

Lunette astronomique et instruments d'optique

COURS • P15 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	6
Méthodes et pièges	7
Vers le PASS	7
Exercices	8
Corrigés	9

Ce que tu dois savoir faire

- Utiliser le modèle de la lentille mince convergente : foyers, distance focale, vergence, relation de conjugaison et grandissement.
- Construire l'image d'un objet à distance finie ou à l'infini par une lentille mince convergente, à l'aide des rayons particuliers.
- Définir le diamètre apparent d'un objet et le calculer à partir de sa taille et de sa distance.
- Décrire la lunette astronomique : rôle de l'objectif et de l'oculaire, condition d'afocalité et image intermédiaire.
- Construire la marche d'un faisceau lumineux à travers une lunette afocale.
- Définir et établir l'expression du grossissement $G = f_1/f_2$ d'une lunette afocale.
- Définir le cercle oculaire, déterminer sa position et son diamètre, et justifier que l'œil doit s'y placer.
- Relier le fonctionnement de la lunette au modèle de l'œil (observation sans accommodation, pouvoir séparateur).
- Choisir un oculaire en fonction du grossissement et de la luminosité recherchés.

Cours

1. Rappels sur la lentille mince convergente

Une **lentille mince convergente** est caractérisée par son centre optique O, son axe optique, son **foyer objet** F et son **foyer image** F', symétriques par rapport à O. La **distance focale** $f' = OF'$ (en mètres) est positive pour une lentille convergente. La **vergence** C (en dioptries, symbole δ) vaut :

$$C = 1 / f' \text{ (C en } \delta, f' \text{ en m)}$$

Une lentille de distance focale 20 cm a une vergence de 5,0 δ. Plus la vergence est grande, plus la lentille est convergente (plus elle est bombée).

Rayons particuliers.

- Un rayon passant par le centre optique O n'est pas dévié.
- Un rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image F'.
- Un rayon incident passant par le foyer objet F émerge parallèlement à l'axe optique.

On ajoute une propriété très utile pour la lunette : des rayons incidents **parallèles entre eux** (mais inclinés sur l'axe) convergent après la lentille en un même point du **plan focal image**, le point où le rayon passant par O coupe ce plan. Réciproquement, des rayons issus d'un même point du **plan focal objet** émergent parallèles entre eux.

Relation de conjugaison et grandissement. Avec les distances algébriques comptées positivement dans le sens de propagation de la lumière, pour un objet AB et son image A'B' :

$$1/OA' - 1/OA = 1/f$$

$$\gamma = A'B'/AB = OA'/OA$$

Si γ est négatif, l'image est renversée ; si $|\gamma| > 1$, elle est plus grande que l'objet.

Deux cas limites essentiels.

- Un objet à l'**infini** (OA tend vers $-\infty$) a son image dans le **plan focal image** : $OA' = f'$. C'est le cas d'un astre observé par l'objectif d'une lunette.
- Un objet placé dans le **plan focal objet** ($OA = -f'$) a son image à l'**infini** : les rayons émergent parallèles. C'est le cas de l'image intermédiaire vue à travers l'oculaire.

2. L'œil et le diamètre apparent

Modèle réduit de l'œil. L'œil est modélisé par un diaphragme (l'iris, dont l'ouverture est la pupille), une lentille convergente de vergence variable (le cristallin et les milieux transparents) et un écran (la rétine), à distance fixe de la lentille, environ 17 mm. Pour qu'un objet soit vu net, son image doit se former sur la rétine. Pour un objet proche, les muscles ciliaires bombent le cristallin et augmentent sa vergence : c'est l'**accommodation**.

Un œil normal (emmétrope) au repos, c'est-à-dire **sans accommoder**, voit net les objets à l'**infini** : son foyer image est sur la rétine. Il voit net jusqu'à son **punctum proximum**, environ 25 cm, en accommodant au maximum. On en tire une règle d'usage : un instrument d'optique destiné à l'observation visuelle doit donner une image à l'**infini**, que l'œil observe sans accommoder.

Diamètre apparent. La taille perçue d'un objet ne dépend pas seulement de sa taille réelle, mais de l'angle sous lequel on le voit. Le **diamètre apparent** α d'un objet de taille AB, situé à la distance d de l'œil, est l'angle sous lequel l'œil le voit. Pour un objet lointain (petit angle, α en radians) :

$$\alpha \approx \tan \alpha = AB / d$$

La Lune (diamètre 3 474 km, distance moyenne $3,84 \times 10^5$ km) a un diamètre apparent $\alpha = 3\,474 / 3,84 \times 10^5 = 9,0 \times 10^{-3}$ rad, soit environ 0,52°. Le Soleil, 400 fois plus grand mais environ 400 fois plus loin, a presque le même diamètre apparent : c'est ce qui rend possibles les éclipses totales.

Pouvoir séparateur de l'œil. L'œil ne distingue deux points que s'ils sont vus sous un angle supérieur à environ $\varepsilon = 3 \times 10^{-4}$ rad (une minute d'arc), limite fixée par la taille des cellules de la rétine et par la



diffraction par la pupille. Un astre dont le diamètre apparent est inférieur à ε apparaît comme un point. L'intérêt d'une lunette est d'**augmenter l'angle** sous lequel on voit les objets, pour révéler des détails invisibles à l'œil nu.

3. Constitution de la lunette astronomique

Une lunette astronomique comporte deux systèmes optiques convergents, modélisés par deux lentilles minces de même axe :

- l'**objectif** L_1 , tourné vers l'objet observé, de grande distance focale f_1 (de quelques dizaines de centimètres à plus d'un mètre) et de grand diamètre D ;
- l'**oculaire** L_2 , contre lequel on place l'œil, de petite distance focale f_2 (quelques millimètres à quelques centimètres).

Le rôle de l'objectif est de former une image réelle de l'astre, appelée **image intermédiaire** A_1B_1 : l'astre étant à l'infini, cette image se forme dans le plan focal image de l'objectif. Le rôle de l'oculaire est de jouer le rôle d'une loupe et de donner de A_1B_1 une image définitive $A'B'$ que l'œil observe.

Lunette afocale. On règle la lunette pour que l'image définitive soit à l'infini, afin que l'œil normal l'observe sans accommoder. Il faut pour cela que A_1B_1 soit dans le plan focal objet de l'oculaire. Comme A_1B_1 est aussi dans le plan focal image de l'objectif, la condition s'écrit :

$F'_1 = F_2$ (le foyer image de l'objectif est confondu avec le foyer objet de l'oculaire)

Un tel système, qui donne d'un objet à l'infini une image à l'infini, est dit **afocal**. La distance entre les deux lentilles vaut alors $O_1O_2 = f'_1 + f_2$: c'est pratiquement la longueur du tube de la lunette.

Formation de l'image dans une lunette afocale

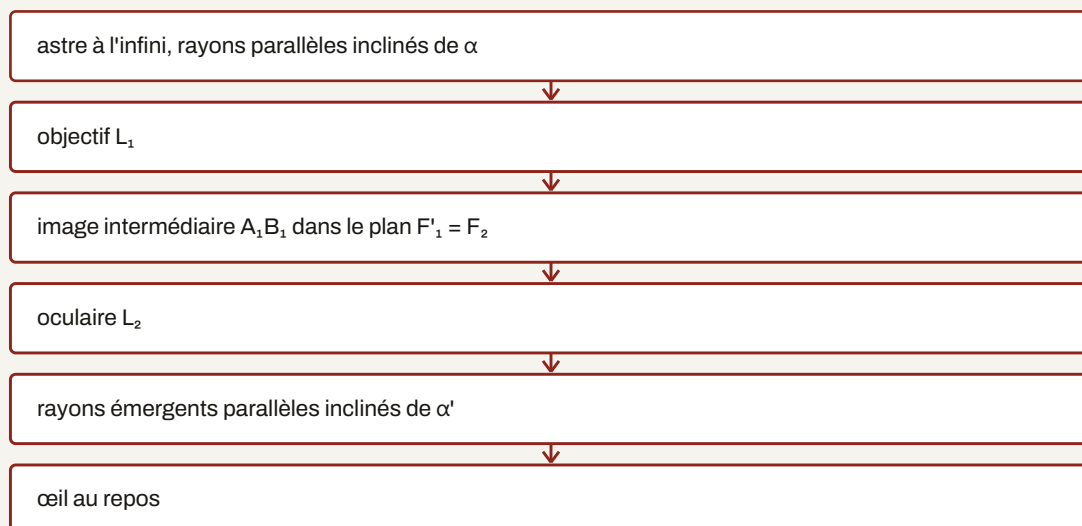


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Marche d'un faisceau. Considérons un faisceau de rayons parallèles venant du bord B de l'astre, incliné d'un angle α sur l'axe. Pour le construire :

Étape 1 : on trace le rayon de ce faisceau qui passe par O_1 : il n'est pas dévié et coupe le plan focal image de L_1 en B_1 . Tous les rayons du faisceau convergent en B_1 après l'objectif. A_1 est sur l'axe, en F'_1 .

Étape 2 : B_1 étant dans le plan focal objet de l'oculaire, les rayons issus de B_1 ressortent de L_2 parallèles entre eux. Leur direction est donnée par le rayon B_1O_2 , non dévié.

Étape 3 : le faisceau émergent est donc parallèle à la droite B_1O_2 et fait l'angle α' avec l'axe.

L'image définitive $A'B'$ est à l'infini. Elle est **renversée** : un faisceau venant du haut de l'objet ressort en descendant. Cela ne gêne pas pour observer les astres, mais rend la lunette astronomique peu pratique pour l'observation terrestre (les jumelles et les longues-vues ajoutent un système redresseur).

4. Le grossissement

Puisque l'objet et l'image sont à l'infini, on ne peut pas parler de grandissement (rapport de tailles).

On compare les **angles** sous lesquels on voit l'objet à l'œil nu et à travers l'instrument. Le

grossissement G est défini par :

$$G = \alpha' / \alpha$$

où α est le diamètre apparent de l'objet vu à l'œil nu et α' le diamètre apparent de l'image vue à travers l'instrument (angles en radians, G sans unité).

Expression pour la lunette afocale. Dans le triangle $O_1A_1B_1$, rectangle en A_1 : $\tan \alpha = A_1B_1 / O_1A_1 = A_1B_1 / f_1$

Dans le triangle $O_2A_1B_1$, rectangle en A_1 (A_1 est en F_2) : $\tan \alpha' = A_1B_1 / O_2F_2 = A_1B_1 / f_2$

(en valeur absolue, l'image étant renversée). Les angles étant petits, $\tan \alpha \approx \alpha$ et $\tan \alpha' \approx \alpha'$. En faisant le quotient :

$$G = \alpha' / \alpha = (A_1B_1 / f_2) / (A_1B_1 / f_1), \text{ soit } G = f_1 / f_2$$

Le grossissement est d'autant plus grand que l'objectif a une grande distance focale et que l'oculaire a une petite distance focale. Avec un même objectif, on change de grossissement en changeant d'oculaire : c'est pourquoi les lunettes sont vendues avec plusieurs oculaires interchangeables. On peut aussi l'écrire avec les vergences : $G = C_2 / C_1$.

Taille de l'image intermédiaire. De $\tan \alpha = A_1B_1 / f_1$, on tire $A_1B_1 = f_1 \cdot \alpha$: elle est proportionnelle à la distance focale de l'objectif. Pour la Lune et un objectif de 1,0 m de focale, $A_1B_1 = 1,0 \times 9,0 \times 10^{-3} = 9,0$ mm. C'est cette image qu'enregistre un capteur photographique placé dans le plan focal de l'objectif, sans oculaire.

5. Le cercle oculaire

Toute la lumière qui entre dans la lunette passe par la monture de l'objectif, puis traverse l'oculaire. Le **cercle oculaire** est l'**image de la monture de l'objectif donnée par l'oculaire**. C'est l'endroit le plus étroit où passent tous les rayons sortant de la lunette : le faisceau lumineux s'y resserre avant de s'élargir de nouveau.

Pourquoi placer l'œil au cercle oculaire. La pupille de l'œil, placée en ce point, reçoit le maximum de la lumière qui a traversé l'instrument, et elle voit simultanément tout le champ de la lunette. Placé ailleurs, l'œil ne recevrait qu'une partie des faisceaux venant des bords de l'image et verrait un champ réduit.

Position du cercle oculaire. L'objet est la monture de l'objectif, en O_1 , avec $O_2O_1 = -(f_1 + f_2)$. La relation de conjugaison appliquée à l'oculaire donne, en notant C' le centre du cercle oculaire :

$$1/O_2C' = 1/f_2 + 1/O_2O_1 = 1/f_2 - 1/(f_1 + f_2) = f_1 / [f_2 (f_1 + f_2)]$$

$$O_2C' = f'_2 (f'_1 + f'_2) / f'_1$$

Comme f'_1 est grand devant f'_2 , O_2C' est à peine supérieur à f'_2 : le cercle oculaire est situé juste après le foyer image de l'oculaire, à quelques millimètres ou centimètres derrière lui. Les oculaires sont conçus pour que l'œil s'y place naturellement (bonnette en caoutchouc).

Diamètre du cercle oculaire. Le grandissement de l'oculaire pour cette conjugaison vaut $\gamma = O_2C'/O_2O_1 = [f'_2 (f'_1 + f'_2)/f'_1] / [-(f'_1 + f'_2)] = -f'_2/f'_1$. Le diamètre d du cercle oculaire est donc lié au diamètre D de l'objectif par :

$$d = D \times f'_2/f'_1 = D / G$$

Conséquences pratiques. Un grand grossissement donne un cercle oculaire petit. Si d est plus grand que la pupille de l'œil (environ 2 mm en plein jour, 6 à 7 mm dans l'obscurité), une partie de la lumière collectée est perdue. Si d devient très petit (inférieur à 0,5 mm environ), l'image est sombre et floue, car la diffraction par la pupille de sortie devient gênante.

6. Luminosité et limite de résolution d'une lunette

Luminosité. La quantité de lumière collectée par l'objectif est proportionnelle à sa surface, donc au carré de son diamètre D . Un objectif de 100 mm collecte $(100/7)^2 \approx 200$ fois plus de lumière qu'une pupille de 7 mm : la lunette révèle des étoiles trop faibles pour l'œil nu. Pour les objets étendus (nébuleuses, Lune), un grossissement plus fort étale la même lumière sur une image plus grande, donc moins lumineuse.

Limite de résolution. La lumière qui traverse l'objectif est diffractée par sa monture circulaire (chapitre sur la diffraction) : l'image d'une étoile n'est pas un point, mais une petite tache d'écart angulaire de l'ordre de λ/D . Deux étoiles séparées par un angle plus petit ne sont pas distinguées, quel que soit le grossissement. Un grand diamètre d'objectif améliore donc à la fois la luminosité et la finesse des détails.

Grossissement utile. Grossir au-delà de ce que permet la diffraction n'apporte aucun détail nouveau : on agrandit une image floue. Le grossissement est utile tant qu'il amène les plus petits détails séparés par l'objectif (angle de l'ordre de λ/D) au-dessus du pouvoir séparateur de l'œil ε , soit G de l'ordre de $\varepsilon \cdot D/\lambda$.

Élément	Caractéristique	Rôle
Objectif L_1	grande focale f'_1 , grand diamètre D	forme l'image intermédiaire, collecte la lumière
Oculaire L_2	petite focale f'_2	agrandit l'angle, joue le rôle de loupe
Réglage afocal	$F_1 = F_2$, $O_1O_2 = f'_1 + f'_2$	image à l'infini, observation sans accommodation
Grossissement	$G = f'_1/f'_2$	rapport des angles α'/α
Cercle oculaire	après F'_2 , diamètre D/G	position de l'œil

7. Autres instruments d'optique

La lunette n'est qu'un exemple d'association de lentilles. Le même raisonnement (objet, image intermédiaire, image finale à l'infini) s'applique à d'autres instruments.

Instruments d'optique usuels

loupe : une lentille convergente, objet dans son plan focal objet

lunette astronomique : objectif et oculaire convergents, système afocal

télescope : miroir concave comme objectif, oculaire convergent

microscope : objectif de très courte focale, image intermédiaire agrandie, oculaire

Repères complémentaires, sans séquence causale

- La **loupe** est une lentille convergente de courte focale ; l'objet placé dans son plan focal objet donne une image à l'infini, vue sous un angle plus grand qu'à l'œil nu au punctum proximum.
- Le **télescope** remplace l'objectif de la lunette par un miroir concave : un grand miroir est plus facile à fabriquer qu'une grande lentille et ne décompose pas la lumière.
- Le **microscope** observe un objet proche : son objectif, de très courte focale, en donne une image intermédiaire réelle et très agrandie, que l'oculaire observe comme une loupe.

Exemples résolus

Exemple 1 : observer la Lune

Énoncé. Une lunette afocale possède un objectif de distance focale $f_1 = 900$ mm et un oculaire de distance focale $f_2 = 10$ mm. On observe la Lune (diamètre 3 474 km, distance $3,84 \times 10^5$ km). a) Calculer la longueur de la lunette. b) Calculer le grossissement. c) Calculer le diamètre apparent α de la Lune à l'œil nu, puis α' à travers la lunette. d) Calculer la taille de l'image intermédiaire.

Résolution. a) La lunette étant afocale, $F_1 = F_2$ et $O_1O_2 = f_1 + f_2 = 900 + 10 = \mathbf{910 \text{ mm}}$. b) $G = f_1/f_2 = 900/10 = \mathbf{90}$. c) $\alpha \approx AB/d = 3\,474 / 3,84 \times 10^5 = 9,05 \times 10^{-3}$ rad (les deux longueurs sont en km, le quotient est sans unité). $\alpha' = G \cdot \alpha = 90 \times 9,05 \times 10^{-3} = \mathbf{0,81 \text{ rad}}$, soit environ 47° : la Lune déborde largement du champ de vision habituel d'un oculaire, on n'en voit qu'une partie. d) $A_1B_1 = f_1 \cdot \alpha = 0,900 \times 9,05 \times 10^{-3} = \mathbf{8,1 \times 10^{-3} \text{ m}}$. $A_1B_1 \approx \mathbf{8,1 \text{ mm}}$.

Exemple 2 : position et taille du cercle oculaire

Énoncé. Une lunette afocale a un objectif de distance focale $f_1 = 1\,000$ mm et de diamètre $D = 100$ mm, et un oculaire de distance focale $f_2 = 25$ mm. a) Calculer le grossissement. b) Déterminer la position du cercle oculaire. c) Calculer son diamètre et comparer à la pupille d'un œil adapté à l'obscurité (6 mm).

Résolution. a) $G = f_1/f_2 = 1\,000/25 = \mathbf{40}$. b) Le cercle oculaire est l'image de la monture de l'objectif par l'oculaire. $O_2O_1 = -(f_1 + f_2) = -1\,025$ mm. Relation de conjugaison : $1/O_2C' = 1/f_2 + 1/O_2O_1 = 1/25 - 1/1\,025 = (41 - 1)/1\,025 = 40/1\,025 \text{ mm}^{-1}$. $O_2C' = 1\,025/40 = \mathbf{25,6 \text{ mm}}$. Le cercle oculaire est à $\mathbf{25,6 \text{ mm}}$

derrière l'oculaire, soit 0,6 mm après son foyer image. c) $d = D/G = 100/40 = 2,5$ mm. Ce diamètre est inférieur à celui de la pupille (6 mm) : toute la lumière qui sort de la lunette entre dans l'œil.

Exemple 3 : le plus petit cratère lunaire visible

Énoncé. On admet que l'œil distingue deux points vus sous un angle d'au moins $\varepsilon = 3,0 \times 10^{-4}$ rad. a) Quelle est la taille du plus petit détail lunaire visible à l'œil nu ? b) Même question à travers une lunette de grossissement $G = 50$, en ne tenant compte que de la limite de l'œil. c) L'objectif a un diamètre $D = 80$ mm. La diffraction limite les détails séparables à un angle de l'ordre de λ/D , avec $\lambda = 550$ nm. Le résultat de la question b) est-il réaliste ? Distance Terre-Lune : $3,84 \times 10^8$ m.

Résolution. a) Un détail de taille s est vu sous l'angle s/d . Il est visible si $s/d \geq \varepsilon$, soit $s \geq \varepsilon \cdot d = 3,0 \times 10^{-4} \times 3,84 \times 10^8 = 1,2 \times 10^5$ m. **Environ 115 km.** b) À travers la lunette, l'angle est multiplié par G : il faut $G \cdot s/d \geq \varepsilon$, soit $s \geq \varepsilon \cdot d/G = 1,15 \times 10^5/50 = 2,3 \times 10^3$ m. **Environ 2,3 km.** c) Limite de diffraction : $\lambda/D = 550 \times 10^{-9} / 0,080 = 6,9 \times 10^{-6}$ rad. Le détail correspondant sur la Lune vaut $6,9 \times 10^{-6} \times 3,84 \times 10^8 = 2,6 \times 10^3$ m. La lunette ne sépare pas de détails plus petits qu'environ **2,6 km** : la limite due à la diffraction est du même ordre que celle de l'œil à $G = 50$. Grossir davantage n'apporterait que peu de détails nouveaux.

Méthodes et pièges

- Méthode type : identifie l'objectif (grande focale, ou plus petite vergence) et l'oculaire, vérifie la condition afocale $F'_1 = F_2$, puis applique $G = f'_1/f'_2$.
- Le grossissement compare des angles, le grandissement compare des tailles. Pour une lunette afocale, objet et image sont à l'infini : seul le grossissement a un sens.
- Pour construire la marche d'un faisceau incliné, commence toujours par le rayon qui passe par O_1 : il donne le point B_1 dans le plan focal. Termine par le rayon B_1O_2 , qui donne la direction de sortie.
- Ne confonds pas vergence et focale : une vergence de 2δ correspond à 0,50 m, pas à 2 m. Convertis en mètres avant d'inverser.
- Les angles de $G = \alpha'/\alpha$ doivent être petits pour remplacer $\tan \alpha$ par α : pour un angle plus grand, garde $\tan$.
- Le cercle oculaire n'est pas au foyer F'_2 mais un peu après : calcule sa position par la relation de conjugaison appliquée à l'oculaire, avec l'objectif comme objet.
- Un grand grossissement ne garantit pas de voir plus de détails : la diffraction par l'objectif (λ/D) fixe la limite.
- L'image d'une lunette astronomique est renversée, ce qui se lit sur la construction : B_1 est de l'autre côté de l'axe par rapport au faisceau incident.

Vers le PASS

En PASS, l'optique géométrique est reprise avec plus de formalisme : relations de conjugaison avec origine au centre et aux foyers (relation de Newton), associations de lentilles, vergence de l'œil et défauts de la vision (myopie, hypermétropie, presbytie) corrigés par des verres de vergence calculée. Le raisonnement en image intermédiaire de la lunette se retrouve tel quel dans le microscope, instrument de base de l'histologie : son grossissement, son pouvoir séparateur limité par la diffraction et l'intérêt de l'immersion dans l'huile sont des questions classiques des QCM de biophysique. Savoir manier vergences, distances focales et angles sans hésiter fait gagner beaucoup de temps.

Suite en PASS : Optique géométrique : réfraction, lentilles et instruments

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. a) Calculer la vergence d'une lentille de distance focale $f' = 20$ cm. b) Calculer la distance focale d'une lentille de vergence $C = 2,5 \delta$.
2. Une lentille convergente de distance focale $f' = 10$ cm donne l'image d'un objet AB de 2,0 cm placé à 30 cm avant la lentille ($OA = -30$ cm). a) Calculer la position de l'image. b) Calculer le grandissement et la taille de l'image. Est-elle droite ou renversée ?
3. Une lunette afocale possède un objectif de focale $f'_1 = 1,20$ m et un oculaire de focale $f'_2 = 20$ mm. a) Calculer son grossissement. b) Calculer la distance entre les deux lentilles.
4. Jupiter a un diamètre de $1,43 \times 10^8$ m. Au moment de l'observation, elle est à $6,3 \times 10^{11}$ m de la Terre. a) Calculer son diamètre apparent. b) À l'œil nu (pouvoir séparateur $\varepsilon = 3 \times 10^{-4}$ rad), voit-on un disque ou un point ? c) Même question à travers une lunette de grossissement 50.
5. On dispose de deux lentilles convergentes de vergences $C_1 = 1,0 \delta$ et $C_2 = 25 \delta$ pour construire une lunette afocale. a) Laquelle sert d'objectif ? Justifier. b) Calculer la distance entre les lentilles. c) Calculer le grossissement.

Niveau 2 : type bac

6. Une lunette astronomique d'initiation est formée d'un objectif de focale $f'_1 = 800$ mm et de diamètre $D = 70$ mm, et d'un oculaire de focale $f'_2 = 16$ mm. a) Expliquer ce que signifie « lunette afocale » et donner la condition correspondante. b) Calculer la longueur de la lunette et son grossissement. c) Déterminer la position du cercle oculaire par rapport à l'oculaire. d) Calculer son diamètre. e) Expliquer pourquoi l'observateur doit placer son œil au cercle oculaire.
7. Une lunette a un objectif de focale $f'_1 = 900$ mm et de diamètre $D = 80$ mm. Elle est livrée avec trois oculaires de focales 25 mm, 10 mm et 6 mm. a) Calculer le grossissement obtenu avec chacun. b) Calculer le diamètre du cercle oculaire dans chaque cas. c) Pour observer une nébuleuse étendue et peu lumineuse la nuit (pupille de 6 mm), quel oculaire choisir ? Justifier. d) Le fabricant indique que le grossissement « utile » maximal vaut environ 2 fois le diamètre de l'objectif exprimé en mm. Un des oculaires dépasse-t-il cette valeur ?
8. On observe la Lune (diamètre apparent $\alpha = 9,0 \times 10^{-3}$ rad) avec une lunette afocale dont l'objectif a une focale $f'_1 = 1,00$ m. a) Calculer la taille de l'image intermédiaire. b) On souhaite que l'image de la Lune vue dans la lunette ait un diamètre apparent $\alpha' = 0,45$ rad. Calculer le grossissement nécessaire et la focale de l'oculaire. c) On retire l'oculaire et on place un capteur photographique de $15,6$ mm $\times$ $23,5$ mm au foyer de l'objectif. La Lune entière tient-elle sur le capteur ?
9. Un élève regarde par erreur dans une lunette afocale ($f'_1 = 750$ mm, $f'_2 = 15$ mm) en plaçant son œil du côté de l'objectif. a) La lunette reste-t-elle afocale ? b) Quel est alors son grossissement ? c) Décrire ce que voit l'élève.

Niveau 3 : vers le PASS

10. Une lunette a un objectif de diamètre $D = 100$ mm. On prend $\lambda = 550$ nm, $\varepsilon = 3,0 \times 10^{-4}$ rad pour l'œil, et l'on admet que la diffraction par l'objectif interdit de séparer deux points vus sous un angle inférieur à λ/D . a) Calculer cet angle limite. b) Calculer le grossissement à partir duquel la limite due à l'œil devient plus fine que celle due à la diffraction. c) Avec $G = 100$, quel est le plus petit détail lunaire séparé ? (distance Terre-Lune $3,84 \times 10^8$ m). d) Conclure sur l'intérêt de dépasser $G = 100$.
11. Pour déterminer la focale de l'objectif d'une lunette, un élève mesure le grossissement obtenu avec plusieurs oculaires :

f_2 (mm)	40	25	20	12,5	10
G	22	36	44	71	90

- a) Quelle relation théorique lie G à f_2 ? Quelle grandeur faut-il porter en abscisse pour obtenir une droite ? b) Calculer cette grandeur pour chaque oculaire (en m^{-1}) et vérifier la linéarité. c) En déduire f_1 .
12. Un astronome dispose d'une lunette de focale $f_1 = 1,20$ m et de diamètre $D = 150$ mm. La nuit, sa pupille s'ouvre à 6,0 mm. a) Montrer que toute la lumière collectée n'entre dans l'œil que si $G \geq D/6,0$ mm. b) En déduire le grossissement minimal, puis la focale maximale de l'oculaire qui exploite toute la lumière. c) Comparer la lumière reçue par la rétine d'une étoile observée à travers cette lunette (avec cet oculaire) et à l'œil nu.
13. Pour chaque affirmation, dire si elle est vraie ou fausse en justifiant. a) Dans une lunette afocale, l'image intermédiaire est dans le plan focal objet de l'objectif. b) Doubler la focale de l'objectif double le grossissement. c) Le cercle oculaire est l'image de l'oculaire par l'objectif. d) Un œil normal observe l'image d'une lunette afocale sans accommoder. e) Augmenter le diamètre de l'objectif augmente le grossissement.

Corrigés

1. a) $C = 1/f'$ avec $f' = 0,20$ m : $C = 1/0,20 = 5,0$ δ.
 b) $f' = 1/C = 1/2,5 = 0,40$ m. $f' = 40$ cm.
2. a) $1/OA' = 1/f' + 1/OA = 1/10 + 1/(-30) = 3/30 - 1/30 = 2/30$ cm $^{-1}$, donc $OA' = 15$ cm (image réelle, après la lentille).
 b) $\gamma = OA'/OA = 15/(-30) = -0,50$. $A'B' = \gamma \times AB = -0,50 \times 2,0 = -1,0$ cm : **image de 1,0 cm, renversée** (γ négatif) et deux fois plus petite que l'objet.
3. a) $G = f_1/f_2 = 1,20/0,020 = 60$.
 b) $O_1O_2 = f_1 + f_2 = 1,20 + 0,020 = 1,22$ m.
4. a) $\alpha \approx AB/d = 1,43 \times 10^8 / 6,3 \times 10^{11} = 2,3 \times 10^{-4}$ rad. $\alpha \approx 2,3 \times 10^{-4}$ rad.
 b) $\alpha < \varepsilon = 3 \times 10^{-4}$ rad : les deux bords de Jupiter ne sont pas séparés, **on voit un point**. c) $\alpha' = G \cdot \alpha = 50 \times 2,27 \times 10^{-4} = 1,1 \times 10^{-2}$ rad, très supérieur à ε : **on voit un disque**, et l'on peut même distinguer ses bandes nuageuses.
5. a) L'objectif doit avoir la plus grande focale, donc la plus petite vergence : L_1 (1,0 δ, $f_1 = 1,0$ m) est l'objectif ; L_2 (25 δ, $f_2 = 1/25 = 0,040$ m = 4,0 cm) est l'oculaire.

b) $O_1O_2 = f'_1 + f'_2 = 1,0 + 0,040 = 1,04 \text{ m}$. c) $G = f'_1/f'_2 = 1,0/0,040 = 25$ (ou $G = C_2/C_1 = 25/1,0$).

6. a) Une lunette afocale donne d'un objet à l'infini une image à l'infini. **Condition : $F'_1 = F_2$** , le foyer image de l'objectif coïncide avec le foyer objet de l'oculaire.

b) $O_1O_2 = 800 + 16 = 816 \text{ mm}$; $G = 800/16 = 50$. c) $O_2O_1 = -816 \text{ mm}$. $1/O_2C' = 1/16 - 1/816 = (51 - 1)/816 = 50/816 \text{ mm}^{-1}$, donc $O_2C' = 816/50 = 16,3 \text{ mm}$ après l'oculaire. d) $d = D/G = 70/50 = 1,4 \text{ mm}$. e) Le cercle oculaire est la zone la plus étroite par laquelle passent tous les rayons sortant de la lunette. **En y plaçant la pupille, l'œil reçoit toute la lumière collectée et voit l'ensemble du champ.**

7. a) $G = 900/25 = 36$; $G = 900/10 = 90$; $G = 900/6 = 150$.

b) $d = D/G : 80/36 = 2,2 \text{ mm}$; $80/90 = 0,89 \text{ mm}$; $80/150 = 0,53 \text{ mm}$. c) Pour un objet étendu peu lumineux, il faut une image lumineuse donc un grossissement faible et un cercle oculaire large. Le cercle de 2,2 mm reste inférieur à la pupille de 6 mm : toute la lumière entre dans l'œil, et l'image est la plus lumineuse des trois. **On choisit l'oculaire de 25 mm.** d) Grossissement utile maximal : $2 \times 80 = 160$. **Aucun oculaire ne dépasse cette valeur**, mais celui de 6 mm ($G = 150$) s'en approche : son image sera sombre (cercle oculaire de 0,53 mm) et ne servira que par une atmosphère très calme.

8. a) $A_1B_1 = f'_1 \cdot \alpha = 1,00 \times 9,0 \times 10^{-3} = 9,0 \times 10^{-3} \text{ m}$. **$A_1B_1 = 9,0 \text{ mm}$.**

b) $G = \alpha'/\alpha = 0,45/9,0 \times 10^{-3} = 50$. $f'_2 = f'_1/G = 1,00/50 = 0,020 \text{ m}$. **$f'_2 = 20 \text{ mm}$.** c) L'image de la Lune au foyer de l'objectif mesure 9,0 mm, inférieure à la plus petite dimension du capteur (15,6 mm). **La Lune entière tient sur le capteur.**

9. a) La distance entre les lentilles est toujours $f'_1 + f'_2$ et les foyers confondus restent confondus : **la lunette reste afocale.**

b) Les rôles sont échangés : le nouvel « objectif » a la focale 15 mm et le nouvel « oculaire » 750 mm. $G = 15/750 = 0,020$. c) Les objets paraissent vus sous un angle 50 fois plus petit : **l'élève voit une image minuscule et renversée**, comme s'il regardait dans des jumelles retournées.

10. a) $\lambda/D = 550 \times 10^{-9} / 0,100 = 5,5 \times 10^{-6} \text{ rad}$. **Angle limite $\approx 5,5 \times 10^{-6} \text{ rad}$.**

b) Avec la lunette, l'œil sépare deux points dont l'angle d'origine dépasse ε/G . Cette limite devient plus fine que λ/D quand $\varepsilon/G < \lambda/D$, soit $G > \varepsilon \cdot D / \lambda = 3,0 \times 10^{-4} / 5,5 \times 10^{-6} = 55$. **Au-delà de $G \approx 55$, c'est la diffraction qui limite.** c) Avec $G = 100$, la limite de l'œil donne $\varepsilon/G = 3,0 \times 10^{-6}$ rad, plus petite que λ/D : c'est la diffraction qui fixe la limite, $5,5 \times 10^{-6}$ rad. $s = 5,5 \times 10^{-6} \times 3,84 \times 10^8 = 2,1 \times 10^3$ m. **Plus petit détail $\approx 2,1$ km.** d) Au-delà de $G \approx 55$, augmenter G agrandit l'image sans faire apparaître de détails plus fins. **Dépasser $G = 100$ n'apporte pas de nouveaux détails** ; cela rend seulement l'image plus grande, plus sombre et plus floue. Seul un objectif plus grand améliore la résolution.

11. a) $G = f'_1/f'_2 = f'_1 \times (1/f'_2)$: **G est proportionnel à $1/f'_2$** , que l'on porte en abscisse.

b) $1/f'_2$ en m^{-1} : 25 ; 40 ; 50 ; 80 ; 100. Quotients $G/(1/f'_2)$ en m : $22/25 = 0,88$; $36/40 = 0,90$; $44/50 = 0,88$; $71/80 = 0,89$; $90/100 = 0,90$. Les quotients sont constants à 2 % près : **la relation est linéaire** (droite passant par l'origine). c) Le coefficient directeur vaut $f'_1 \approx 0,89$ m. **$f'_1 \approx 0,89$ m** (environ 890 mm).

12. a) Toute la lumière collectée sort par le cercle oculaire, de diamètre $d = D/G$. Elle entre entièrement dans l'œil si $d \leq 6,0$ mm, soit $D/G \leq 6,0$ mm, c'est-à-dire **$G \geq D/(6,0 \text{ mm})$** .

b) $G_{\min} = 150/6,0 = 25$. $f'_2 = f'_1/G \leq 1,20/25 = 0,048$ m. **$f'_2 \leq 48$ mm.** c) Pour une étoile (source ponctuelle), toute la lumière collectée par l'objectif entre dans l'œil. Le rapport des lumières reçues est le rapport des surfaces collectrices : $(D/d_{\text{pupille}})^2 = (150/6,0)^2 = 25^2 =$ **625 fois plus de lumière.**

13. a) **Faux** : l'astre étant à l'infini, l'image intermédiaire est dans le plan focal **image** de l'objectif (qui est aussi le plan focal objet de l'oculaire).

b) **Vrai** : $G = f'_1/f'_2$ est proportionnel à f'_1 . c) **Faux** : c'est l'image de la monture de l'**objectif** donnée par l'**oculaire**. d) **Vrai** : l'image définitive est à l'infini, l'œil normal la voit nette au repos. e) **Faux** : G ne dépend que des focales. Un objectif plus large augmente la luminosité et améliore la résolution (λ/D plus petit), pas le grossissement.