

Approfondissement

Lunette astronomique et photons

Démonstrations exactes, cercle oculaire, pouvoir de résolution, mise au point, échec du modèle ondulatoire, rendement limite d'une cellule : pour aller plus loin

6 exercices · niveau ●●● · durée conseillée : 2 h · calculatrice autorisée

★ À RETENIR — Ce que cette feuille ajoute au cours

- **Partie A** — établir $G = f'_{\text{obj}}/f'_{\text{oc}}$ sans approximation et mesurer l'erreur commise ; comprendre pourquoi un grossissement trop grand n'apporte rien (cercle oculaire, diffraction) ; traiter une visée sur un objet proche, où la lunette n'est plus afocale.
- **Partie B** — montrer quantitativement que le modèle ondulatoire ne peut pas rendre compte de l'effet photoélectrique ; établir le rendement limite d'une cellule photovoltaïque à partir du spectre solaire.

Les passages signalés « hors programme » ne sont pas exigibles au baccalauréat : toutes les relations nécessaires y sont fournies.

■ RAPPEL — Le formulaire du chapitre

Relation de conjugaison $1/\overline{OA'} - 1/\overline{OA} = 1/f'$ • grandissement $\gamma = \overline{OA'}/\overline{OA}$

Exercice 1 Partie A — Le grossissement exact, et le cercle oculaire

●●●

A. Jusqu'où la relation du cours est-elle valable ? On note f'_{obj} et f'_{oc} les distances focales de l'objectif et de l'oculaire d'une lunette afocale, et A_1B_1 l'image intermédiaire d'un objet à l'infini vu sous l'angle θ .

- 1.1** En considérant le rayon issu de B qui passe par le centre optique de l'objectif, puis celui qui émerge en passant par le centre optique de l'oculaire, montrer que $\frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{f'_{\text{obj}}}{f'_{\text{oc}}}$, sans aucune approximation.
- 1.2** Pour $f'_{\text{obj}} = 900 \text{ mm}$, $f'_{\text{oc}} = 9,0 \text{ mm}$ et $\theta = 5,0 \times 10^{-3} \text{ rad}$, calculer $\tan \theta$, puis $\tan \theta'$, puis θ' . En déduire la valeur exacte de θ'/θ et l'écart relatif avec la valeur $f'_{\text{obj}}/f'_{\text{oc}}$ annoncée par le cours.
- 1.3** Reprendre le calcul pour $\theta = 5,0 \times 10^{-4} \text{ rad}$. Énoncer alors précisément la condition de validité de la relation $G = f'_{\text{obj}}/f'_{\text{oc}}$: porte-t-elle sur θ , sur θ' , ou sur les deux ?

B. Le cercle oculaire (hors programme — pour aller plus loin). Tous les faisceaux qui sortent de la lunette traversent un même petit disque, appelé *cercle oculaire* : c'est l'image de la monture de l'objectif à travers l'oculaire (figure 1). C'est là que l'observateur doit placer sa pupille.

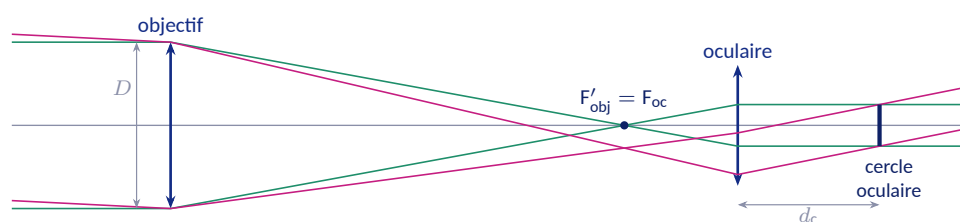


Figure 1 — Deux faisceaux issus de deux points objets différents traversent le même cercle oculaire

- 1.4** La monture de l'objectif, de diamètre D , est à la distance $f'_{\text{obj}} + f'_{\text{oc}}$ de l'oculaire. À l'aide de la relation de conjugaison, montrer que son image se forme à la distance $d_c = f'_{\text{oc}} \left(1 + \frac{1}{G}\right)$ derrière l'oculaire, puis que son diamètre vaut D/G .
- 1.5** Application à une lunette 90/900 munie d'un oculaire de 9,0 mm : calculer d_c et le diamètre du cercle oculaire. Commenter le confort d'observation.
- 1.6** La pupille de l'œil, dilatée dans l'obscurité, a un diamètre de 5,0 mm. Montrer que le cercle oculaire n'entre entièrement dans la pupille que si $G \geq D/5,0 \text{ mm}$, et calculer ce grossissement minimal pour la lunette 90/900. Que se passe-t-il si G est plus petit ?

Exercice 2 Partie A — Grossir ne suffit pas : le pouvoir de résolution



(Hors programme — pour aller plus loin.) À cause de la diffraction par son ouverture circulaire de diamètre D , un instrument ne sépare deux points objets que si leur écart angulaire dépasse $\theta_{\min} = 1,22 \frac{\lambda}{D}$ (en radians). On prendra $\lambda = 550 \text{ nm}$.

■ **DONNÉES** $1'' = 4,85 \times 10^{-6} \text{ rad}$

- 2.1** Calculer $\theta_{\min}$ pour l'œil ($D = 5,0 \text{ mm}$) puis pour la lunette 90/900, en radians et en secondes d'angle. Comparer la valeur obtenue pour l'œil à l'acuité visuelle usuelle, d'environ $1'$.
- 2.2** En déduire la taille du plus petit détail visible à la surface de la Lune ($d = 3,84 \times 10^5 \text{ km}$), à l'œil nu puis avec la lunette.
- 2.3** Un couple d'étoiles doubles est séparé de $2,0''$. Est-il résolu par la lunette 90/900 ? par une lunette de 50 mm de diamètre ? Justifier par le calcul.
- 2.4** Montrer que le grossissement minimal permettant à l'œil d'exploiter tout le pouvoir de résolution d'un instrument de diamètre D vaut $G_{\min} = D/d_{\text{pupille}}$, et retrouver ainsi le résultat de la question 1.6.
- 2.5** Un fabricant annonce « grossissement 600 » pour une lunette de 50 mm de diamètre. Calculer le diamètre du cercle oculaire correspondant et l'angle sous lequel serait vue la limite de résolution de l'instrument. Expliquer en deux phrases pourquoi cette annonce est trompeuse.

Exercice 3 Partie A — Viser un objet proche : la lunette n'est plus afocale



Une lunette d'objectif $f'_{\text{obj}} = 700 \text{ mm}$ et d'oculaire $f'_{\text{oc}} = 20,0 \text{ mm}$ est réglée à l'infini (système afocal). On la pointe vers un héron de 0,30 m de haut, posé à 50,0 m.

- 3.1** Déterminer, avec la relation de conjugaison, la position de l'image intermédiaire du héron par rapport à l'objectif. De combien cette image est-elle décalée par rapport au foyer image F'_{obj} ?
- 3.2** Dans quel sens et de combien faut-il déplacer l'oculaire pour que le faisceau émergent redevienne parallèle ? Ce réglage s'appelle la *mise au point*.
- 3.3** Calculer le grandissement de l'objectif, puis la taille exacte de l'image intermédiaire. Comparer à la valeur approchée $f'_{\text{obj}} \times \theta$ obtenue en traitant le héron comme un objet à l'infini, et donner l'écart relatif.
- 3.4** Après mise au point, calculer l'angle θ' sous lequel l'observateur voit le héron, puis le rapport θ'/θ . Ce rapport est-il exactement égal à $f'_{\text{obj}}/f'_{\text{oc}}$?
- 3.5** La monture ne permet de reculer l'oculaire que de 15,0 mm au maximum. Déterminer la distance minimale à laquelle un objet peut encore être mis au point.

Exercice 4 Partie B — L'effet photoélectrique contre le modèle ondulatoire



Dans le modèle ondulatoire, l'énergie lumineuse arrive de façon *continue* et se répartit uniformément sur la surface éclairée : un électron devrait accumuler peu à peu l'énergie nécessaire à son extraction. On éclaire une plaque de potassium ($W_{\text{ext}} = 2,3 \text{ eV}$) avec une lumière de longueur d'onde 400 nm et d'éclairement très faible, $E_e = 1,0 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. On admet qu'un atome de la surface intercepte la lumière sur un disque de rayon $r = 1,0 \times 10^{-10} \text{ m}$.

■ **DONNÉES** $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ • $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ • $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$ • $hc = 1,99 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m}$

- 4.1 Calculer l'aire interceptée par un atome, la puissance lumineuse qu'il reçoit dans le modèle ondulatoire, puis la durée nécessaire pour qu'un électron y accumule l'énergie W_{ext} (en secondes, puis en jours).
- 4.2 L'expérience montre que les premiers électrons sont émis moins de 1 ns après l'allumage de la source. Conclure sur le modèle ondulatoire.
- 4.3 Dans le modèle particulaire, calculer l'énergie d'un photon de 400 nm, puis le nombre de photons qui atteignent chaque seconde la surface interceptée par un atome. Combien de temps s'écoule-t-il en moyenne entre deux photons reçus par un même atome ?
- 4.4 Expliquer, à partir de ce résultat, pourquoi l'émission peut malgré tout être *immédiate* dès l'allumage de la source, puis pourquoi le nombre d'électrons émis par seconde est proportionnel à l'éclairement alors que $E_{\text{c,max}}$ n'en dépend pas.
- 4.5 Le modèle ondulatoire prévoit que $E_{\text{c,max}}$ augmente avec l'intensité et ne dépend pas de la couleur : citer l'observation qui contredit chacune de ces deux prévisions.

Exercice 5 Partie B — Le rendement limite d'une cellule au silicium



(Hors programme — pour aller plus loin.) Dans une cellule photovoltaïque au silicium, un photon ne libère un porteur de charge que si son énergie dépasse l'énergie de gap $E_g = 1,12 \text{ eV}$; l'excédent d'énergie $E_{\text{photon}} - E_g$ est alors perdu sous forme de chaleur. Chaque photon utile ne fournit donc au mieux que l'énergie E_g . Le tableau ci-dessous donne la répartition de la puissance du rayonnement solaire, pour un éclairement total de $1\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

domaine	UV-bleu	vert	rouge	proche IR	IR lointain
λ moyenne (nm)	380	520	700	950	1500
part de la puissance	8 %	28 %	26 %	22 %	16 %

■ DONNÉES $hc = 1,24 \times 10^3 \text{ eV}\cdot\text{nm}$

- 5.1 Calculer la longueur d'onde maximale λ_g d'un photon capable de libérer un porteur de charge dans le silicium. Quel domaine du tableau est entièrement perdu ?
- 5.2 Pour chacun des quatre autres domaines, calculer l'énergie moyenne d'un photon (en eV), puis la fraction E_g/E_{photon} de la puissance réellement convertible, et enfin la puissance utile correspondante, en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.
- 5.3 En déduire le rendement maximal d'une cellule au silicium selon ce modèle. Les meilleures cellules commerciales atteignent 22 % : citer deux causes de pertes que ce modèle ne prend pas en compte.
- 5.4 On envisage un semi-conducteur de gap $E'_g = 2,0 \text{ eV}$. Calculer sa longueur d'onde seuil, puis reprendre le calcul du rendement maximal. Commenter.
- 5.5 Pourquoi un gap très petit (par exemple 0,3 eV) serait-il également un mauvais choix, bien qu'il absorbe presque tout le spectre solaire ?

Exercice 6 Partie B — Mesurer h avec des diodes électroluminescentes



(Hors programme — pour aller plus loin.) Une diode électroluminescente (LED) ne s'allume que si la tension à ses bornes dépasse une tension de seuil U_s ; l'énergie $e U_s$ acquise par un porteur de charge est alors convertie en un photon, soit $e U_s = hc/\lambda$ (avec $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C). Cinq LED donnent :

λ (nm) : 625 ; 610 ; 590 ; 525 ; 470

U_s (V) : 1,99 ; 2,04 ; 2,11 ; 2,37 ; 2,64

■ **DONNÉES** $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s • $c = 3,00 \times 10^8$ m·s $^{-1}$

- 6.1 Montrer que U_s est une fonction linéaire de $1/\lambda$ et exprimer le coefficient directeur en fonction de h , c et e .
- 6.2 Calculer $1/\lambda$ pour les cinq LED, en μm^{-1} , puis déterminer graphiquement le coefficient directeur de la droite de la figure 2, en V· μm .
- 6.3 En déduire une valeur expérimentale de h , puis l'écart relatif avec $6,63 \times 10^{-34}$ J·s. L'ordonnée à l'origine devrait être nulle : proposer deux causes possibles de l'écart observé.
- 6.4 Prévoir la tension de seuil d'une LED infrarouge de télécommande ($\lambda = 940$ nm). Pourquoi cette LED n'est-elle pas visible ?

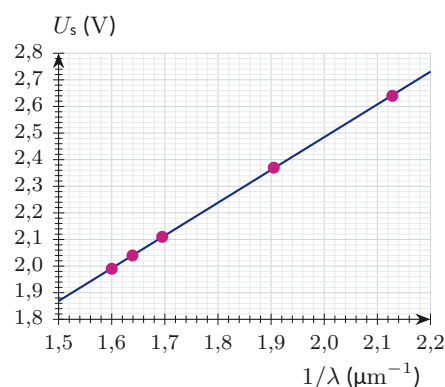


Figure 2 — Tension de seuil des cinq LED