

Dispositifs optiques

Sommaire

I Œil	2
I/A Présentation et modélisation	2
I/B Caractéristiques	2
II La loupe	4
II/A Présentation	4
II/B Caractéristique	4
III L'appareil photo	5
III/A Présentation et modélisation	5
III/B Champ d'un appareil photo	6
III/C Mise au point et profondeur de champ	6
III/D Durée d'exposition et ouverture	8
IV Systèmes optiques à plusieurs lentilles	9
IV/A Association quelconque de lentilles	9
IV/B Lunettes astronomiques	10

Capacités exigibles

- ☐ 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.
- ☐ 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.

L'essentiel

Définitions

☐ O4.1 : Modèle de l'œil	2
☐ O4.2 : Punctum remotum, proximum	2
☐ O4.3 : Taille apparente et résolution	3
☐ O4.4 : Défauts de l'œil	3
☐ O4.5 : Effet loupe et accommodation	4
☐ O4.6 : Grossissement	4
☐ O4.7 : Appareil photo	5
☐ O4.8 : Champ angulaire	6
☐ O4.9 : Mise au point	6
☐ O4.10 : Profondeur de champ	7
☐ O4.11 : Durée d'exposition	8
☐ O4.12 : Ouverture	9
☐ O4.13 : Microscope	10
☐ O4.14 : Système afocal	10
☐ O4.15 : Lunettes astronomiques	10
☐ O4.16 : Cercle oculaire	11

Propriétés

☐ O4.1 : Grossissement loupe	5
☐ O4.2 : Champ angulaire et focale	6
☐ O4.3 : Mise au point	6
☐ O4.4 : Ouverture et profondeur de champ	9
☐ O4.5 : Afocal 2 lentilles	10
☐ O4.6 : Grossissement lunette	11

Démonstrations

☐ O4.1 : Grossissement loupe	5
☐ O4.2 : Champ angulaire et focale	6
☐ O4.3 : Mise au point	6
☐ O4.4 : Ouverture et profondeur de champ	9
☐ O4.5 : Afocal 2 lentilles	10
☐ O4.6 : Grossissement lunette	11

Applications

☐ O4.1 : Distances focales extrêmes	2
☐ O4.2 : Yeux myope et hypermétrope	4
☐ O4.3 : Construire une profondeur de champ	8
☐ O4.4 : Association de lentilles	9
☐ O4.5 : Calcul d'encombrement	10
☐ O4.6 : Lunette de KEPLER	11

Erreurs communes

☐ O4.1 : Différence avec un œil	6
--	---

I Œil

I/A Présentation et modélisation

♥ Définition O4.1 : Modèle de l'œil

Un œil est constitué de trois parties :

- ◇ 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 de focale variable** grâce à des muscles pouvant se contracter : il se **courbe pour voir plus près** ;
- ◇ La **rétine**, l'**écran** de l'œil, constituée de cellules sensibles à la lumière (les cônes et les bâtonnets).

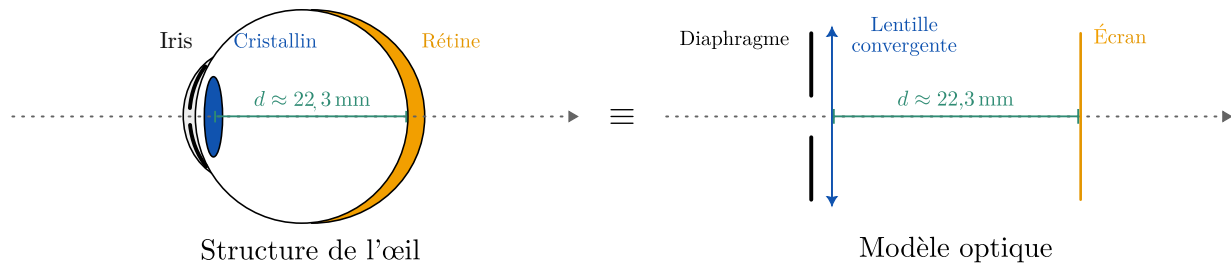


FIGURE O4.1 – Modèle de l'œil en optique.

Interprétation O4.1 : Modèle de l'œil et 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, la **distance de l'image dépend de la focale**.

Ainsi, pour toujours voir net, un œil fait **varier la vergence** du cristallin ($V \nearrow$ pour objets proches). On dit qu'il **accommode**.

I/B Caractéristiques

Définition O4.2 : Punctum remotum, proximum

Punctum remotum (PR)

Point objet **le plus éloigné** qu'un œil voit *net sans accommoder*.

Valeur sans défaut¹

Le PR emmétrope est à $-\infty$.

Punctum proximum (PP)

Point objet **le plus proche** qu'un œil voit *net en accommodant*.

Valeur sans défaut

Le PP emmétrope est à ≈ -25 cm.

Exemple O4.1 : Accommodation

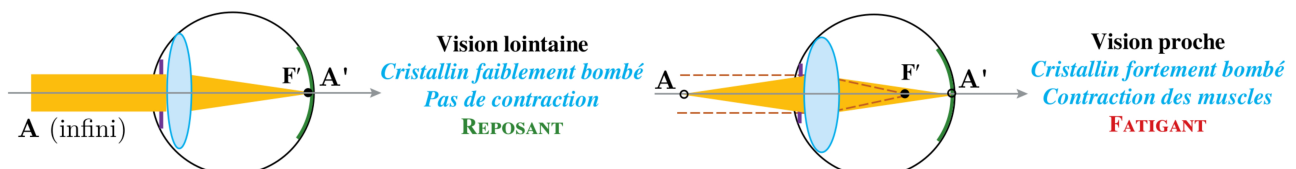


FIGURE O4.2 – Principe de l'accommodation d'un œil.

♥ 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.

1. On dit d'un œil sans défaut qu'il est **emmétrope**

$$\frac{1}{\overline{OF'}} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} A' = E \Rightarrow \overline{OA'} = d \\ \overline{OA}_{\text{repos}} = -\infty \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\overline{OF'}_{\text{repos}}} = \frac{1}{d} - 0 \quad \text{et} \quad \frac{1}{\overline{OF'}_{\text{acco}}} = \frac{1}{d} - \frac{1}{\overline{OA}}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\overline{OF'}_{\text{repos}} = d} \quad \text{et} \quad \boxed{\overline{OF'}_{\text{acco}} = \frac{d \cdot \overline{OA}}{\overline{OA} - d}}$$

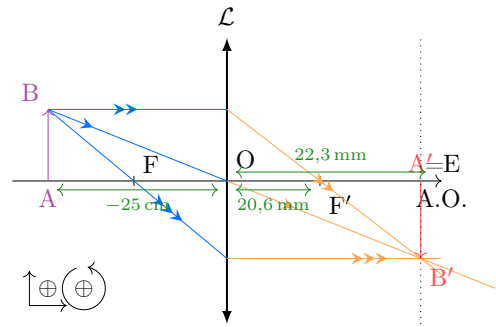


FIGURE O4.3 – Schéma

♥ 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.

♥ Définition O4.3 : Taille apparente et résolution

Taille apparente

Faux-ami : c'est l'angle entre les rayons extrêmes d'un objet ou de son image ; souvent l'angle avec l'axe optique.

Un objet vu sous un angle **plus élevé** est dit **plus gros**.

Résolution/pouvoir séparateur

Angle minimal entre deux rayons pour être distinguables, c'est-à-dire être sur **deux cellules différentes** de la rétine.

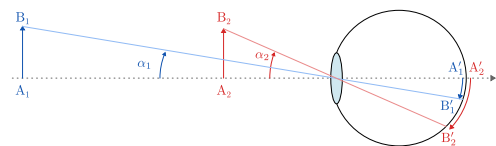


FIGURE O4.4 – Taille apparente



FIGURE O4.5 – Résolution

♥ Ordre de grandeur O4.1 : Petits angles et résolution

On utilise souvent des sous-divisions des degrés pour les angles, appelées **minutes** et **secondes d'arc** :

$$1 \text{ tour} = 360^\circ ; 1^\circ = 60' ; 1' = 60''$$

Dans de bonnes conditions d'éclairage, on a

$$\alpha_{\min} \approx 1' = 3 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

Cela revient à distinguer deux détails séparés de 1 mm à une distance de 3 m.

♥ Définition O4.4 : Défauts 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 à faible distance (verres progressifs).

Exemple O4.2 : PR et PP selon défaut

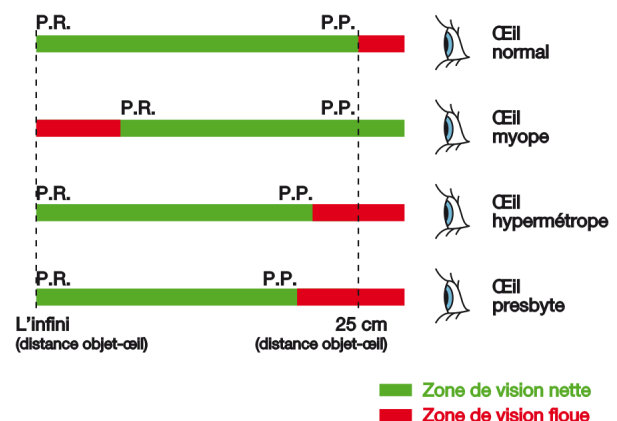


FIGURE O4.6 – Schéma des défauts de l'œil.

♥ Application O4.2 : Yeux myope et hypermétrope

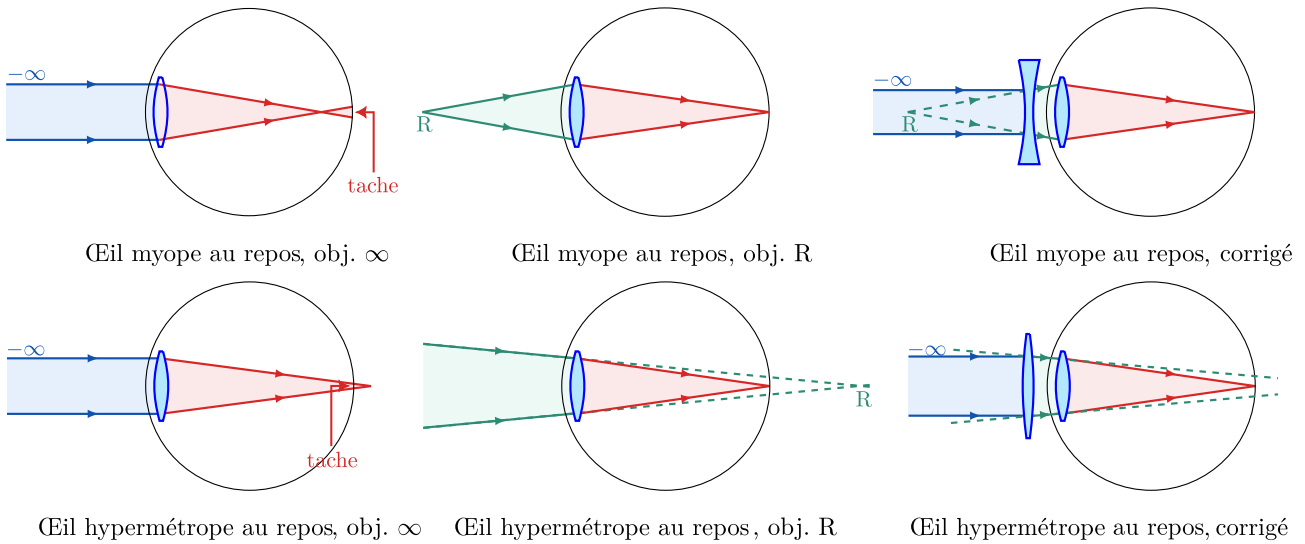


FIGURE O4.7 – Corrections d'un œil myope et d'un œil hypermétrope.

II La loupe

II/A Présentation

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**.

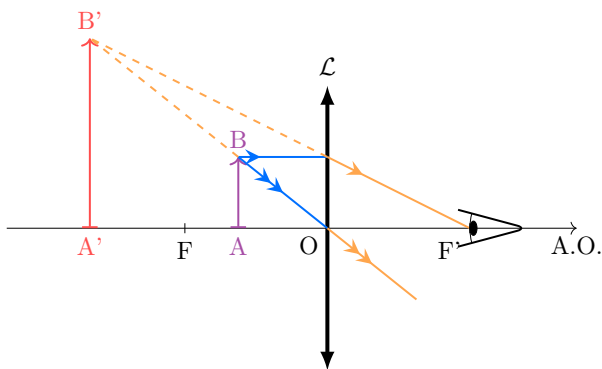


FIGURE O4.8 – Loupe avec accommodation

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**.

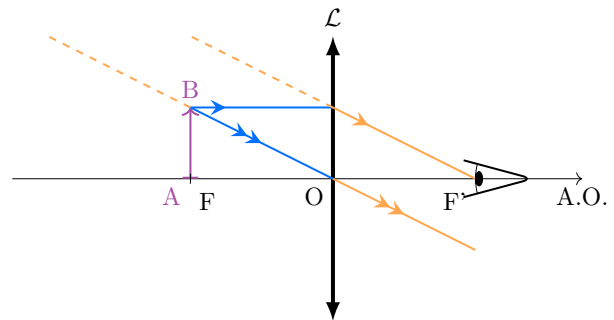


FIGURE O4.9 – Loupe sans accommodation

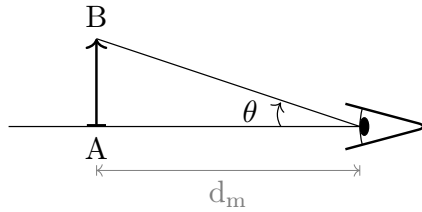
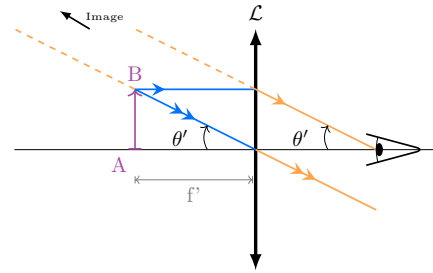
II/B Caractéristique

♥ Définition O4.6 : Grossissement

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

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

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

FIGURE O4.10 – Définition de θ FIGURE O4.11 – Définition de θ'

♥ Propriété O4.1 : Grossissement loupe

Une loupe a un grossissement fixé, tel que

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

♥ Démonstration O4.1 : Grossissement loupe

Avec h la hauteur de l'objet et pour des petits angles, on a

$$G = \frac{\theta'}{\theta} \approx \frac{\tan(\theta')}{\tan(\theta)} = \frac{\frac{h}{f'}}{\frac{h}{d_m}} = \frac{d_m}{f'}$$

Interprétation O4.2 : Grossissement fixé d'une loupe

- ◇ Si on approche l'objet de la lentille, l'image devient moins grande, 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, mais elle est vue de plus loin !

L'angle θ' défini sur la Figure O4.12 est le même quel que soit le cas ! Il ne dépend que de la lentille.

On utilisera donc $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ pour les images réelles, mais toujours $G = \frac{\theta'}{\theta}$ pour les images virtuelles (donc à l'infini aussi).

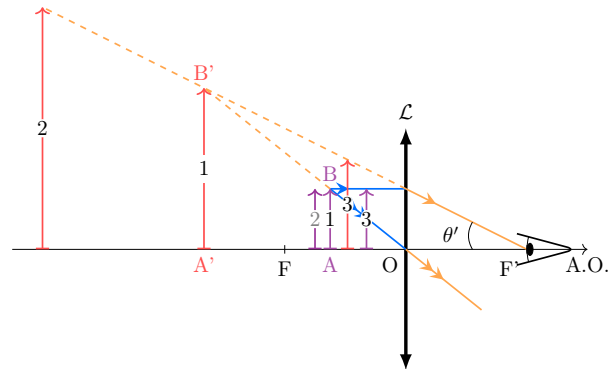


FIGURE O4.12 – Image obtenue avec une loupe dans plusieurs cas de distance objet-lentille

III L'appareil photo

III/A Présentation et modélisation

♥ 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' **fixée** ;
- ◇ Un **capteur numérique**, matrice de cellules photosensibles (*pixels*), à distance d **variable** de (L).

On définit alors :

- ◇ Le **grain** : taille d'un pixel du capteur ;
- ◇ Le **tirage** : distance maximale de déplacement du capteur, notée δ .

Ainsi, la distance objectif-capteur varie entre f' (pour viser à l'infini) et $f' + \delta$ (pour viser au plus proche).

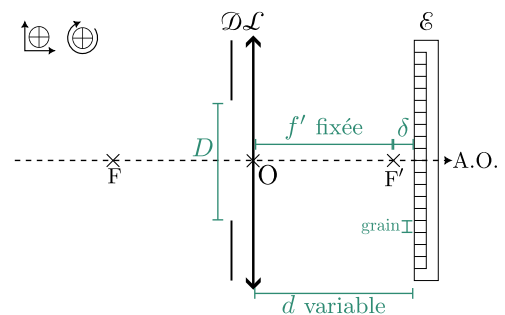


FIGURE O4.13 – Modèle d'appareil photo.

♥ Attention O4.1 : Différence avec un œil

On a donc la même structure *diaphragme + lentille + écran*, mais la variable n'est pas la même :

◇ Œil : écran fixe, focale variable ;

◇ App. phot. : focale fixe, écran mobile.

III/B Champ d'un appareil photo

Définition O4.8 : Champ angulaire

C'est l'angle sous lequel est vue la scène photographiée.

♥ Propriété O4.2 : Champ angulaire et focale

Plus la focale est grande, plus le champ est étroit, et plus on capture un détail de la scène.

♥ Démonstration O4.2 : Champ angulaire et focale

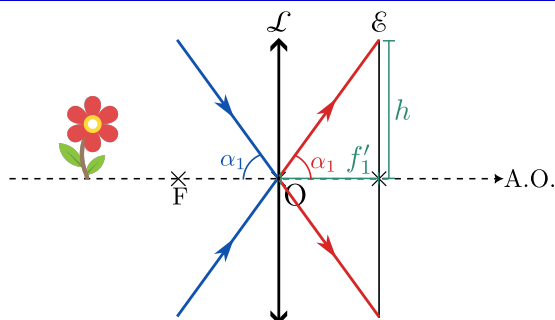


FIGURE O4.14 – Focale courte

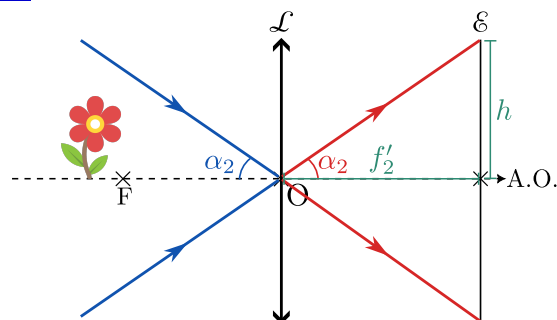


FIGURE O4.15 – Focale longue

Exemple O4.3 : Champ angulaire et focale



FIGURE O4.16 – Focale de 25 mm



FIGURE O4.17 – Focale de 80 mm

Remarque O4.1 : Vocabulaire focale

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/C Mise au point et profondeur de champ

Définition O4.9 : Mise au point

C'est l'opération qui consiste à régler la netteté d'une image. Elle est contrôlée par la **distance variable** lentille-écran.

♥ Propriété O4.3 : Mise au point

Plus la distance lentille-écran d augmente, plus on vise proche : la distance de mise au point diminue.

♥ Démonstration O4.3 : Mise au point

$$V = \frac{1}{\overline{OA'}_{=d}} - \frac{1}{\overline{OA}} \Leftrightarrow \frac{1}{d} = V + \frac{1}{\overline{OA}} \Leftrightarrow \frac{1}{d} = \underbrace{V}_{=cte} - \frac{1}{|\overline{OA}|} : \frac{1}{d} \text{ opposé de } \frac{1}{|\overline{OA}|} \text{ soit } d \text{ variation opposée de } |\overline{OA}|$$

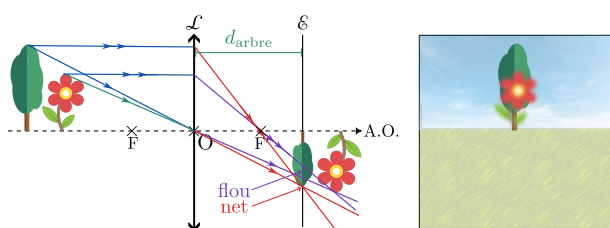


FIGURE 04.18 – Mise au point sur un arbre.

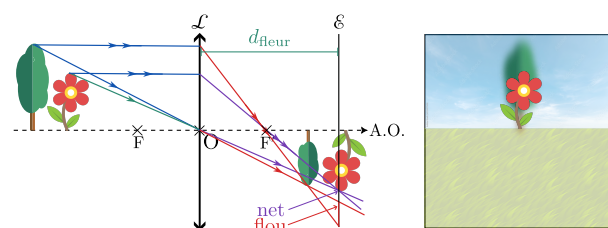
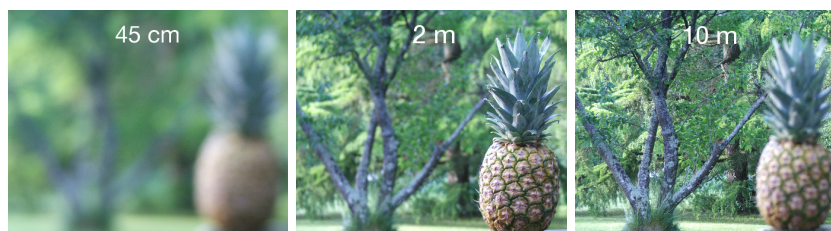


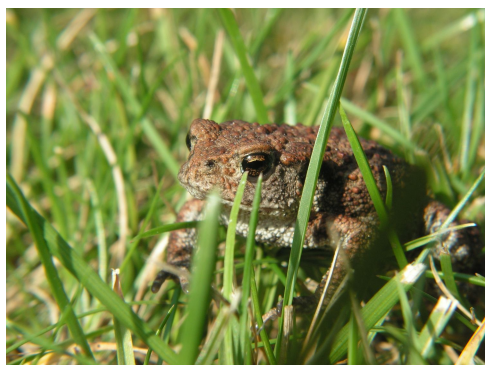
FIGURE 04.19 – Mise au point sur la fleur devant.

Exemple O4.4 : 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 :

**♥ Définition O4.10 : Profondeur de champ**

C'est la **distance maximale entre deux points objets dont les images seront vues nettes**.

Exemple O4.5 : Profondeur de champFIGURE 04.20 – Profondeur de champ faible.
L'avant et l'arrière-plan sont flousFIGURE 04.21 – Profondeur de champ grande.
L'avant et l'arrière-plan sont nets**♥ Outils O4.1 : Construire une profondeur de champ**

Toute l'idée repose sur le fait que l'image d'un point objet peut être une tache, **tant que cette tache est plus petite que le grain du capteur**. On la construit à l'aide des règles secondaires pour rayons quelconques. Ainsi, pour une focale et une mise au point données :

- 1) Placer le plan focal image π' de la lentille.
- 2) Tracer le rayon (1) émergent de la lentille et passant au plus haut du grain du capteur.
- 3) Trouver le foyer secondaire image φ'_1 .
- 4) Tracer le rayon d'aide passant par O et φ'_1 .
- 5) On trouve le rayon (1) incident en en faisant le parallèle : on trouve ainsi A_1 le point objet le plus proche qui sera net.
- 6) Tracer les symétriques des rayons précédents par rapport à l'axe optique.
- 7) On fait de même avec le rayon (2) émergent passant au plus bas du grain du capteur pour trouver A_2 le point objet le plus éloigné qui sera net.
- 8) La profondeur de champ est la distance A_1A_2 .

9) On peut faire de même avec le point A qui passe au milieu du grain.

On peut également travailler avec le plan focal objet π .

♥ Application O4.3 : Construire une profondeur de champ

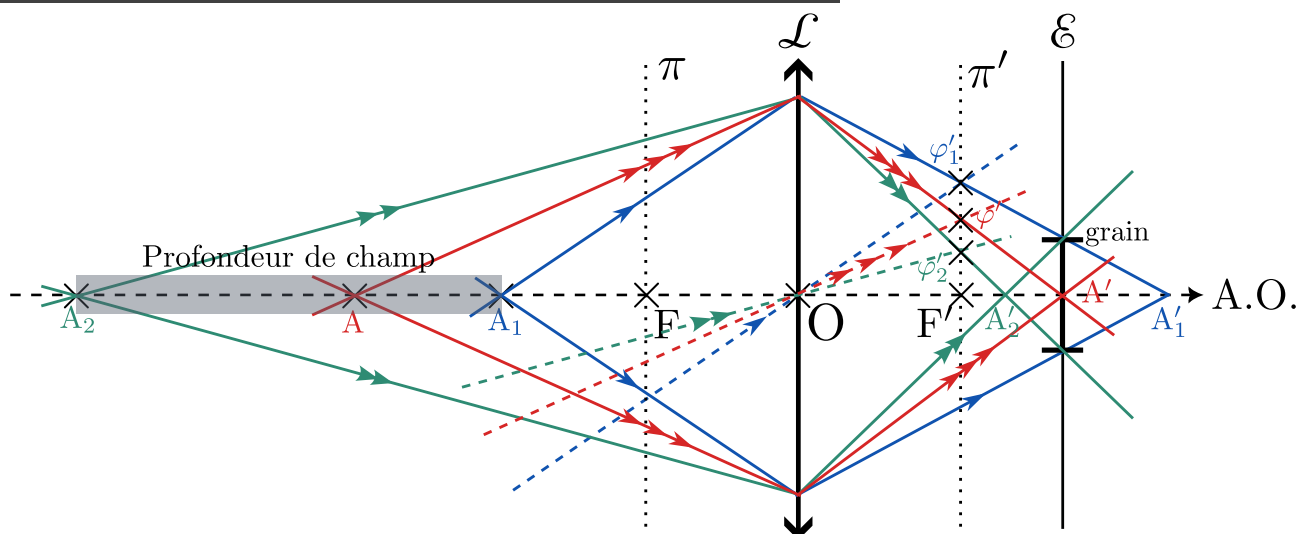


FIGURE O4.22 – Construction de la profondeur de champ.

Remarque O4.2 : Profondeur de champ et paramètres

On peut montrer que la profondeur de champ augmente avec la distance de mise au point, et est plus grande pour les courtes focales.

III/D Durée d'exposition et ouverture

Définition O4.11 : Durée d'exposition

C'est la durée τ pendant laquelle le capteur est exposé à la lumière. Plus elle est longue, plus le capteur reçoit de lumière.

- ◇ τ **grand** : plus de lumière, mais risque de flou si mouvement ;
- ◇ τ **faible** : capture rapide, mais moins de lumière.

Exemple O4.6 : Durée d'exposition

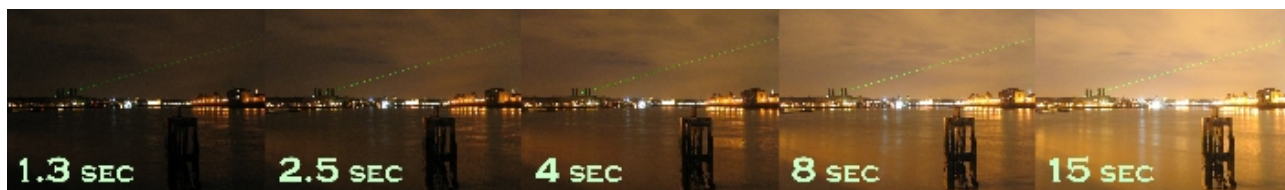


FIGURE O4.23 – Photographies de GREENWICH de nuit avec des durées d'exposition différentes.



FIGURE O4.24 – Photographies d'une rivière avec des durées d'exposition différentes.

Définition O4.12 : 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 O4.25

♥ Propriété O4.4 : Ouverture et profondeur de champ

Plus l'ouverture est faible (donc N grand), plus la profondeur de champ est grande (mais moins de lumière atteint le capteur) : les rayons extrêmes font les plus grandes taches, les limiter réduit les taches.

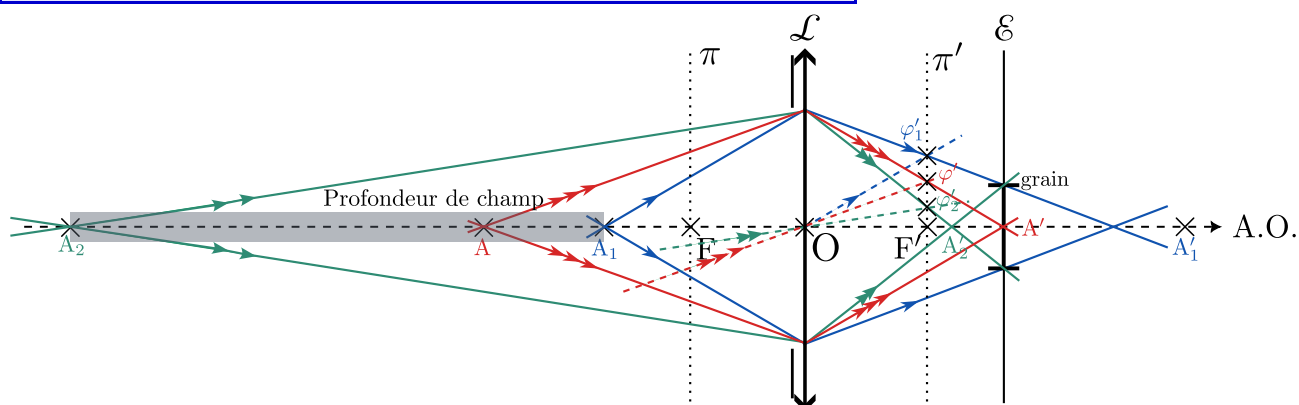
♥ Démonstration O4.4 : Ouverture et profondeur de champ

FIGURE O4.26 – Petite ouverture.

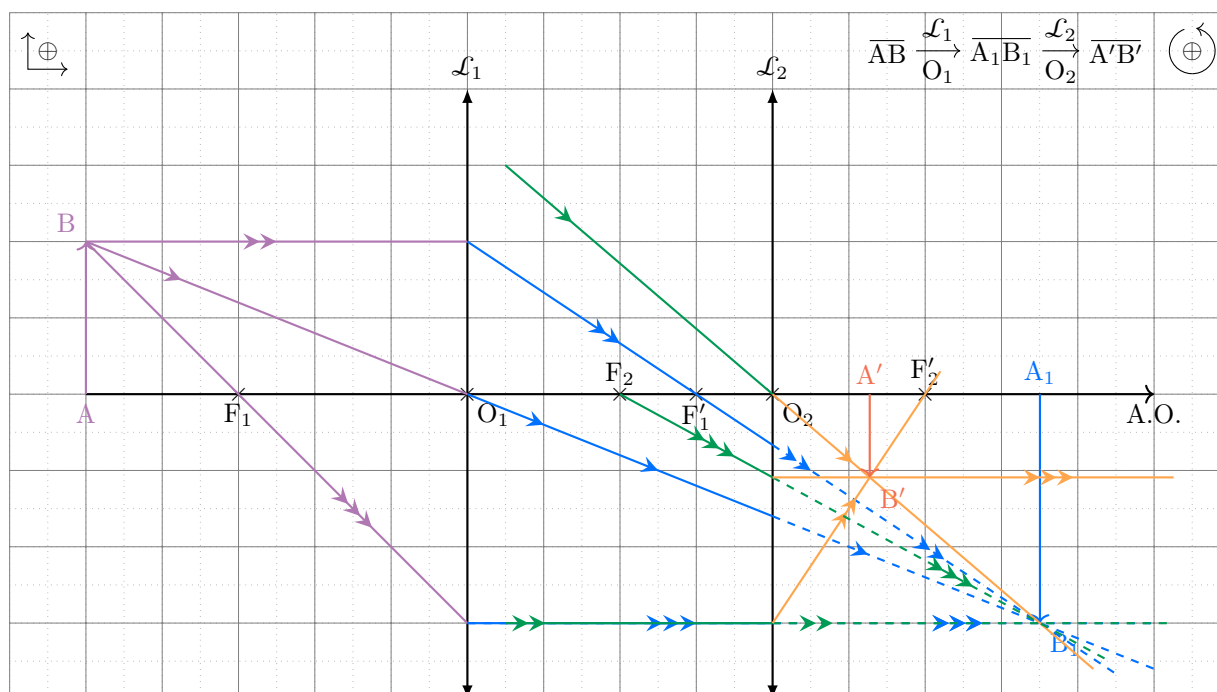
IV Systèmes optiques à plusieurs lentilles**IV/A Association quelconque de lentilles****♥ Application O4.4 : Association de lentilles**

FIGURE O4.27 – Association de lentilles convergentes

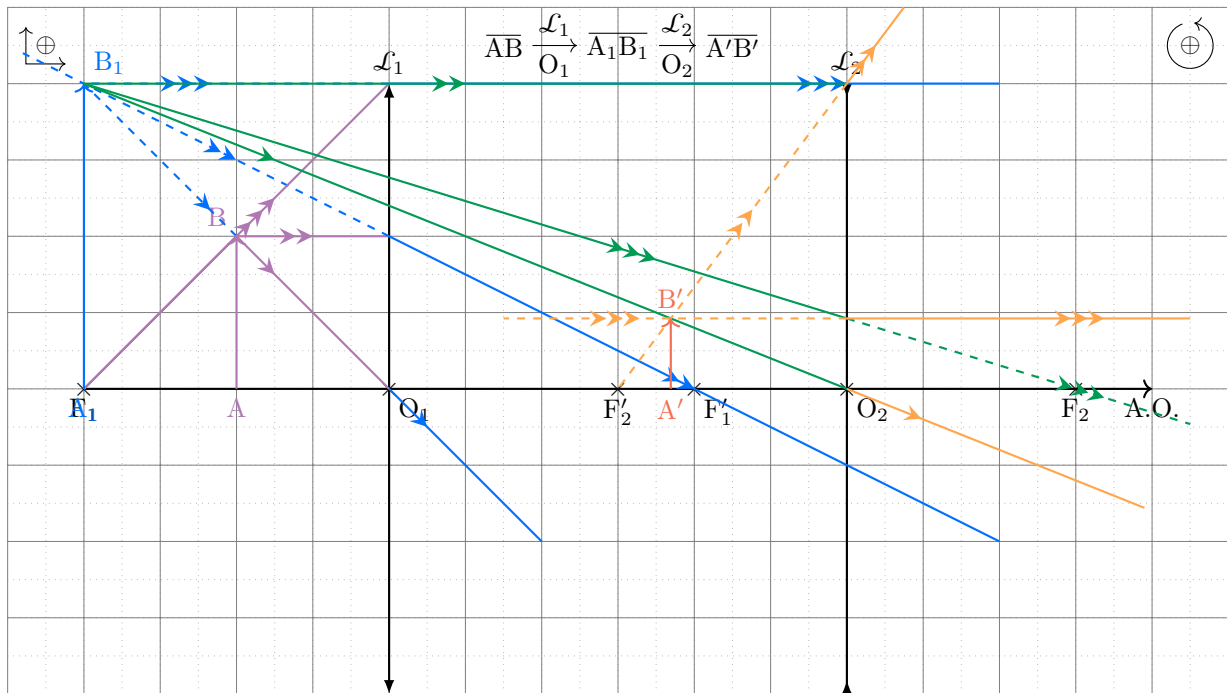


FIGURE O4.28 – Association de lentilles mixtes

Définition O4.13 : Microscope

Un microscope est une association de deux lentilles convergentes qui donne une image à l'infini d'un objet à distance finie. On en déduit que **l'image intermédiaire est au foyer objet de la seconde lentille**.

Schéma synoptique

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

$A_1 = F_2$ $A' = +\infty$

IV/B Lunettes astronomiques**Définition O4.14 : Système afocal**

Par un système afocal, un **objet à l'infini donne une image à l'infini** : le système entier agit comme s'il n'avait « pas de foyer ».

♥ Propriété O4.5 : Afocal 2 lentilles

Un système optique à **2 lentilles** est afocal si et seulement si le foyer image de la première est confondu avec le foyer objet de la seconde :

$$F'_1 = F_2$$

♥ Démonstration O4.5 : Afocal 2 lentilles

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

$-\infty \rightarrow A_1 = F'_1$ $A' = +\infty$
 $A_1 = F_2$

Définition O4.15 : Lunettes astronomiques

Système optique **afocal** composé de deux lentilles :

- ◇ **L'objectif**, lentille convergente dirigée vers l'objet ;
- ◇ **L'oculaire**, soit convergent (KEPLER) soit divergent (GALILÉE), où l'on place l'œil.

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

Application O4.5 : Calcul d'encombrement

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

$$\overline{O_1O_2} = \overline{O_1F'_1} + \overline{F'_1O_2} = \overline{O_1F'_1} + \overline{F_2O_2} = f'_1 + f'_2 \Leftrightarrow \overline{O_1O_2} = \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \Rightarrow \overline{O_1O_2} = 36 \text{ cm}$$

♥ Application O4.6 : Lunette de KEPLER

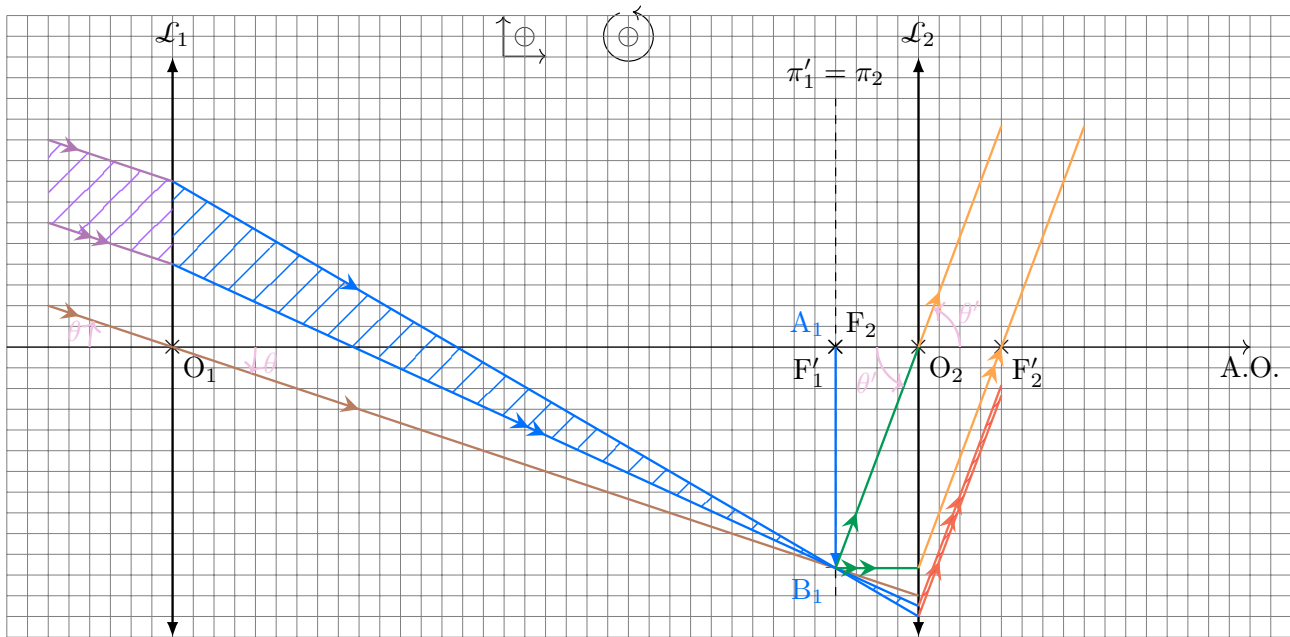


FIGURE O4.29 – Schéma d'une lunette de Kepler.

♥ Propriété O4.6 : Grossissement lunette

Pour les lunettes, on a G tel que

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

♥ Démonstration O4.6 : Grossissement

Avec la figure O4.29 et des petits angles :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{O_2 F_2}}}{\frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{O_1 F'_1}}}$$

Or $\overline{O_2 F_2} = -f'_2$, d'où le résultat.

Remarque O4.3 : 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 O4.16 : 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**.

Schéma synoptique

$$O_1 \xrightarrow{\mathcal{L}_2} C$$

Exemple O4.7 : Lunette et cercle oculaire

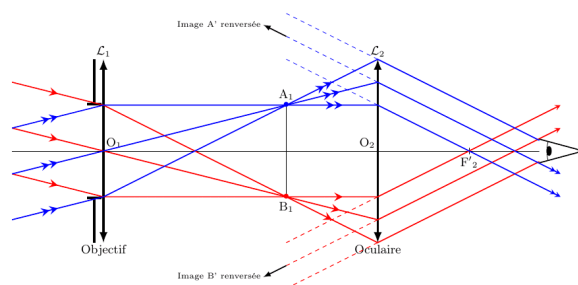


FIGURE O4.30 – Images de 2 points objets à l'infini.

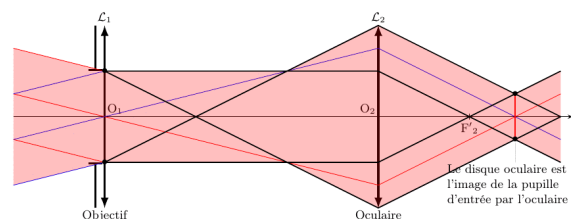


FIGURE O4.31 – Schématisation du cercle oculaire.