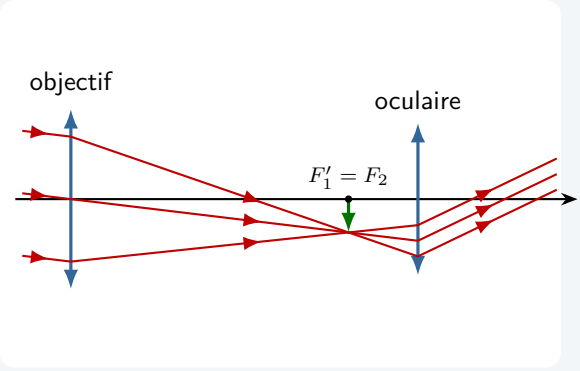
LYCÉE D'EXCELLENCE
MOHAMMED VI
LEM6 - CASABLANCA

Classes préparatoires aux grandes écoles
MPSI — Physique-chimie
Année 2026-2027

03 OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

Modèles de quelques dispositifs optiques

Instruments d'optique — L'œil — L'appareil photographique — La loupe — La lunette astronomique



« *On ne voit bien qu'avec le cœur. L'essentiel est invisible pour les yeux.*

— Antoine de Saint-Exupéry, *Le Petit Prince* (1943)

physionova
physionova.academy

Pr. CHARIFI
professeurcharifi@gmail.com

Simulation associée sur **PhysioNova**
« Lentille mince »

O3 — Dispositifs optiques

Ce qu'il faut savoir faire à la fin du chapitre

- Distinguer instruments objectifs (de projection) et subjectifs (visuels) ; définir diamètre apparent et grossissement.
- Modéliser l'œil par une lentille de vergence variable et un capteur fixe ; définir PR, PP, accommodation et limite de résolution angulaire.
- Corriger un défaut de l'œil à l'aide d'une lentille.
- Modéliser un appareil photographique ; relier focale, champ, nombre d'ouverture, durée d'exposition et profondeur de champ.
- Étudier la loupe et la lunette astronomique : système afocal, grossissement, cercle oculaire.

Comment lire ce cours

Les résultats sont repérés par des étiquettes : R à connaître par cœur ; D démonstration à savoir refaire ; M méthode à maîtriser. La simulation PhysioNova « Lentille mince » permet de reproduire chaque instrument (œil, objectif, loupe) en plaçant l'objet et la lentille, et de suivre la formation de l'image.
Des **exercices d'application corrigés** sont placés juste après les notions qu'ils illustrent ; les exercices d'approfondissement et les classiques des concours, également corrigés, terminent le chapitre.

Table des matières

I Instruments d'optique : généralités . . . 3
I.1 Deux familles d'instruments . . . 3
I.2 Diamètre apparent et grossissement . . . 3
II L'œil . . . 4
II.1 Modèle de l'œil réduit . . . 4
II.2 Punctum remotum et punctum proximum . . . 4
II.3 Limite de résolution angulaire . . . 5
II.4 Défauts de l'œil et correction . . . 5
III L'appareil photographique . . . 6
III.1 Modélisation . . . 6
III.2 Focale et champ . . . 7
III.3 Exposition . . . 7
III.4 Capteur et profondeur de champ . . . 7
IV La loupe . . . 9
V La lunette astronomique . . . 9
V.1 Constitution et réglage . . . 10
V.2 Grossissement . . . 10
V.3 Cercle oculaire et luminosité . . . 11
VI Synthèse . . . 11
VII Exercices d'approfondissement . . . 12
VIII Classiques des concours . . . 13

I Instruments d'optique : généralités

I.1 Deux familles d'instruments

Un instrument d'optique est une association de systèmes optiques centrés (lentilles, miroirs, diaphragmes) qui forme une image d'un objet. On distingue :

- les instruments **objectifs**, ou de projection, qui forment une image *réelle* sur un écran ou un capteur : appareil photographique, projecteur, télescope muni d'une caméra ;
- les instruments **subjectifs**, ou visuels, qui forment une image *virtuelle* destinée à être regardée par l'œil : loupe, microscope, lunette. Pour une observation sans fatigue, l'image finale est rejetée à l'infini.

I.2 Diamètre apparent et grossissement

Définition — Diamètre apparent R

Le **diamètre apparent** α d'un objet est l'angle sous lequel il est vu depuis l'œil, c'est-à-dire l'angle entre les rayons issus de ses deux extrémités et passant par le centre optique de l'œil. Pour un objet de taille h à la distance $\ell \gg h$, $\alpha \simeq h/\ell$.

Ordres de grandeur

Le Soleil et la Lune ont presque le même diamètre apparent, environ $0{,}5°$ ($9 \times 10^{-3}\,\mathrm{rad}$) : c'est ce qui rend possibles les éclipses totales. Une pièce de $2\,\mathrm{cm}$ vue à bout de bras ($70\,\mathrm{cm}$) : $1{,}6°$.

Définition — Grossissement R

Pour un instrument subjectif, la taille de l'image sur la rétine est proportionnelle au diamètre apparent. On caractérise donc l'instrument par son **grossissement**

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha},$$

où α' est le diamètre apparent de l'image vue à travers l'instrument et α celui de l'objet vu à l'œil nu (dans des conditions à préciser).

Les autres caractéristiques d'un instrument sont son **champ** (ensemble des points objets dont l'image parvient au récepteur), sa **profondeur de champ** (zone de l'espace objet vue nette sans nouveau réglage) et son **pouvoir de résolution** (plus petit écart, linéaire ou angulaire, entre deux points encore séparés).

II L'œil

II.1 Modèle de l'œil réduit

L'œil est une boule d'environ $2{,}5\,\mathrm{cm}$ de diamètre. La lumière y traverse successivement la cornée, l'humeur aqueuse, la pupille (ouverture de l'iris), le cristallin et le corps vitré avant d'atteindre la rétine, tapissée de cellules photosensibles (cônes et bâtonnets).

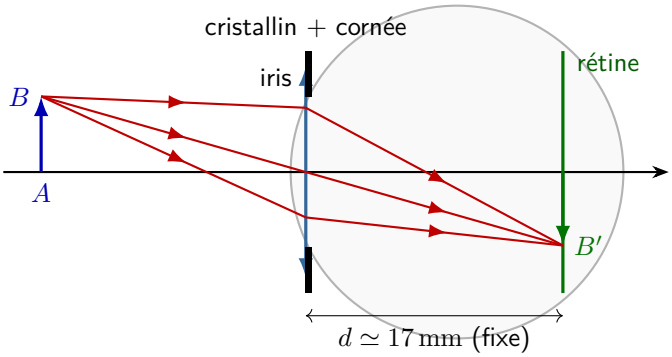


Fig. 1 : Modèle de l'œil : lentille de vergence variable, diaphragme (iris) et capteur plan fixe (rétine).

Définition — Œil réduit R

On modélise l'œil par :

- une **lentille mince convergente** de vergence variable (essentiellement la cornée et le cristallin) ;
- un **diaphragme** : l'iris, dont l'ouverture (la pupille) varie de $2\,\mathrm{mm}$ à $8\,\mathrm{mm}$ selon l'éclairement ;
- un **capteur plan** fixe, la rétine, à la distance $d \simeq 17\,\mathrm{mm}$ de la lentille.

Pour voir net, l'image doit se former sur la rétine. La distance d étant fixe, l'œil modifie la courbure du cristallin, donc sa vergence : c'est l'**accommodation**.

II.2 Punctum remotum et punctum proximum

Définition — PR et PP R

- Le **punctum remotum** (PR) est le point le plus éloigné vu net *sans accommoder* (vergence minimale, muscles relâchés). Pour un œil normal, dit **emmétrope**, le PR est à l'infini : $V_{\min} = 1/d \simeq 59\,\delta$.
- Le **punctum proximum** (PP) est le point le plus proche vu net en accommodant au maximum. Pour un œil normal jeune, il est à $d_m \simeq 25\,\mathrm{cm}$ (distance minimale de vision distincte) : $V_{\max} = \frac{1}{d} + \frac{1}{d_m}$.
- L'**amplitude d'accommodation** est $V_{\max} - V_{\min} = \dfrac{1}{d_{\mathrm{PP}}} - \dfrac{1}{d_{\mathrm{PR}}}$ (environ $4\,\delta$ pour un adulte, $10\,\delta$ pour un enfant, moins de $1\,\delta$ après 60 ans).

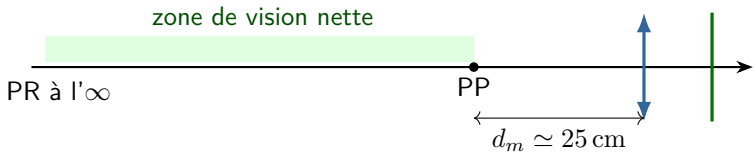


Fig. 2 : Plage d'accommodation d'un œil emmétrope.

Remarque

Regarder un objet au PR est le plus confortable : l'œil n'accommode pas. C'est pourquoi les instruments subjectifs sont réglés pour donner une image à l'infini (pour un œil emmétrope).

II.3 Limite de résolution angulaire

Pouvoir séparateur de l'œil R

Deux points sont vus séparés si leurs images se forment sur deux cellules distinctes de la rétine. Avec un écart entre cellules $\ell \simeq 5\,\mu\text{m}$, la limite de résolution angulaire vaut

$$\varepsilon \simeq \frac{\ell}{d} \simeq 3 \times 10^{-4}\,\text{rad} \simeq 1'.$$

La diffraction par la pupille ($D \simeq 3\,\text{mm}$) donne une limite du même ordre : $\lambda/D \simeq 2 \times 10^{-4}\,\text{rad}$. Un détail n'est perçu que si son diamètre apparent dépasse ε.

Ordres de grandeur

- À $25\,\text{cm}$, l'œil distingue des détails de $75\,\mu\text{m}$ (l'épaisseur d'un cheveu).
- Champ visuel : environ $180°$ horizontalement pour les deux yeux (dont environ $120°$ de vision binoculaire), mais la vision précise ne couvre que quelques degrés autour de l'axe ; on déplace le regard pour explorer une scène.
- Unités : $1° = 60'$ (minutes d'arc) et $1' = 60''$ (secondes d'arc).

II.4 Défauts de l'œil et correction

Œil	PR et PP	Défaut	Correction
emmétrope	PR à l'infini, PP à $25\,\text{cm}$	—	—
myope	PR à distance finie, PP rapproché	trop convergent	lentille divergente
hypermétrope	PR virtuel (derrière l'œil), PP éloigné	pas assez convergent	lentille convergente
presbyte	PP éloigné (âge)	accommodation réduite	convergente pour la vision de près

D'autres défauts sortent du modèle de la lentille sphérique : l'**astigmatisme** (cornée non sphérique, corrigée par des verres cylindriques), la **cataracte** (opacification du cristallin, remplacé chirurgicalement par un implant) ou le **daltonisme** (anomalie génétique d'un type de cônes).

☞ Méthode — Choisir une lentille correctrice M

La lentille doit donner d'un objet à l'infini une image virtuelle située au **PR** de l'œil : celui-ci voit alors au loin sans accommoder. Pour une lentille de contact (accolée à l'œil, en O), cela impose $f'_c = \overline{O\,\text{PR}}$: $f'_c < 0$ pour un myope, $f'_c > 0$ pour un hypermétrope. Le nouveau PP est l'objet dont l'image par la lentille est l'ancien PP. Pour des lunettes à la distance e de l'œil, on applique la même règle avec les distances comptées depuis le verre.

☞ Exercices d'application

EXERCICE 1 — **Ordres de grandeur de la vision** ✦✧✧✧✧

L'œil est modélisé par une lentille à $d = 17\,\text{mm}$ de la rétine ; son pouvoir séparateur est $\varepsilon = 3 \times 10^{-4}\,\text{rad}$.

Q-1) Calculer la vergence de l'œil emmétrope au repos, puis en accommodant au maximum sur $25\,\text{cm}$.

Q-2) À quelle distance maximale distingue-t-on les deux phares d'une voiture, distants de $1{,}5\,\text{m}$?

Q-3) La Lune a un diamètre de $3480\,\text{km}$ et se trouve à $384\,000\,\text{km}$. Calculer son diamètre apparent et la taille de son image sur la rétine.

Correction

Q-1) $V_{\text{min}} = 1/0{,}017 = 59\,\delta$ et $V_{\text{max}} = 59 + 1/0{,}25 = 63\,\delta$.

Q-2) Il faut $1{,}5\,\text{m}/L > \varepsilon$, soit $L < 5\,\text{km}$.

Q-3) $\alpha = 3480/384000 = 9{,}1 \times 10^{-3}\,\text{rad} \simeq 0{,}52°$. L'image est dans le plan focal, de taille $d\,\alpha = 0{,}15\,\text{mm}$, soit une trentaine de cellules.

EXERCICE 2 — **Correction de la myopie** ✦✦✧✧✧

Un œil myope a son PR à $50\,\text{cm}$ et son PP à $12\,\text{cm}$ ($d = 17\,\text{mm}$).

Q-1) Calculer ses vergences extrêmes et son amplitude d'accommodation.

Q-2) Quelle lentille de contact lui permet de voir net à l'infini sans accommoder ? Où se trouve alors son PP ?

Correction

Q-1) $V_{\text{min}} = \frac{1}{0{,}017} + \frac{1}{0{,}50} = 60{,}8\,\delta$; $V_{\text{max}} = 58{,}8 + \frac{1}{0{,}12} = 67{,}2\,\delta$; amplitude $6{,}3\,\delta$.

Q-2) Il faut $f'_c = \overline{O\,\text{PR}} = -50\,\text{cm}$, soit $V_c = -2{,}0\,\delta$ (divergente). Le nouveau PP a pour image l'ancien : $\frac{1}{-0{,}12} - \frac{1}{\overline{OA}} = -2$, d'où $\overline{OA} = -15{,}8\,\text{cm}$. Le myope corrigé voit net de $16\,\text{cm}$ à l'infini.

III L'appareil photographique

III.1 Modélisation

Définition — Modèle de l'appareil photographique R

- L'**objectif** (en réalité un ensemble de lentilles corrigeant les aberrations) est modélisé par une lentille mince convergente de distance focale f' (de $15\,\text{mm}$ à plus de $500\,\text{mm}$).
- Un **diaphragme** de diamètre D réglable est accolé à l'objectif ; on définit le **nombre d'ouverture** $N = f'/D$.
- Le **capteur** (matrice de pixels CCD ou CMOS, autrefois une pellicule) est placé à la distance $p' = \overline{OA'}$ de l'objectif. La **mise au point** consiste à régler p' pour que l'image se forme sur le capteur : pour un objet à la distance x, $p' = \dfrac{f'x}{x - f'}$.

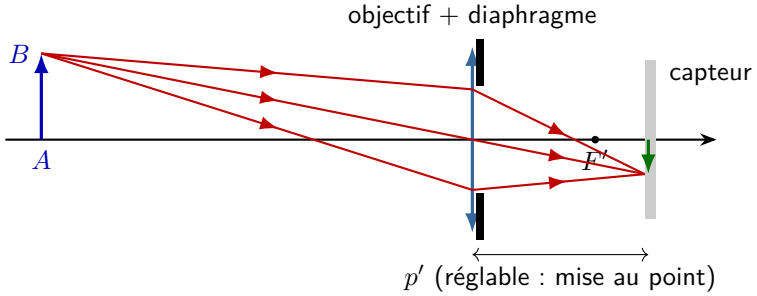


Fig. 3 : Modèle de l'appareil photographique.

III.2 Focale et champ

Un objet lointain vu sous l'angle α a une image de taille $f'\alpha$ sur le capteur (O2). À capteur donné :

- une **grande focale** (téléobjectif) donne une image grande d'un petit sujet : le **champ** est étroit ;
- une **courte focale** (grand-angle) donne un champ large mais des détails petits.

Pour un capteur de largeur L, le champ angulaire horizontal vaut $2\arctan\frac{L}{2f'}$. Le champ dépend donc aussi de la taille du capteur : avec un capteur plus petit que le format « plein format » ($24\,\text{mm} \times 36\,\text{mm}$), le champ est réduit. On parle de **focale équivalente**, celle qui donnerait le même champ en plein format : elle s'obtient en multipliant f' par un facteur de conversion (environ $1{,}5$ pour un capteur APS-C, 2 pour un capteur 4/3).

III.3 Exposition

Énergie reçue par le capteur R

L'énergie lumineuse reçue par unité de surface du capteur est proportionnelle à la surface du diaphragme, $\propto D^2$, divisée par la surface de l'image, $\propto f'^2$, et à la durée d'exposition τ :

$$\mathcal{E} \propto \frac{\tau}{N^2}.$$

Les valeurs normalisées de N ($1{,}4$; 2 ; $2{,}8$; 4 ; $5{,}6$; 8 ; 11 ; 16 ; 22) progressent d'un facteur $\sqrt{2}$: chaque cran divise par deux la lumière reçue, ce que l'on compense en doublant τ.

Une durée d'exposition trop longue donne un **flou de bougé** (mouvement du sujet ou du photographe pendant la prise de vue). La sensibilité du capteur (ISO) permet de raccourcir τ, au prix d'un bruit accru.

III.4 Capteur et profondeur de champ

Le capteur est une matrice de pixels de quelques micromètres de côté ($6\,\mu\text{m}$ pour un capteur de 24 mégapixels plein format). Un point dont l'image est une tache plus petite qu'un pixel apparaît ponctuel : la taille d'un pixel fixe le **cercle de confusion** ε.

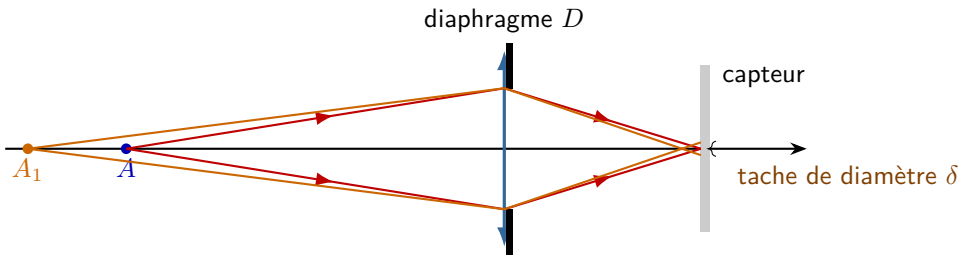


Fig. 4 : Le point A est mis au point ; le point A_1, plus éloigné, donne une tache sur le capteur.

Profondeur de champ R D

L'appareil est mis au point sur un point A. Un point A_1 de l'axe a son image A_1' à la distance $\Delta p'$ du capteur ; le cône de lumière de base D issu de l'objectif donne sur le capteur une tache de diamètre (triangles semblables)

$$\delta \simeq D\,\frac{|\Delta p'|}{p'} \simeq \frac{|\Delta p'|}{N}.$$

Le point A_1 paraît net si $\delta < \varepsilon$. La **profondeur de champ** est l'étendue des positions de A_1 vérifiant cette condition. Elle **augmente** quand on ferme le diaphragme (N grand), quand la focale diminue et quand le sujet s'éloigne.

✗ Attention, erreurs fréquentes

Fermer le diaphragme augmente la profondeur de champ mais réduit la lumière reçue ($\propto 1/N^2$) : il faut allonger la pose. De plus, pour N très grand, la diffraction par le diaphragme étale l'image d'un point sur une tache de taille $\sim \lambda N$ ($\simeq 9\,\mu\text{m}$ à $N = 16$) : on ne gagne plus en netteté.

☞ Exercices d'application

EXERCICE 3 Photographier la Lune ✦✧✧✧✧

Le diamètre apparent de la Lune est $\alpha = 9{,}1 \times 10^{-3}\,\text{rad}$. Le capteur ($24\,\text{mm} \times 36\,\text{mm}$) a des pixels de $6\,\mu\text{m}$.

Q-1) Calculer la taille de l'image de la Lune avec un objectif de $50\,\text{mm}$, puis de $500\,\text{mm}$, et le nombre de pixels correspondants.

Q-2) Quelle focale faudrait-il pour que la Lune occupe toute la hauteur du capteur ?

Correction

Q-1) $f'\alpha = 0{,}46\,\text{mm}$ (76 pixels) puis $4{,}6\,\text{mm}$ (760 pixels).

Q-2) $f' = 24\,\text{mm}/\alpha = 2{,}6\,\text{m}$: seul un télescope atteint de telles focales.

EXERCICE 4 Mise au point et champ ✦✦✧✧✧

Un appareil plein format est équipé d'un objectif de focale $f' = 50\,\text{mm}$.

Q-1) De combien faut-il avancer l'objectif pour passer d'une mise au point à l'infini à une mise au point sur un sujet à $1{,}0\,\text{m}$?

Q-2) Calculer le champ angulaire horizontal (mise au point à l'infini). Que devient-il avec un capteur APS-C de $23{,}6\,\text{mm}$ de large ? Quelle est la focale équivalente ?

Correction

Q-1) À l'infini, $p' = f' = 50\,\text{mm}$; à $1\,\text{m}$, $p' = \dfrac{50 \times 1000}{950} = 52{,}6\,\text{mm}$: l'objectif avance de $2{,}6\,\text{mm}$.

Q-2) $2\arctan\frac{18}{50} = 39{,}6°$ en plein format ; $2\arctan\frac{11{,}8}{50} = 26{,}6°$ en APS-C. Ce champ serait obtenu en plein format avec $f' = 50\,\text{mm} \times \frac{36}{23{,}6} \simeq 76\,\text{mm}$: focale équivalente d'environ $75\,\text{mm}$.

IV La loupe

Définition — Loupe R

Une loupe est une lentille convergente de courte distance focale (quelques centimètres). L'objet est placé entre F et O : l'image est virtuelle, droite et agrandie (O2). Pour une observation sans fatigue, on place l'objet **dans le plan focal objet** : l'image est à l'infini.

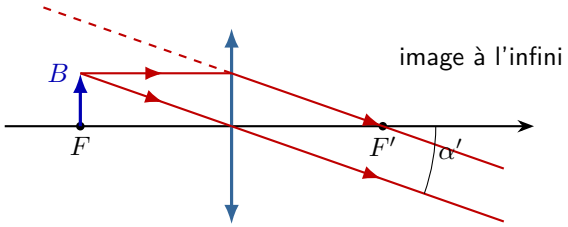


Fig. 5 : Objet dans le plan focal objet : tous les rayons issus de B émergent parallèles, inclinés de $\alpha' = AB/f'$.

Grossissement commercial de la loupe R D

Le rayon issu de B passant par O n'est pas dévié et tous les rayons issus de B émergent parallèles à lui : l'image est rejetée à l'infini et vue sous l'angle $\alpha' = AB/f'$, quelle que soit la position de l'œil derrière la loupe. À l'œil nu, l'objet est vu au mieux au PP, sous l'angle $\alpha_m = AB/d_m$. Le **grossissement commercial** est

$$G_c = \frac{\alpha'}{\alpha_m} = \frac{d_m}{f'} = \frac{V}{4} \quad (V \text{ en dioptries, } d_m = 25\,\text{cm}).$$

☞ Exercices d'application

EXERCICE 5 Latitude de mise au point d'une loupe ✦✦✧✧✧

Une loupe de vergence $20\,\delta$ est utilisée par un œil emmétrope (PP à $25\,\text{cm}$) placé au foyer image de la loupe.

Q-1) Calculer le grossissement commercial.

Q-2) Entre quelles positions doit se trouver l'objet pour être vu net ?

Correction

Q-1) $f' = 5\,\text{cm}$, $G_c = 25/5 = 5$.

Q-2) Image à l'infini : objet en F, à $5{,}0\,\text{cm}$ de la loupe. Image au PP : à $25\,\text{cm}$ de l'œil, donc $\overline{OA'} = -20\,\text{cm}$; $\dfrac{1}{\overline{OA}} = \dfrac{1}{-0{,}20} - 20 = -25\,\text{m}^{-1}$, d'où $\overline{OA} = -4{,}0\,\text{cm}$. La latitude de mise au point n'est que de $1\,\text{cm}$.

V La lunette astronomique

V.1 Constitution et réglage

Définition — Lunette astronomique R

Une lunette astronomique associe :

- un **objectif** L_1 : lentille convergente de grande focale f'_1 (de l'ordre du mètre) et de grand diamètre, qui collecte la lumière ;
- un **oculaire** L_2 : lentille convergente de courte focale f'_2 (quelques centimètres), qui joue le rôle de loupe.

Pour un œil emmétrope au repos, l'image finale d'un astre (objet à l'infini) doit être à l'infini : le système est **afocal**. Il faut pour cela $F'_1 = F_2$, soit $\overline{O_1O_2} = f'_1 + f'_2$.

Justification D. L'objectif donne de l'astre une image intermédiaire A_1B_1 dans son plan focal image. Pour que l'oculaire en donne une image à l'infini, A_1B_1 doit être dans le plan focal objet de l'oculaire : $F'_1 = F_2$.

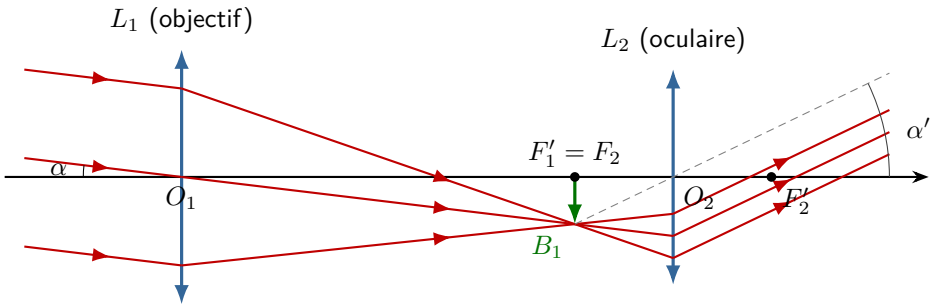


Fig. 6 : Marche d'un faisceau parallèle incliné de α dans une lunette afocale ($f'_1 = 4f'_2$) : il ressort parallèle, incliné de α' en sens inverse.

V.2 Grossissement

Grossissement de la lunette R D

Un astre de diamètre apparent α (angles orientés) donne par l'objectif l'image intermédiaire $\overline{A_1B_1} = -f'_1 \tan\alpha \simeq -f'_1\alpha$ (rayon non dévié passant par O_1). Les rayons émergents sont parallèles au rayon B_1O_2, non dévié par l'oculaire : $\tan\alpha' = \overline{A_1B_1}/(-f'_2)$, donc $\alpha' \simeq f'_1\alpha/f'_2$ en valeur absolue, de signe opposé. D'où

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

$G < 0$: l'image est **renversée**, ce qui ne gêne pas en astronomie.

Ordres de grandeur

Lunette d'initiation : $f'_1 = 900\,\text{mm}$, $f'_2 = 10\,\text{mm}$: $|G| = 90$ et longueur $91\,\text{cm}$. La Lune $(0{,}5°)$ y est vue sous $45°$: on n'en voit qu'une partie.

V.3 Cercle oculaire et luminosité

Définition — Cercle oculaire R

Le **cercle oculaire** est l'image de la monture de l'objectif (de diamètre D_1) par l'oculaire. Toute la lumière entrée dans la lunette le traverse : c'est là que l'on place la pupille de l'œil. Pour une lunette afocale, il est situé juste après F_2' et son diamètre vaut $D_1 \dfrac{f_2'}{f_1'} = \dfrac{D_1}{|G|}$.

Remarque

- L'objectif collecte $(D_1/D_{\text{pupille}})^2$ fois plus de lumière que l'œil nu : la lunette révèle des astres trop peu lumineux pour l'œil.
- La **lunette de Galilée** remplace l'oculaire par une lentille divergente : elle reste afocale si $F_1' = F_2$, est plus courte ($f_1' + f_2' < f_1'$) et donne une image droite ($G > 0$) ; on l'utilise pour les jumelles de théâtre.
- En TP, on règle une lunette « à l'infini » par autocollimation, puis on l'utilise pour régler un **collimateur** (fente placée dans le plan focal d'une lentille), qui fournit un objet à l'infini (goniomètre, O1).

☞ Exercices d'application

EXERCICE 6 — Lunette afocale et cercle oculaire ✦✦✧✧✧

Une lunette est formée d'un objectif ($f_1' = 80\,\text{cm}$, diamètre $D_1 = 6{,}0\,\text{cm}$) et d'un oculaire ($f_2' = 2{,}0\,\text{cm}$).

Q-1) Quelle est la longueur de la lunette réglée pour un œil emmétrope au repos ?

Q-2) Calculer son grossissement.

Q-3) Situer le cercle oculaire et calculer son diamètre. Comparer à la pupille.

Correction

Q-1) $F_1' = F_2$: $\overline{O_1O_2} = f_1' + f_2' = 82\,\text{cm}$.

Q-2) $G = -f_1'/f_2' = -40$.

Q-3) Objet O_1 à $\overline{O_2O_1} = -82\,\text{cm}$: $\dfrac{1}{\overline{O_2C}} = \dfrac{1}{2} - \dfrac{1}{82}$, d'où $\overline{O_2C} = 2{,}05\,\text{cm}$, juste après F_2'. Diamètre $D_1/|G| = 1{,}5\,\text{mm}$, inférieur à celui de la pupille : toute la lumière collectée entre dans l'œil.

VI Synthèse

★ À retenir

- Instruments objectifs (image réelle sur un capteur) et subjectifs (image virtuelle, de préférence à l'infini). Grossissement $G = \alpha'/\alpha$.
- Œil : lentille de vergence variable, capteur fixe à $d \simeq 17\,\text{mm}$; PR (sans accommoder, ∞ pour l'œil normal), PP ($\simeq 25\,\text{cm}$) ; $\varepsilon \simeq 1' = 3 \times 10^{-4}\,\text{rad}$. Correction : la lentille donne de l'infini une image au PR.
- Appareil photo : $N = f'/D$; énergie $\propto \tau/N^2$; champ $\propto 1/f'$; profondeur de champ augmentée en fermant le diaphragme.

- Loupe : objet en F, $G_c = d_m/f'$.
- Lunette afocale : $F'_1 = F_2$, $G = -f'_1/f'_2$; cercle oculaire de diamètre $D_1/|G|$.
- Liens : lentilles minces (O2) ; diffraction et pouvoir séparateur (O1) ; photons et capteurs (Q1).

VII Exercices d'approfondissement

EXERCICE 7 Hypermétropie et presbytie

★★★☆☆

Un œil hypermétrope a son PR virtuel à $50\,\text{cm}$ *derrière* l'œil et son PP à $50\,\text{cm}$ devant.

Q-1) Quelle lentille de contact lui prescrire pour qu'il voie net à l'infini sans accommoder ? Où est alors son PP ? Peut-il lire à $25\,\text{cm}$?

Q-2) Avec l'âge, son amplitude d'accommodation tombe à $1{,}0\,\delta$. Avec la même lentille, où est son PP ? Quelle vergence supplémentaire faut-il pour lire à $25\,\text{cm}$ (verres progressifs) ?

Correction

Q-1) $f'_c = \overline{O\text{PR}} = 50\,\text{cm}$: lentille convergente de $2{,}0\,\delta$. Le nouveau PP a pour image l'ancien : $\frac{1}{-0{,}50} - \frac{1}{\overline{OA}} = 2$, d'où $\overline{OA} = -25\,\text{cm}$: il lit à $25\,\text{cm}$.

Q-2) L'œil corrigé est emmétrope (PR à l'infini) d'amplitude $1{,}0\,\delta$: son PP est à $1{,}0\,\text{m}$. Pour voir à $25\,\text{cm}$ sans dépasser cette amplitude, il faut ajouter $\frac{1}{0{,}25} - 1 = 3{,}0\,\delta$: la partie basse du verre aura $2{,}0 + 3{,}0 = 5{,}0\,\delta$.

EXERCICE 8 La lunette de Galilée

★★★☆☆

Une lunette de Galilée comprend un objectif de focale $f'_1 = 20\,\text{cm}$ et un oculaire divergent de focale $f'_2 = -5{,}0\,\text{cm}$.

Q-1) Quelle est la longueur du tube pour un réglage afocal ? Tracer la marche d'un faisceau incliné.

Q-2) Calculer le grossissement ; l'image est-elle droite ?

Q-3) Comparer à une lunette astronomique de même grossissement.

Correction

Q-1) Il faut $F'_1 = F_2$; F_2 est situé après l'oculaire divergent, d'où $\overline{O_1O_2} = f'_1 + f'_2 = 15\,\text{cm}$. Le faisceau convergeant vers B_1 (dans le plan focal de l'objectif) est intercepté par l'oculaire avant convergence : B_1 est un objet virtuel situé dans le plan focal objet de l'oculaire, qui rend le faisceau parallèle.

Q-2) $G = -f'_1/f'_2 = +4$: image droite.

Q-3) Une lunette astronomique de grossissement 4 ($f'_2 = 5\,\text{cm}$) mesure $25\,\text{cm}$ et renverse l'image. La lunette de Galilée est plus courte et adaptée à l'observation terrestre, mais son champ est plus réduit.

EXERCICE 9 Profondeur de champ et distance hyperfocale

★★★★☆

Un objectif de focale $f' = 50\,\text{mm}$ est mis au point sur un sujet à $x = 5{,}0\,\text{m}$. Le cercle de confusion vaut $\varepsilon = 6\,\mu\text{m}$.

Q-1) Pour $N = 2$ puis $N = 16$, déterminer les distances limites vues nettes. Conclure.

Q-2) On veut que l'infini soit tout juste net. Montrer que la mise au point doit être faite à la distance hyperfocale $H \simeq \dfrac{f'^2}{N\varepsilon}$ et que tout est alors net de $H/2$ à l'infini. Calculer H pour $N = 8$ et $\varepsilon = 30\,\mu\text{m}$ (valeur usuelle pour un tirage papier).

Correction

Q-1) $p' = \dfrac{50 \times 5000}{4950} = 50{,}505\,\text{mm}$ et il faut $|\Delta p'| < N\varepsilon$. Pour $N = 2$: $|\Delta p'| < 12\,\mu\text{m}$; avec $\frac{1}{x} = \frac{1}{f'} - \frac{1}{p'}$, les limites sont $4{,}89\,\text{m}$ et $5{,}12\,\text{m}$. Pour $N = 16$: $|\Delta p'| < 97\,\mu\text{m}$, limites $4{,}20\,\text{m}$ et $6{,}18\,\text{m}$. Fermer le diaphragme augmente nettement la profondeur de champ.

Q-2) L'infini a son image en F', à $p' - f'$ du capteur : il est net si $p' - f' = N\varepsilon$. La relation de Newton $(x - f')(p' - f') = f'^2$ donne $x - f' = \dfrac{f'^2}{N\varepsilon}$, soit $H \simeq \dfrac{f'^2}{N\varepsilon}$. Le point net le plus proche a son image à $2N\varepsilon$ de F', d'où $x - f' = \dfrac{H - f'}{2}$, soit environ $H/2$. Numériquement $H = \dfrac{2500}{8 \times 0{,}030}\,\text{mm} = 10{,}4\,\text{m}$: tout est net de $5{,}2\,\text{m}$ à l'infini.

VIII Classiques des concours

EXERCICE 10 Observation de Jupiter à la lunette

★★★☆☆

Une lunette comporte un objectif de focale $f'_1 = 900\,\text{mm}$ et de diamètre $D_1 = 70\,\text{mm}$, et un oculaire de focale $f'_2 = 10\,\text{mm}$. Elle est réglée en système afocal. On prend $\varepsilon = 1'$ pour l'œil.

Q-1) Établir l'expression du grossissement et le calculer.

Q-2) Jupiter a un diamètre apparent de $45''$. Le voit-on comme un disque à l'œil nu ? dans la lunette ?

Q-3) Situer le cercle oculaire et calculer son diamètre.

Q-4) La diffraction par l'objectif limite la résolution angulaire à $\theta \simeq 1{,}22\lambda/D_1$. Calculer θ pour $\lambda = 550\,\text{nm}$. Quel grossissement minimal faut-il pour exploiter cette résolution ? Est-il utile de grossir beaucoup plus ?

Correction

Q-1) Voir le cours : $G = -f'_1/f'_2 = -90$.

Q-2) À l'œil nu, $45'' < 1'$: Jupiter apparaît ponctuel. Dans la lunette : $90 \times 45'' = 67{,}5' \simeq 1{,}1°$, soit deux fois le diamètre apparent de la Lune à l'œil nu : on voit un disque et ses bandes nuageuses.

Q-3) $\overline{O_2O_1} = -910\,\text{mm}$, $\dfrac{1}{\overline{O_2C}} = \dfrac{1}{10} - \dfrac{1}{910}$: $\overline{O_2C} = 10{,}1\,\text{mm}$; diamètre $D_1/|G| = 0{,}78\,\text{mm}$.

Q-4) $\theta = 9{,}6 \times 10^{-6}\,\text{rad} \simeq 2''$. Pour que deux détails séparés de θ soient vus sous $\varepsilon = 2{,}9 \times 10^{-4}\,\text{rad}$, il faut $|G| \geqslant \varepsilon/\theta \simeq 30$. Au-delà de quelques fois cette valeur (la règle pratique donne $|G|_{\max} \simeq 2D_1$ en millimètres, soit 140), on agrandit la tache de diffraction sans gagner de détails : grossissement « vide ».

EXERCICE 11 Le microscope

Un microscope comporte un objectif ($f'_1 = 5{,}0\,\text{mm}$) et un oculaire ($f'_2 = 25\,\text{mm}$) ; l'intervalle optique vaut $\Delta = \overline{F'_1F_2} = 160\,\text{mm}$. L'œil emmétrope ($d_m = 25\,\text{cm}$) observe l'image finale à l'infini.

Q-1) Où doit se trouver l'image intermédiaire ? En déduire la position de l'objet par la relation de Newton.

Q-2) Calculer le grandissement de l'objectif, la puissance $P = \alpha'/AB$ et le grossissement commercial $G_c = P\,d_m$.

Q-3) La diffraction limite la résolution de l'objectif à environ $0{,}6\lambda/\text{ON}$ avec $\text{ON} = 0{,}50$ et $\lambda = 550\,\text{nm}$. Calculer cette limite. Est-il utile de dépasser le grossissement pour lequel elle est vue sous $\varepsilon = 3\times10^{-4}\,\text{rad}$?

Correction

Q-1) Pour une image finale à l'infini, A_1B_1 est en F_2. Newton pour l'objectif : $\overline{F_1A}\cdot\overline{F'_1F_2} = -f'^2_1$, d'où $\overline{F_1A} = -\dfrac{25}{160} = -0{,}16\,\text{mm}$: l'objet est juste avant le foyer objet.

Q-2) $\gamma_1 = -\dfrac{\overline{F'_1A_1}}{f'_1} = -32$; l'oculaire donne $\alpha' = \dfrac{|\gamma_1|AB}{f'_2}$, d'où $P = \dfrac{\Delta}{f'_1f'_2} = 1{,}28\,\text{mm}^{-1} = 1280\,\delta$ et $G_c = 320$.

Q-3) Limite $0{,}66\,\mu\text{m}$. Elle est vue sous ε pour $P = \varepsilon/0{,}66\,\mu\text{m} = 450\,\delta$, soit $G_c \simeq 110$. Au-delà, on grossit des détails absents de l'image ; les grossissements plus élevés n'apportent que du confort.

EXERCICE 12 Réglages d'un appareil photographique

Un photographe utilise un appareil plein format muni d'un objectif de $50\,\text{mm}$. Une première photo est correctement exposée avec $N = 8$ et $\tau = \frac{1}{125}\,\text{s}$.

Q-1) Il veut réduire la profondeur de champ pour isoler un portrait. Quel réglage modifier, dans quel sens ? Pour $N = 2{,}8$, quelle durée d'exposition garder ?

Q-2) Il photographie ensuite un coureur. Pourquoi une durée de $\frac{1}{1000}\,\text{s}$ est-elle préférable ? Quel nombre d'ouverture choisir pour une exposition correcte ?

Q-3) Un sujet de $1{,}8\,\text{m}$ est à $4{,}0\,\text{m}$. Calculer la taille de son image. Tient-il dans le capteur en cadrage vertical ?

Correction

Q-1) On ouvre le diaphragme (N plus petit). L'exposition $\propto \tau/N^2$ doit rester constante : $\tau = \frac{1}{125}\times\left(\frac{2{,}8}{8}\right)^2 \simeq \frac{1}{1000}\,\text{s}$.

Q-2) Un coureur à $8\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ situé à $4\,\text{m}$ ($|\gamma| \simeq f'/x \simeq 1{,}3\times10^{-2}$) parcourt $6{,}4\,\text{cm}$ en $\frac{1}{125}\,\text{s}$, soit un flou de $0{,}8\,\text{mm}$ sur le capteur ; en $\frac{1}{1000}\,\text{s}$, le flou est divisé par 8 ($0{,}1\,\text{mm}$). Avec τ divisé par 8, il faut N^2 divisé par 8 : $N \simeq 2{,}8$.

Q-3) $|\gamma| \simeq \dfrac{f'}{x - f'} = 0{,}0127$: image de $22{,}8\,\text{mm}$. En cadrage vertical, la grande dimension ($36\,\text{mm}$) suffit ; en cadrage horizontal ($24\,\text{mm}$), c'est juste.