

♥ Définition O4.14 : Encombrement

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

♥ Application O4.6 : 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

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

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

$$\begin{aligned} \overline{O_1O_2} &= \overline{O_1F'_1} + \overline{F_2O_2} \\ &= f'_1 + f'_2 \\ &= \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \\ \overline{O_1O_2} &= 36 \text{ cm} \end{aligned}$$

♥ Propriété O4.2 : Grossissement

Pour les lunettes, on a G tel que

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

♥ Démonstration O4.2 : Grossissement^t

Avec la figure 4.20 et des petits angles :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2F_2}}}{\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1F'_1}}}$$

Or $\overline{O_2F_2} = -f'_2$, d'où le résultat.

♥ Remarque O4.1 : Grossissement des lunettes

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.

♥ Définition O4.15 : Cercle oculaire

On appelle **cercle oculaire** l'image de la monture de l'objectif donnée par l'oculaire. C'est là que le maximum de rayons se croisent, l'œil y reçoit le **maximum de lumière**.

♥ Exemple O4.4 : Lunette et cercle oculaire

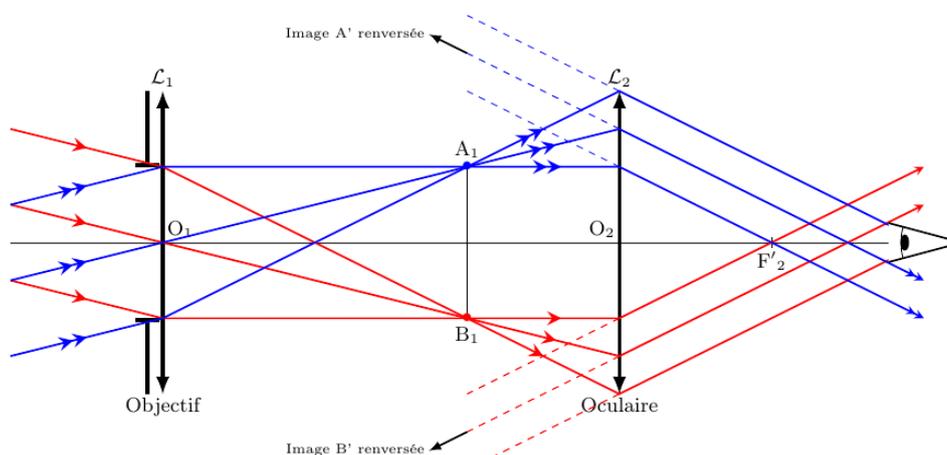


FIGURE 4.21 – Images de 2 points objets à l'infini.

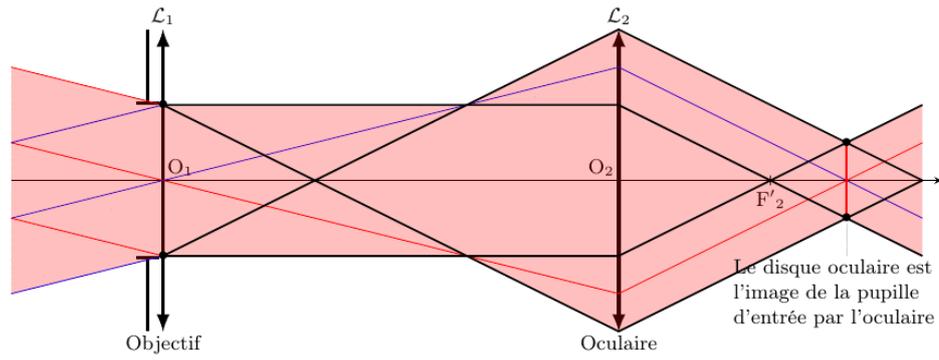


FIGURE 4.22 – Schématisation du cercle oculaire.

Association quelconque de lentilles – corrigé

Association 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.

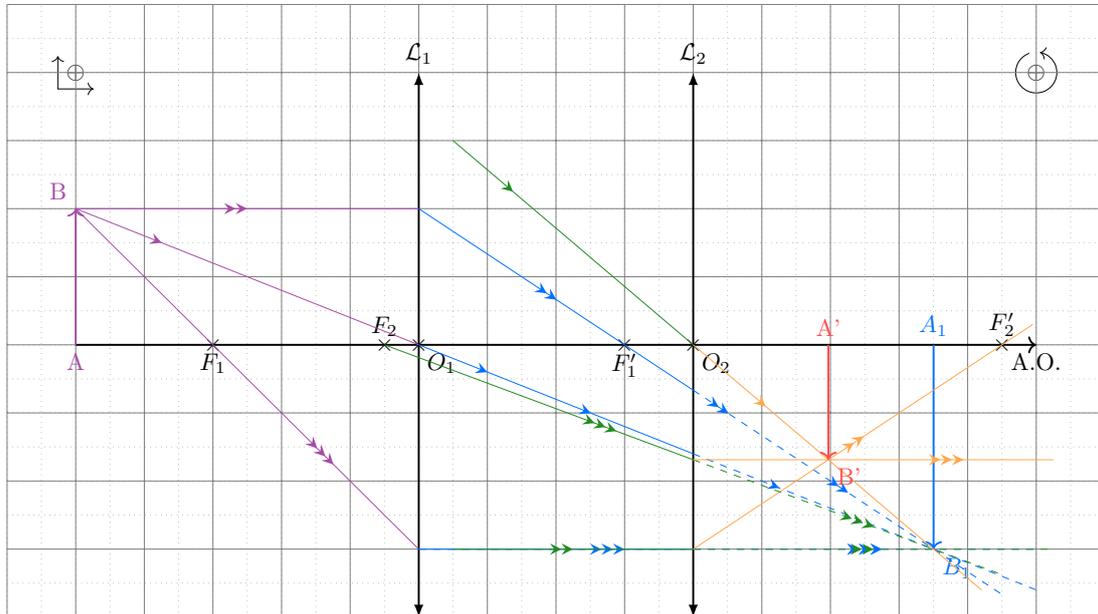


FIGURE 4.23 – Association de lentilles convergentes

Association 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.

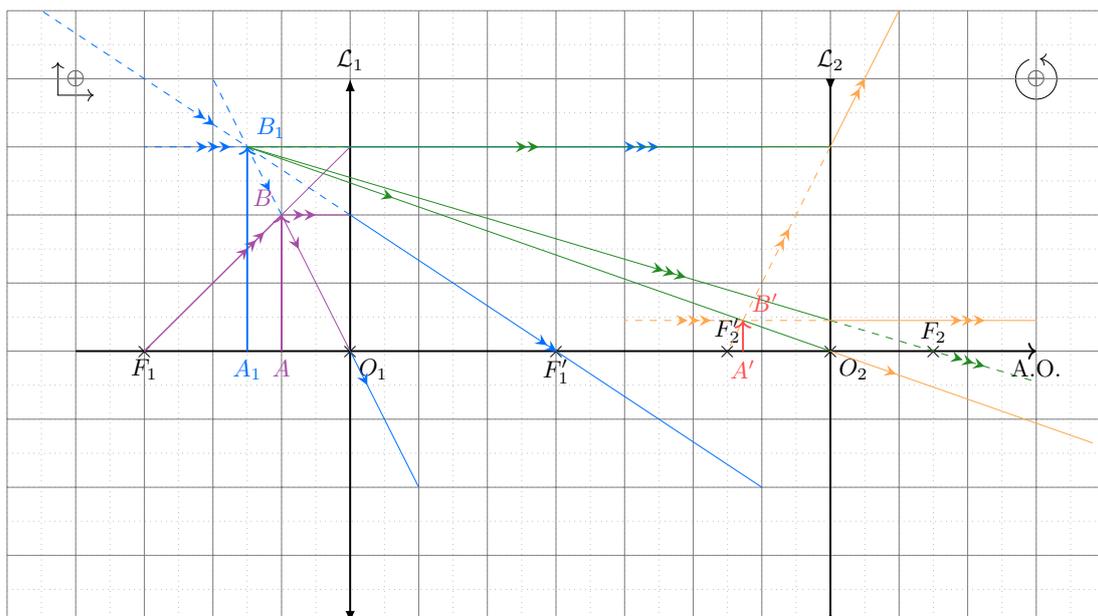


FIGURE 4.24 – Association de lentilles mixtes