
OPTIQUE

CHARLES TUCHENDLER



MPSI 4 – LYCÉE SAINT-LOUIS

ANNÉE 2019/2020

Table des matières

| | | |
|---|-----------------------|----------|
| CHAPITRE XXI | INSTRUMENTS D'OPTIQUE | 1 |
| Introduction | | 2 |
| I L'œil | | 2 |
| I.1 Description | | 3 |
| I.2 Propriétés | | 3 |
| I.2.a Champ angulaire | | 3 |
| I.2.b Pouvoir séparateur (ou de résolution) | | 3 |
| I.2.c Profondeur de champ (ou latitude de mise au point) et distance focale | | 4 |
| I.3 Les défauts de l'œil | | 4 |
| I.3.a La myopie | | 4 |
| I.3.b L'hypermétropie | | 4 |
| I.3.c La presbytie | | 5 |
| I.3.d L'astigmatie | | 5 |
| I.4 Pourquoi voit-on flou sous l'eau ? | | 5 |
| II La loupe | | 5 |
| II.1 Principe | | 5 |
| II.2 Latitude de mise au point | | 6 |
| II.3 Grossissement | | 6 |
| III Association de lentilles | | 7 |
| III.1 Image d'un objet | | 7 |
| III.2 Foyers d'un système optique composé de plusieurs lentilles | | 8 |
| III.2.a Foyer objet | | 8 |
| III.2.b Foyer image | | 9 |
| III.2.c Centre optique | | 9 |
| IV La lunette de visée | | 9 |
| IV.1 Description et principe | | 9 |
| IV.2 Viseur : Lunette de visée réglée pour l'observation à distance finie | | 10 |
| IV.3 Lunette astronomique : Lunette de visée réglée pour l'observation à l'infini | | 10 |

CHAPITRE XXI

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

Sommaire

| | |
|---|----------|
| Introduction | 2 |
| I L'œil | 2 |
| I.1 Description | 3 |
| I.2 Propriétés | 3 |
| I.2.a Champ angulaire | 3 |
| I.2.b Pouvoir séparateur (ou de résolution) | 3 |
| I.2.c Profondeur de champ (ou latitude de mise au point) et distance focale | 4 |
| I.3 Les défauts de l'œil | 4 |
| I.3.a La myopie | 4 |
| I.3.b L'hypermétropie | 4 |
| I.3.c La presbytie | 5 |
| I.3.d L'astigmatie | 5 |
| I.4 Pourquoi voit-on flou sous l'eau ? | 5 |
| II La loupe | 5 |
| II.1 Principe | 5 |
| II.2 Latitude de mise au point | 6 |
| II.3 Grossissement | 6 |
| III Association de lentilles | 7 |
| III.1 Image d'un objet | 7 |
| III.2 Foyers d'un système optique composé de plusieurs lentilles | 8 |
| III.2.a Foyer objet | 8 |
| III.2.b Foyer image | 9 |
| III.2.c Centre optique | 9 |
| IV La lunette de visée | 9 |
| IV.1 Description et principe | 9 |
| IV.2 Viseur : Lunette de visée réglée pour l'observation à distance finie | 10 |
| IV.3 Lunette astronomique : Lunette de visée réglée pour l'observation à l'infini | 10 |

Introduction

Ce chapitre est l'occasion de mettre à profit l'ensemble des notions d'optique géométrique introduites dans les chapitres précédents pour comprendre en profondeur le fonctionnement d'un grand nombre d'instruments d'optique.

Définition XXI.1 – Types d'instruments d'optique

Ces instruments peuvent être classés en deux catégories :

- ★ **les instruments objectifs** : qui permettent de former une image réelle sur un écran ou un capteur.
Exemples : l'œil, l'objectif, l'appareil photographique, le téléobjectif...
- ★ **les instruments subjectifs** : qui forment une image virtuelle ou à l'infini d'un objet. Ils nécessitent d'être complétés par l'utilisation d'un autre instrument, comme l'œil par exemple, afin de pouvoir visualiser l'image de l'objet.
Exemples : la loupe, le microscope, la lunette (de visée, astronomique ou de Galilée), le collimateur, l'oculaire...

Afin de comprendre le principe général de fonctionnement de l'ensemble de ces instruments, nous allons donc développer en détail le principe d'un instrument objectif - l'œil -, d'un instrument subjectif formant une image virtuelle - la loupe -, et d'un instrument subjectif formant une image à l'infini - la lunette de visée.

I L'œil

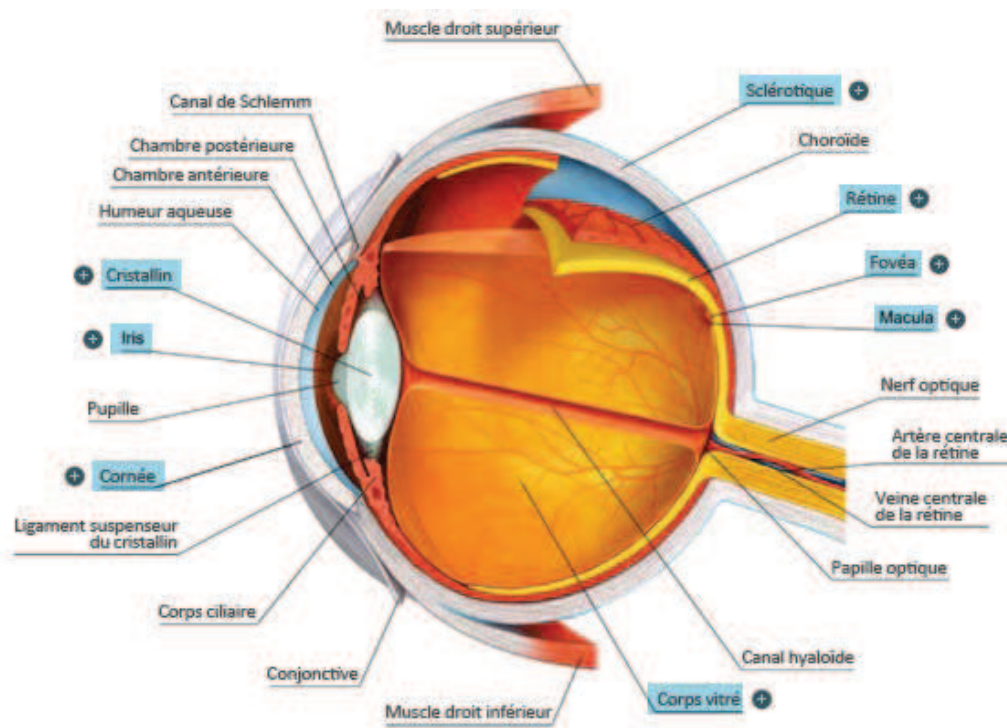


FIGURE XXI.1 – Coupe sagittale d'un œil humain.

L'œil est un instrument d'optique objectif. Les notions développées dans cette section ont donc une grande similarité avec d'autres objectifs et seront utiles à la compréhension d'un système de projection sur un écran, d'un appareil photographique...

I.1 Description

Propriété XXI.1 – Structure interne de l’œil

Présentons rapidement les principaux éléments de la structure interne d’un œil humain (cf. Fig. XXI.1 ^a).

- ★ **L’œil** est un globe transparent d’environ 2,5 cm de diamètre.
- ★ **La cornée** est le dioptre sphérique par lequel pénètrent les rayons lumineux.
- ★ **Le cristallin** est un organe assimilable à une lentille convergente de focale variable musculairement.
- ★ **La rétine** est la surface photosensible sur laquelle le cristallin forme une image renversée d’un objet. Dans le cas de l’œil, **la distance entre le centre du cristallin et la rétine est fixe**. Lorsque l’œil *accommod*e la vergence du cristallin varie pour que l’image vienne toujours se former sur la rétine.
- ★ **L’iris** correspond à la partie colorée de l’œil. Elle joue le rôle de diaphragme et permet de changer le diamètre de la **pupille** (partie sombre), adaptant la quantité de lumière entrant dans l’œil en fonction de la luminosité extérieure.
- ★ **La tâche jaune** ou **macula** au centre de laquelle se trouve la **fovea** est la zone de la rétine qui correspond à un champ de vision net (seulement 1°)
- ★ **Les cellules photosensibles** tapissent la rétine qui comporte environ 7 millions de cônes et 120 millions de bâtonnets.
- ★ **Les cônes** sont principalement concentrés au centre de la rétine appelé **fovea** et servent à la vision de jour et des couleurs.
- ★ **Les bâtonnets** sont principalement placés sur les bords de la rétine ; ils sont dédiés à la vision de nuit en nuances de gris.
- ★ **Le nerf optique** de l’œil code l’image sous forme d’influx nerveux qu’il transmet au cerveau. Ce dernier l’interprète ensuite : retournement de l’image, impression de relief grâce aux informations provenant des deux yeux...

a. D’après Site *Brussels retina*.

I.2 Propriétés

I.2.a Champ angulaire

Il est d’environ 50° pour la vision normale, et d’environ 1degree pour la perception **nette** des détails fins (qui correspondent aux images recueillies par la fovea).

I.2.b Pouvoir séparateur (ou de résolution)

Définition XXI.2 – Pouvoir séparateur

L’œil ne peut séparer deux objets que si leurs images sur la rétine se forment sur deux cônes différents.

Dans de bonnes conditions d’éclairement, le **pouvoir séparateur** de l’œil est de l’ordre d’une minute d’arc (soit environ $\alpha_\ell \simeq 3.10^{-4}$ rad).

Remarque : l’œil est sensible au diamètre angulaire des objets ; donc non seulement à leur taille, mais aussi à leur éloignement.

I.2.c Profondeur de champ (ou latitude de mise au point) et distance focale

L'œil ne voit nettement que si l'image se forme sur la rétine. Des muscles permettent de modifier la *focale* de l'œil autour d'une valeur d'environ $f' = 2\text{cm}$ de façon à pouvoir observer nettement des objets¹.

Définition XXI.3 – Latitude de mise au point

La zone de vision nette appelée *profondeur de champ* ou *latitude de mise au point* s'étend entre deux points de référence (cf. Fig. XXI.2) :

- ★ le **Punctum remotum** (PR) : distance à laquelle un œil au repos voit nettement (on dit que l'œil au repos **n'accomode pas**).
- ★ le **Punctum proximum** (PP) : distance minimale de vision nette obtenue en accommodant au maximum (les muscles compriment le cristallin).

Pour un œil normal (dit *emmétrope*) d'adulte, le PR est à l'infini, et le PP est à 25 cm environ.

Conséquence : une image nette d'un objet sera visible à l'œil nu si les rayons provenant de l'objet et arrivant sur le cristallin sont soit parallèles (objet à l'infini), soit faiblement divergents (objet plus éloigné que le PP).

En aucun cas l'image d'un faisceau convergent ne peut être obtenue sur la rétine !

Remarque : pour faciliter le confort visuel, la plupart des instruments d'optique donne une image à l'infini pour assurer un confort maximal par un minimum d'accommodation.

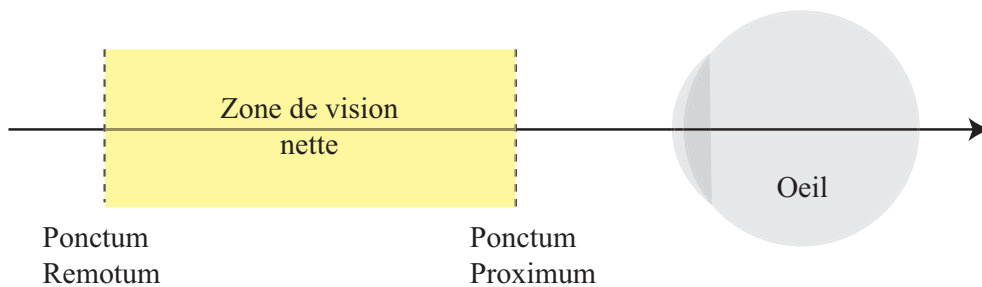


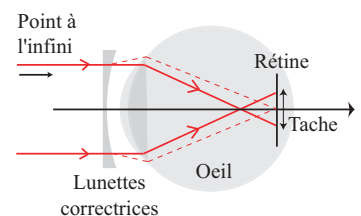
FIGURE XXI.2 – Latitude de mise au point de l'œil.

I.3 Les défauts de l'œil

I.3.a La myopie

L'œil est trop convergent lorsqu'il est au repos. Un point à l'infini forme alors une tache au niveau de la rétine et l'image d'un objet est donc flou. Ceci entraîne une mauvaise vision de loin.

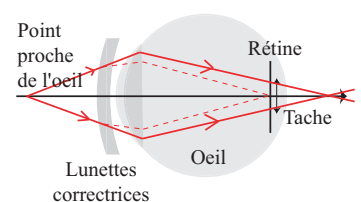
Correction : le port de lunettes de vue divergentes permet de renvoyer le PR à l'infini.



I.3.b L'hypermétropie

L'œil est trop peu convergent lorsqu'il accomode au maximum. Le PP est repoussé plus loin que dans le cas d'un œil emmétrope. Ceci entraîne une mauvaise vision de près.

Correction : le port de lunettes de vue convergentes permet de rapprocher le PP.



1. On pourra télécharger l'application "The Eye" sur l'iTunes Store par exemple

I.3.c La presbytie

L'œil accommode mal en raison du vieillissement lié à l'âge et de la fatigue liés à la répétition des efforts. De même que pour un hypermétrope, le PP est situé plus loin que pour un œil emmétrope, et gêne la vision de près.

Correction : le port de lunettes de vue convergentes permet de rapprocher le PP.

I.3.d L'astigmatie

L'œil n'a pas une symétrie de révolution. L'image d'un objet est déformée (l'image d'un point est un trait).

Correction : le port de lunettes non sphériques permet de corriger ce défaut de l'œil.

I.4 Pourquoi voit-on flou sous l'eau ?

Sous l'eau, tout apparaît flou car le milieu en contact avec l'humeur aqueuse de l'œil est différent ($n_{\text{œil}} = 1,336$ proche $n_{\text{eau}} = 1,33$). L'interface convergente air/eau est remplacée par une interface très peu convergente eau/humeur aqueuse. Les rayons lumineux ne convergent plus sur la rétine, et la vision obtenue est celle s'apparentant à quelqu'un de très hypermétrope.

Correction : le port d'un masque de plongée permet de rétablir une couche d'air en contact avec l'œil, permettant ainsi son bon fonctionnement.

II La loupe

Le plus petit détail visible à l'œil nu se déduit de la limite de résolution au PP.

Pour un œil adulte : $AB_{\min} = \alpha_{\min} \times PP = 3.10^{-4} \times 0,25 \simeq 80 \mu\text{m}$.

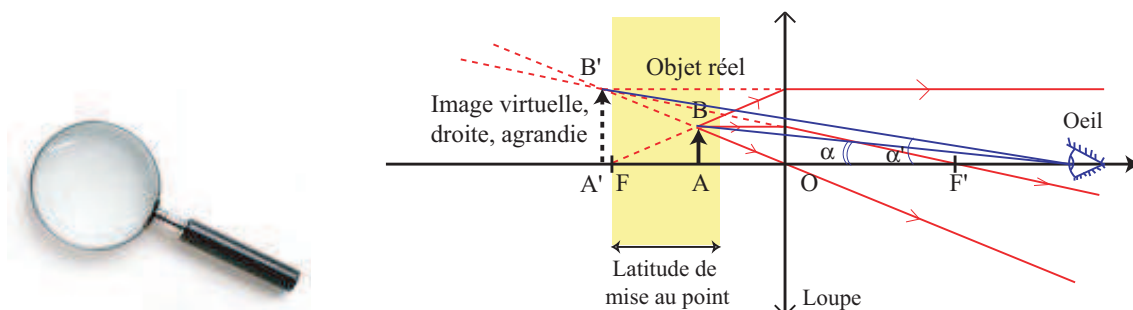
Si l'on veut pouvoir observer des détails ou des objets plus petits, il faut avoir recours à un instrument grossissant comme la loupe (une seule lentille) ou le microscope (plusieurs lentilles).

II.1 Principe

Définition XXI.4 – Principe de la loupe

Une loupe est un instrument subjectif a pour but de créer une image intermédiaire agrandie de l'objet. C'est cette image agrandie que l'œil observe.

Une loupe est une lentille convergente de courte focale ($f' < 5 \text{ cm}$ en général). Afin d'obtenir une image virtuelle agrandie droite avec une lentille convergente, la seule possibilité est de placer l'objet entre le foyer objet F et le centre de la lentille O .



L'image obtenue étant virtuelle, la loupe est donc bien un instrument subjectif.

L'œil voit l'image virtuelle créée par la loupe sous un angle α' alors qu'il la verrait sous l'angle α sans la loupe. On définit alors le grossissement de la loupe comme $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$.

II.2 Latitude de mise au point

Nous allons maintenant nous intéresser à la latitude de mise au point de l'image lorsque l'œil est à distance fixe de la loupe, au niveau de son plan focal image.

Exercice XXI.1 – Construction des rayons

On appelle Δx la latitude de mise au point, correspondant à l'écart entre les positions extrêmes de l'objet sur l'axe optique, pour lesquelles celui-ci est vu net à travers la loupe.

Exercice XXI.2 – Détermination de la latitude de mise au point

☞ Déterminer l'expression et la valeur numérique de la latitude de mise au point Δx .

Raisonnons en utilisant le principe du retour inverse de la lumière :

- ★ L'œil ne verra une image nette que si la distance les séparant est comprise entre le PP et le PR, donc $\overline{A'F'} \in [d_{min}, \infty]$.
- ★ Si l'image A' est à l'infini, l'objet A_{PR} est nécessairement au foyer objet F de la lentille, et $\overline{OA_{PR}} = -f'$.
- ★ Si l'image A' est au PP, alors $\overline{OA'} = f' - d_{min}$, et en utilisant la formule de conjugaison avec origine au sommet, on obtient $\overline{OA_{PP}} = \frac{f'(f' - d_{min})}{d_{min}}$.
- ★ On en déduit donc avec une focale de $f' = 5\text{cm}$ pour un œil normal :

$$\Delta x = \overline{OA_{PP}} - \overline{OA_{PR}} = \frac{f'(f' - d_{min})}{d_{min}} + f' = \frac{f'^2}{d_{min}} = 1 \text{ cm}$$

A titre de comparaison, la latitude de mise au point d'un microscope est de quelques μm , ce qui nécessite l'emploi de réglages fins pour modifier la position de l'objet.

II.3 Grossissement

Toujours dans les mêmes conditions d'utilisation pour lesquelles l'œil est placé dans le plan focal image de la loupe, on s'intéresse au grossissement lorsque l'objet est placé dans le plan focal objet de la loupe. On appellera h la taille de l'objet AB , et h' la taille de l'image.

Exercice XXI.3 – Détermination du grossissement de la loupe dans un cas particulier

On notera G_{PR} le grossissement au punctum remotum de l'œil.

III Association de lentilles

Nous allons maintenant détailler comment déterminer l'image d'un objet par un instrument d'optique constitué de plusieurs lentilles.

Nous allons nous poser en particulier les questions suivantes. Peut-on définir et déterminer la position :

- d'un centre optique O ?
- d'un foyer objet F ?
- d'un foyer image F' ?

dans un tel système.

Nous nous limiterons à l'étude des **doublets de lentilles** (deux lentilles accolées ou non) dont la compréhension permet d'étendre les raisonnements à davantage de systèmes optiques.

III.1 Image d'un objet

Nous cherchons à déterminer l'image $A'B'$ d'un objet AB quelconque par un doublet de lentilles minces noté $\mathcal{L} = \{\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2\}$, où \mathcal{L}_1 et \mathcal{L}_2 sont les deux lentilles minces.

En considérant que les deux lentilles sont utilisées dans les conditions de Gauss, et donc que leur association est aplanétique, il est suffisant de déterminer l'image B' de B . On peut ensuite déduire A' comme l'intersection du plan contenant B' et perpendiculaire à l'axe optique avec ce dernier.

On peut représenter la conjugaison de AB et $A'B'$ par \mathcal{L} par le schéma suivant :

$$A \xrightarrow{\{\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2\}} A'$$

Méthode XXI.1 – Construction et positionnement de l'image d'un point objet par une association de lentilles

Afin de construire ou de calculer la position de A' , il est plus judicieux de séparer le système \mathcal{L} en chacun de ses constituants.

On fait alors intervenir un point intermédiaire A_1 , image de A par \mathcal{L}_1 .

A' est alors l'image de A_1 par \mathcal{L}_2 . A_1 joue donc **à la fois le rôle d'image et d'objet**.

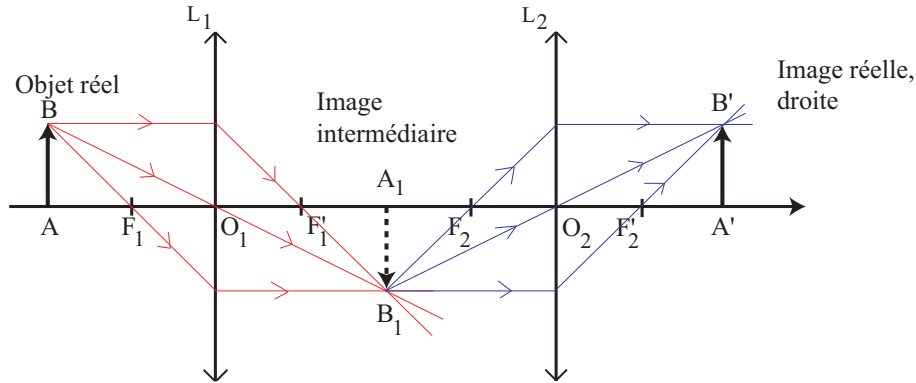
On peut représenter la conjugaison entre ces points de la façon suivante :

$$\begin{array}{c} A \xrightarrow{\{\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2\}} A' \\ A \xrightarrow[\mathcal{L}_1]{} A_1 \xrightarrow[\mathcal{L}_2]{} A' \end{array}$$

La construction de l'image A' de A se fait donc en **deux étapes indépendantes**, en faisant intervenir A_1 . De même, pour **calculer** la position de A' , il faut utiliser 2 fois les relations de conjugaison en faisant intervenir A_1 .

Exemple XXI.1 – Cas de deux lentilles convergentes

On considère deux lentilles convergentes de même distance focale $f' = 1$ m et espacées de $D = 4$ m. On cherche à faire l'image d'un objet AB de taille $h = 1$ m, placé à $d = 2$ m devant la première lentille, et on veut déterminer la position et la taille de l'image $A'B'$.



On obtient par construction une image $A'B'$ de taille $h = 1$ m, droite, située à 2 m du centre de L_2 .

On peut également obtenir ce résultat en utilisant les relations de conjugaison :

$$\frac{1}{\overline{O_1 A_1}} - \frac{1}{\overline{O_1 A}} = \frac{1}{\overline{O_1 F'_1}} \quad (\text{XXI.1})$$

$$\frac{1}{\overline{O_2 A'}} - \frac{1}{\overline{O_2 A_1}} = \frac{1}{\overline{O_2 F'_2}} \quad (\text{XXI.2})$$

Le grandissement peut également être décomposé en deux en utilisant

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{AB}} \cdot \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A_1 B_1}} = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \quad (\text{XXI.3})$$

III.2 Foyers d'un système optique composé de plusieurs lentilles**III.2.a Foyer objet**

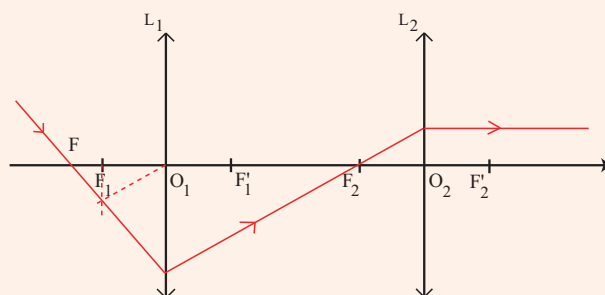
Le foyer objet F est le point conjugué avec un point image à l'infini (noté A_∞). On peut donc écrire, en faisant intervenir l'image A_1 de F par L_1 :

$$F \xrightarrow[\mathcal{L}_1]{\{\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2\}} A'_\infty$$

$$F \xrightarrow[\mathcal{L}_1]{\quad} A_1 \xrightarrow[\mathcal{L}_2]{\quad} A'_\infty$$

Propriété XXI.2 – Position du foyer objet d'une association de lentilles

F est l'*antécédent* de F_2 par L_1 .



III.2.b Foyer image

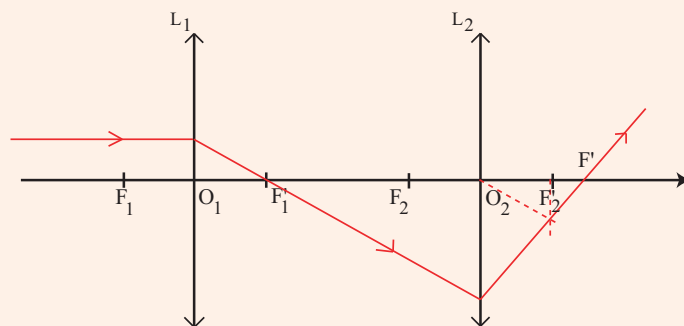
Le foyer image F' est le point conjugué avec un point objet à l'infini (noté A_∞). On peut donc écrire, en faisant intervenir l'image A_1 de A_∞ par L_1 :

$$A_\infty \xrightarrow{\{L_1, L_2\}} F'$$

$$A_\infty \xrightarrow{L_1} A_1 \xrightarrow{L_2} F'$$

Propriété XXI.3 – Position du foyer image d'une association de lentilles

F' est l'*image* de F'_1 par L_2 .



III.2.c Centre optique

Un système optique composé de plusieurs lentilles **ne comporte pas forcément** de centre optique O , c'est à dire de point de l'axe optique suivant lequel un rayon n'est pas dévié. On peut s'en convaincre en regardant la construction de l'image de l'objet AB dans la première figure du chapitre (la droite (BB') ne coupe en effet pas l'axe optique).

IV La lunette de visée

Nous avons vu avec la loupe comment observer un objet proche de l'œil, et nous nous intéressons maintenant à l'observation d'un objet à l'infini ou à grande distance.

IV.1 Description et principe

Une lunette de visée est un instrument subjectif : elle forme, avec un grossissement supérieur à 1, une image à l'infini d'objets situés dans un plan donné de l'espace, qui peut selon le réglage de la lunette, être situé à l'infini ou à une distance finie.

Former une image à l'infini à la sortie de la lunette permet une observation à l'œil **sans accommoder**. L'appareil peut donc être utilisé sans fatigue.

Ce type d'appareil optique est utilisé comme viseur, pour les fusils ou même certains radars pour lesquels plusieurs visées successives de la position d'un véhicule permettent d'en déduire sa vitesse.



FIGURE XXI.3 – A gauche : lunette de visée d'un fusil. A droite : lunette de visée utilisée comme radar.

Une lunette de visée est constituée de trois tubes de même axe qui peuvent coulisser les uns dans les autres. Le premier tube porte une lentille convergente et est appelé **objectif**. Le second porte une lame de verre sur laquelle est gravée un croisillon appelé **réticule**. Le dernier tube contient une autre lentille convergente appelé **oculaire**.

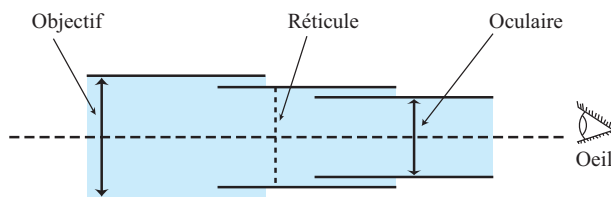


FIGURE XXI.4 – Schéma général d'une lunette de visée.

Lorsque la lunette est correctement réglée sur un objet situé à l'infini ou non, l'objectif en forme une **image intermédiaire** dans le plan du réticule. L'oculaire forme ensuite une image à l'infini, et donc observable à l'œil sans accommoder, de l'image intermédiaire. Deux réglages sont possibles pour la lunette, selon que la **mise au point** est faite sur un objet à l'infini ou à distance finie, en réglant le **tirage** de l'objectif.

IV.2 Viseur : Lunette de visée réglée pour l'observation à distance finie

Dans le cas de l'observation d'un objet à distance finie par un œil emmetrope, le trajet des rayons lumineux est le suivant :

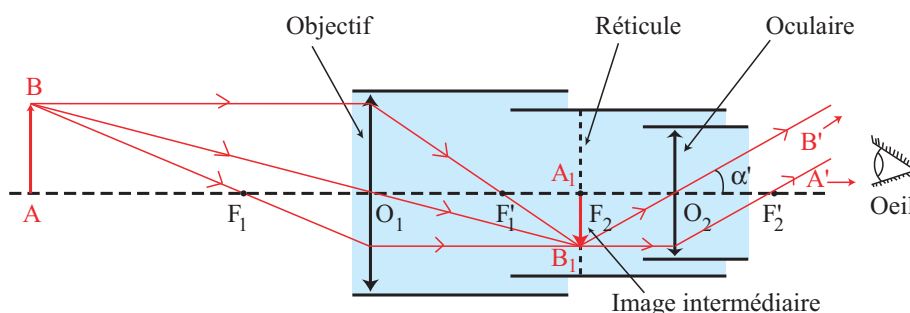


FIGURE XXI.5 – Lunette de visée réglée sur l'observation d'un objet à distance finie.

L'angle α' sous lequel est vue l'image intermédiaire est plus grand que le diamètre angulaire α de l'objet vu à l'œil nu. La lunette permet donc d'obtenir une image grossie de l'objet AB.

Noter que le tirage de l'oculaire permet de régler la lunette à la vue de l'utilisateur (un myope aura besoin de faire diverger légèrement le faisceau émergent pour obtenir une image nette). Pour un observateur normal, le réticule est dans le plan focal objet de l'oculaire.

IV.3 Lunette astronomique : Lunette de visée réglée pour l'observation à l'infini

Lorsque la lunette est réglée sur l'infini, l'image intermédiaire se forme au foyer image F'_1 de l'objectif qui est alors confondu avec le foyer objet F_2 de l'oculaire. La lunette est alors un dispositif **afocal**. On appelle ce type de lunette une **lunette astronomique**. Elle fait d'un point B à l'infini une image B' à l'infini. Dans cette configuration également, on voit l'intérêt de cet instrument en comparant l'angle sous lequel est vue l'image intermédiaire à travers la lunette par rapport au diamètre angulaire de l'objet à l'œil nu. L'image perçue est grossie, et le grossissement G se lit directement sur la figure :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f'_{\text{objectif}}}{f'_{\text{oculaire}}}$$

On a donc intérêt à utiliser un objectif de grande focale f'_{objectif} et un oculaire de très petite focale f'_{oculaire} .

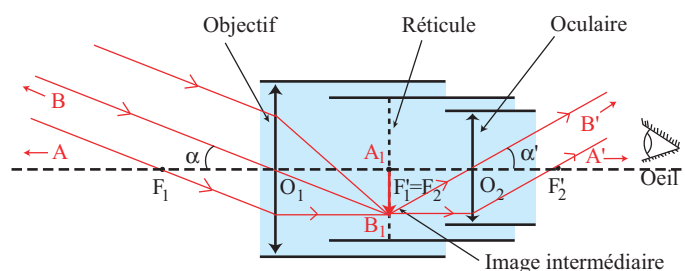


FIGURE XXI.6 – Lunette de visée réglée sur l'observation d'un objet à l'infini.

Remarque : Si l'on veut obtenir un très fort grossissement, l'encombrement de l'objectif devient important. En effet, l'encombrement minimal obtenu pour une lunette réglée à l'infini vaut $f'_{\text{objectif}} + f'_{\text{oculaire}}$. On peut alors utiliser une association de plusieurs lentilles pour remplacer la lentille convergente de l'objectif. On parle alors de **téléobjectif**. Ce type d'objectif est notamment utilisé en photographie.



Comment créer un objet à l'infini au laboratoire ? :

Afin d'apprendre à régler une lunette à l'infini, il est utile de savoir créer un objet à l'infini au laboratoire.

On utilise pour cela un **collimateur**, constitué de deux tubes de même axe, l'un portant une lentille convergente, et l'autre l'objet. L'objet est en général une fente fine que l'on éclaire par l'arrière. Une molette permet de régler le tirage du collimateur de façon à placer l'objet dans le plan focal objet de la lentille de façon à obtenir une image à l'infini. Un collimateur s'apparente donc à un oculaire, mais ne peut pas être utilisé comme tel car sa focale est généralement plus importante que celle d'un oculaire.

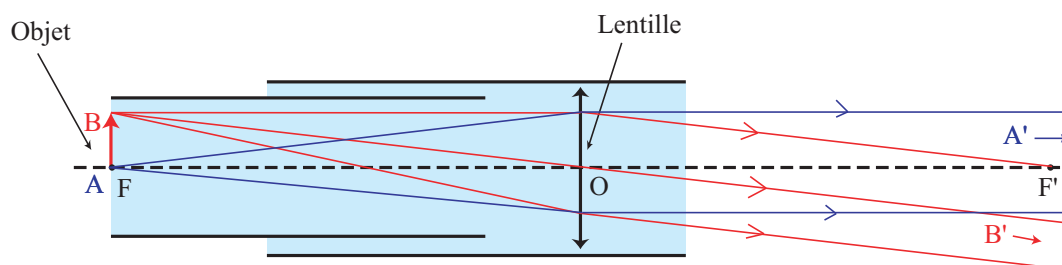


FIGURE XXI.7 – Schéma d'un collimateur.