Physicité

Optique géométrique (exercices)

Modèle de l'optique géométrique

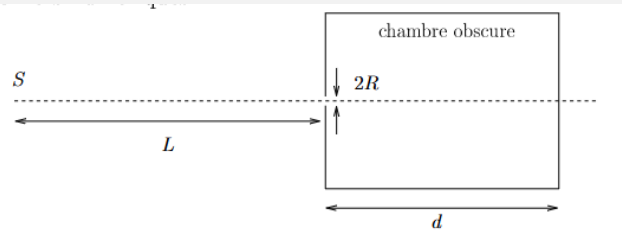
Exercice 1 : Pourquoi négliger la diffraction ? (issu des IPhO 2009 Term Q12)

Pour les constructions en optique géométrique on ne prend pas en compte la diffraction car :

1. On utilise de la lumière polychromatique
2. Les longueurs d'onde utilisées sont suffisamment petites devant celles des dioptres
3. Les longueurs d'onde utilisées sont suffisamment grandes devant celles des dioptres
4. Ce sont des phénomènes tout à fait indépendants

Exercice 2 : Sténopé (issu des IPhO 2011 exo 3)

L'*appareil photographique à sténopé* est un appareil sans viseur ni objectif : il est constitué par une boîte opaque (chambre obscure) dont l'une des faces est percée d'un minuscule trou, de rayon R, laissant entrer la lumière et permettant de former l'image inversée de la réalité extérieure sur la face opposée, située à la distance $d = 20\ \mathrm{cm}$ de la face trouée. Cette image peut servir à impressionner un support photosensible comme une plaque photographique, mais de nos jours, certains artistes utilisent ce procédé avec des boîtiers numériques.



1. En considérant un objet ponctuel situé à une distance $L = 10\ \mathrm{m}$ sur l'axe du trou, déterminer le rayon R optimal du trou pour que le rayon de la tache[a] de lumière au fond de la boîte soit le plus petit possible : on prendra une longueur d'onde moyenne correspondant au maximum de sensibilité de l'œil : $\lambda = 550\ \mathrm{nm}$.
2. Dans cette configuration optimale, quelle est la résolution angulaire de l'appareil à sténopé ?

a. sans accent car sinon, ça ferait tâche !

Exercice 3 : Poudre de Lycopode (issu des IPhO 2012 exo 1)

Un faisceau LASER[a] élargi de longueur d'onde $\lambda \approx 0{,}65\ \mu\mathrm{m}$ arrive sous incidence normale sur une plaque de verre sur laquelle on a déposé aléatoirement des grains de dimension a obtenus en broyant un champignon séché, le lycopode. On observe dans le plan focal image d'une lentille de focale $f' = 1\ \mathrm{m}$ un disque lumineux de rayon $\rho = 1\ \mathrm{cm}$, entouré d'une alternance d'anneaux brillants et sombres.

1. Interpréter ce qui est observé dans le plan focal image de la lentille.
2. Justifier pourquoi la présence de N grains dans le faisceau, tant que N n'est pas trop élevé, ne fait globalement que multiplier l'éclairement observé par N.
3. Si on reprend l'expérience en lumière blanche, on observe toujours un disque lumineux entouré d'une alternance d'anneaux brillants et sombres. Le disque est blanc, bordé de rouge. Interpréter qualitativement.

a. Light Amplified by Stimulated Emission of Radadiation / Lumière amplifiée par émission stimulée

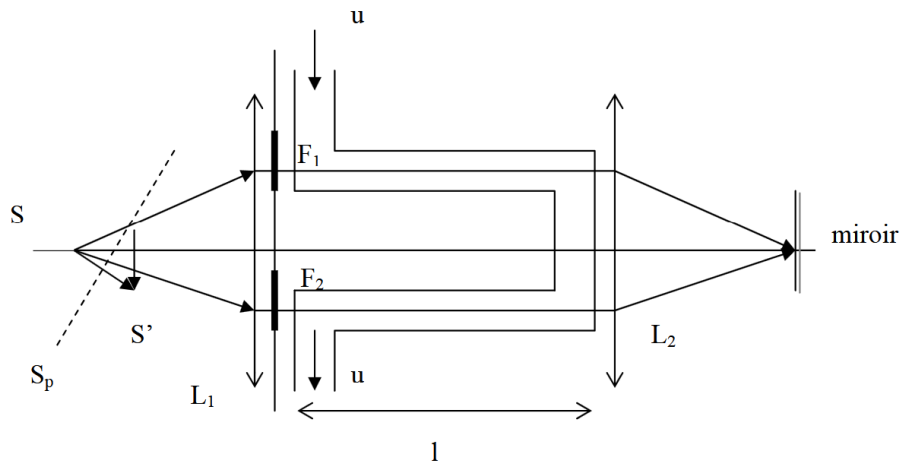
Expérience de Fizeau (issu des IPhO 2008 Problème 1)

En 1851 le physicien français Fizeau imagine une expérience destinée à mettre en évidence la loi de composition des vitesses appliquée à la lumière. Á cet effet il réalise une expérience dans laquelle la lumière parcourt deux trajets de même longueur dans un liquide transparent, de telle sorte que le liquide circule en sens opposé sur les deux trajets lumineux étudiés.

Une source ponctuelle S éclaire deux fentes d'Young F_1 et F_2 placées devant une canalisation coudée. Ce tube, fermé par des fenêtres transparentes, contient un liquide d'indice n qu'une pompe permet d'animer d'une vitesse $u \ll c$ par rapport au laboratoire. On considère le référentiel du laboratoire comme galiléen. Par rapport au liquide, la lumière se propage à la vitesse c/n.

La source ponctuelle S est placée au foyer objet d'une lentille $\mathcal{L}_1$. Les fentes d'Young sont donc éclairées en lumière parallèle. Le faisceau issu de la fente F_1 (resp. F_2) parcourt le tube supérieur (resp. inférieur) rempli de liquide, de longueur l, puis est focalisé sur un miroir placé dans le plan focal de la lentille $\mathcal{L}_2$. Celui-ci renvoie le faisceau dans le tube inférieur (resp. supérieur). Les 2 faisceaux ainsi renvoyés repassent par les fentes et la lentille $\mathcal{L}_1$, et interfèrent en S.

Les deux trajets suivis par la lumière sont identiques pour des vibrations qui passent les fentes F_1 ou F_2.



En absence de circulation du fluide, l'ordre d'interférence zéro se trouve en S'. On fait circuler le liquide comme l'indique le schéma.

On donne $n = 1,33$, $\ell = 1{,}5\ \mathrm{m}$, $u = 7\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ et $\lambda = 540\ \mathrm{nm}$

1. Calcul classique
   (a) Calculer la différence Δt des temps de parcours de la lumière sur ces deux trajets entre S et S' en adoptant la loi classique de composition des vitesses.
   (b) Calculer l'ordre d'interférence p (défini comme le rapport de la différence de marche entre les 2 parcours et de la longueur d'onde) au point S'.
   (c) L'expérience a donné $p_{\text{exp}} = 0,2$. Le résultat obtenu est-il conforme à la valeur expérimentale ?
2. Si on adopte une loi de composition des vitesses de la forme

$$v = \frac{v' + v_{\text{e}}}{1 + \frac{v' v_{\text{e}}}{c^2}}$$

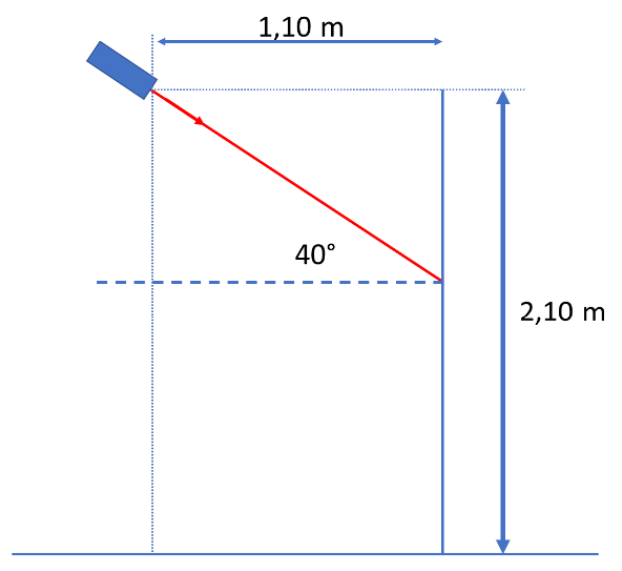
   où
   — v_{e} représente la vitesse d'entraînement,
   — et v' la vitesse relative,

   quelle nouvelle valeur p' obtient-on en S' pour l'ordre d'interférence ?
3. Calculer le rapport $|\frac{p' - p_{\text{exp}}}{p_{\text{exp}}}|$. Comment pensez-vous qu'il faille interpréter les résultats précédents ? L'expérience de Fizeau a été réalisée en 1851, savez-vous quelles sont les hypothèses formulées à l'époque pour justifier l'écart entre la valeur théorique classique et le résultat expérimental ?

Loi de la réflexion

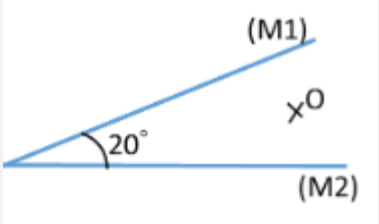
Exercice 4 : Une réflexion trigonométrique (issu des IPhO 2021 Q5)

On considère un faisceau laser qui est dirigé vers un miroir sur lequel il se réfléchit. Dans la géométrie présentée ci-dessous, à quelle distance du miroir le laser va-t-il toucher le sol ?



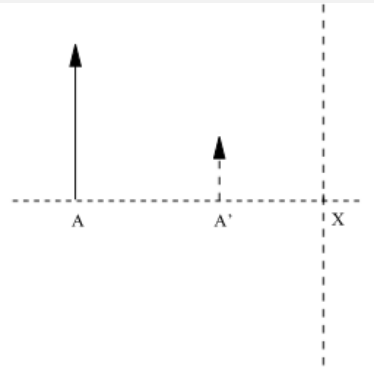
Exercice 5 : Réflexions sur un coin de miroir (issu des IPhO 2017 Term Q9)

Deux miroirs $(M1)$ et $(M2)$ forment entre eux un angle de 20 degrés. Un objet est placé en O, sur la bissectrice formée par l'angle entre les deux miroirs. Combien d'images de O peuvent-elles être vues en tout (incluant le point O lui-même) ? On fait l'hypothèse que l'œil puisse être placé entre les miroirs et puisse observer les réflexions.



Exercice 6 : Système optique mystère (issu des IPhO 2012 Q16)

L'objet placé en A donne une image droite située en A' par un système optique centré, placé en X.

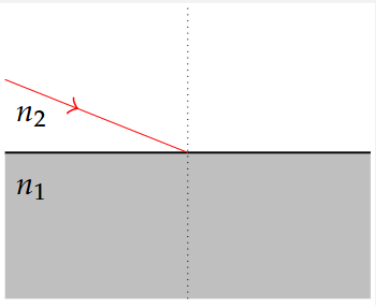


1. Il peut s'agir d'un miroir concave (= convergent).
2. Il peut s'agir d'un miroir convexe (= divergent).
3. Il peut s'agir d'une lentille mince convergente.
4. Il peut s'agir d'une lentille mince divergente.

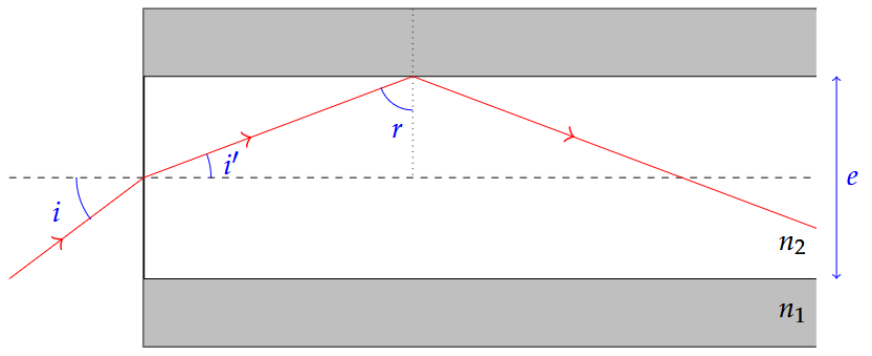
Exercice 7 : Propagation guidée de la lumière (issu des IPhO 2017 exo1 (CPGE))

Découvertes au XVIIe siècle, les lois de Snell-Descartes décrivent le comportement des rayons lumineux lorsqu'ils rencontrent une interface entre deux milieux (l'air et l'eau par exemple). On observe alors les phénomènes de réfraction et de réflexion. Ces deux phénomènes peuvent être exploités pour guider la propagation de la lumière.

1. Décrire le phénomène de réfraction et le phénomène de réflexion. On s'appuiera sur un schéma.
2. En complétant le schéma ci-dessous, préciser dans quelles conditions il est possible d'observer le phénomène de réflexion totale.

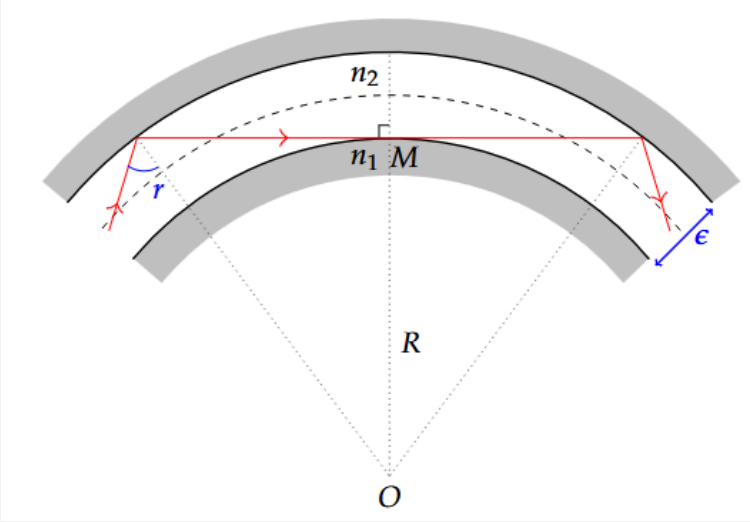


Dans la suite, on s'intéressera à un dispositif permettant de guider la propagation de la lumière : une fibre optique à saut d'indice constituée d'une âme d'indice n_2 et d'une gaine d'indice $n_1 < n_2$.



Un rayon lumineux se propageant initialement dans l'air d'indice $n_{\text{air}} = 1$ pénètre dans la fibre optique en faisant un angle i avec l'horizontale. Il est ensuite réfracté dans l'âme. On souhaite que le rayon soit ensuite réfléchi totalement à l'interface âme-gaine.

3. A quelle condition sur l'angle r, en fonction de n_1 et n_2, est-il possible d'observer la réflexion totale à l'interface âme-gaine ? En déduire à quelle condition sur l'angle i on peut observer la réflexion totale à l'interface âme-gaine.
4. En pratique, les fibres optiques restent rarement droites et sont parfois courbées. Pour un même angle d'entrée i dans la fibre, expliquer qualitativement comment évolue l'angle r lorsque la fibre est courbée. Observera-t-on toujours la réflexion totale lorsque la fibre est courbée ?
5. On se place dans le cas où la fibre est suffisamment courbée pour qu'à la limite de la réflexion totale sur l'interface âme-gaine, le faisceau soit tangent à l'autre interface âme-gaine au point M (voir schéma ci-dessous). L'interface âme-gaine intérieure décrit alors un cercle de rayon R ($OM = R$).

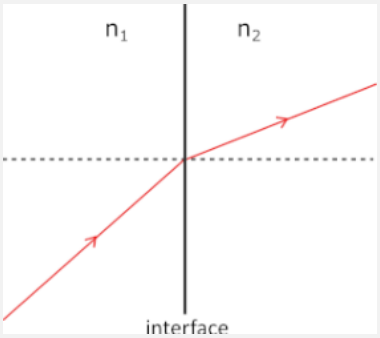


Établir la relation liant ε et R dans ce cas.

Loi de la réfraction

Exercice 8 : Plus ou moins réfringent, tel est la question (issu des IPhO 2025 Term Q1)

On considère l'interface entre deux plaques de plastique transparentes homogènes sur laquelle est envoyée un rayon lumineux. On présente ci-dessous sa trajectoire :

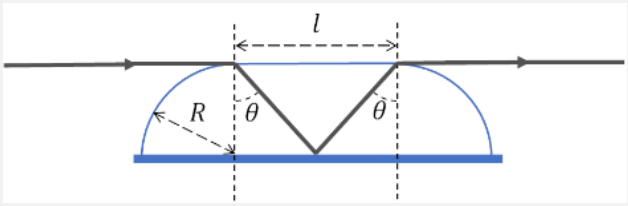


Indiquer les indices optiques possibles pour les deux plaques permettant d'obtenir cette situation :

1. $n_1 = 1,25$ et $n_2 = 1,00$;
2. $n_1 = 1,35$ et $n_2 = 1,65$;
3. $n_1 = 1,65$ et $n_2 = 1,35$;
4. $n_1 = 1,00$ et $n_2 = 1,25$;

Exercice 9 : Longueur d'un bloc de verre (issu des IPhO 2025 Term Q5)

On considère un bloc de verre d'indice optique n qui possède une surface inférieure plane parfaitement réfléchissante, mais dont les côtés gauche et droit sont incurvés en forme de quart de cercle de rayon R. La face supérieure possède une longueur ℓ (voir la figure ci-dessous).



Il est plongé dans l'air, dont on supposera l'indice optique égal à 1. On considère un faisceau incident de lumière, qui arrive en incidence rasante par rapport à la face supérieure. On cherche la condition sur ℓ, pour qu'il ressorte du bloc toujours en incidence rasante par rapport à la face supérieure.

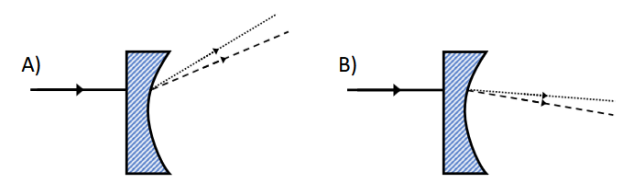
Exercice 10 : Dispersion par la loi de Cauchy (issu des IPhO 2024 Term Q10)

Comme présenté sur la figure ci-dessous, on considère une épaisseur de verre (zone hachurée) placée dans l'air d'indice n = 1. L'indice optique de ce verre dépend de la

longueur d'onde λ suivant la loi de Cauchy :

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2}$$

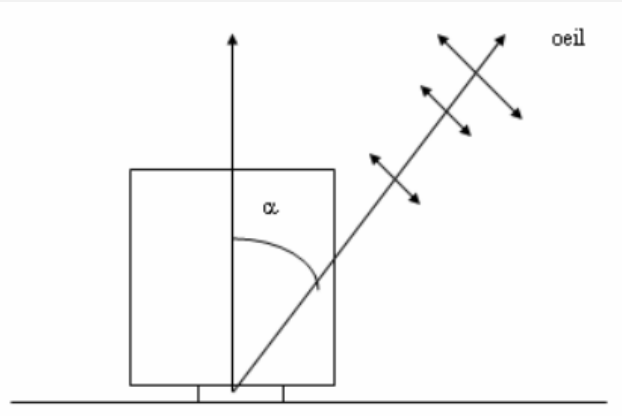
où $a > 1$ et b est une constante positive. Un rayon incident comportant deux couleurs, bleu et rouge, traverse l'épaisseur de verre. Les deux radiations se séparent en deux rayons émergents. Quelle est la situation réaliste physiquement ?



1. Figure A), pointillés : rouge et tirets : bleu ;
2. Figure B), pointillés : rouge et tirets : bleu ;
3. Figure A), pointillés : bleu et tirets : rouge ;
4. Figure B), pointillés : bleu et tirets : rouge.

Exercice 11 : Détermination d'indice optique (issu des IPhO 2007 exo 4)

Un cube de verre d'indice $n = 1,5200$ pour la lumière utilisée est posé sur un support noirci . Entre le cube et le support se trouve une goutte de liquide que l'on regarde à travers la face opposée à celle qui reçoit la lumière.
La source lumineuse est supposée de dimension suffisante pour que la lumière atteigne la face d'entrée sous toutes les incidences de 0 à $\pi/2$.
L'observateur est muni d'un viseur mobile sur un cercle gradué. En inclinant le viseur par rapport à la normale du support, on constate qu'à partir d'une valeur α de l'angle d'inclinaison, la goutte apparaît très brillante . En déduire son indice pour $\alpha = 75°56'$.



Réseau de diffraction

Exercice 12 : Diffraction par un réseau (issu des IPhO 2013 Q10)

On réalise la diffraction d'ondes planes centimétriques ($\lambda = 8{,}0\ \mathrm{cm}$) avec un réseau plan par transmission, sous incidence normale. Le maximum d'ordre 1 est relevé dans la direction $\theta = 30°$ par rapport à la normale au réseau. Quel est le pas du réseau ?

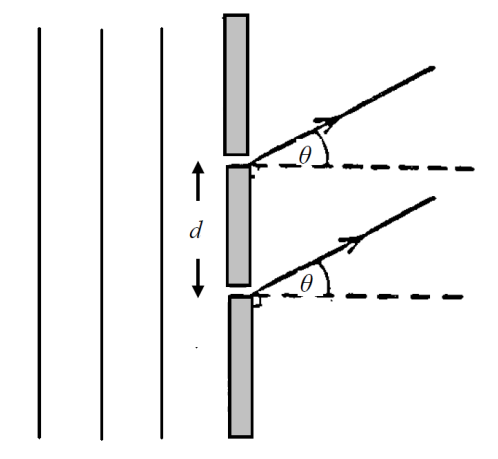
Exercice 13 : Dispersion et interférences (issu des IPhO 2008 Q11)

On réalise des interférences par division de front d'onde. On éclaire en lumière blanche puis on place un filtre coloré. Si on compare les figures obtenues avec le filtre rouge, puis le filtre bleu :

1. Les franges noires sont aux mêmes endroits
2. La figure d'interférences bleue est plus serrée que la rouge
3. La figure d'interférences rouge est plus serrée que la bleue
4. Les deux figures sont simplement décalées

Exercice 14 : Approche vectorielle des réseaux de diffraction (issu des IPhO 1986 T1)

Une onde plane monochromatique, de longueur d'onde λ et de fréquence f est en incidence normale sur deux fentes fines identiques, séparées par une distance d, comme indiqué sur la figure suivante :



L'onde lumineuse émergent par chaque fente est donné, à une distance x, dans la direction θ, au temps t par

$$y = a\cos\left(2\pi\left(ft - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

où l'amplitude a est la même pour les deux ondes (on suppose que x est très grand devant d).

1. Montrer que les deux ondes observée à un angle θ par rapport à la normale a une amplitude résultante A qui peut être obtenue en additionnant deux vecteurs[a], chacun de norme a et avec une direction associée, déterminée par la phase de l'onde lumineuse.

Vérifier géométriquement, dans le plan vectoriel[b] que

$$A = 2a\cos(\theta)$$

où $\beta = \frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)$

2. La double fente est remplacée par un réseau de diffraction avec N fentes régulièrement espacées. Les fentes adjacentes sont séparées d'une distance d. Utiliser la méthode vectorielle d'addition des amplitudes pour montrer que les vecteurs de norme a forment un polygône régulier avec ses sommets sur un cercle de rayon R donné par

$$R = \frac{a}{2\sin(\beta)}$$

Déduire que l'amplitude résultante est

$$\frac{a\sin(N\beta)}{\sin(\beta)}$$

et obtenir la différence de phase résultante relative par rapport à la lumière de la fente sur le bord du réseau.

3. Dessiner, sur le même graphique, $\sin(N\beta)$ et $1/\sin(\beta)$ en fonction de β. Sur un graphe séparé, montrer comment l'intensité de l'onde résultante varie en fonction de β.
4. Déterminer les intensités des maxima principaux d'intensité.
5. Montrer que le nombre maximal de maxima ne peut excéder $\frac{2d}{\lambda} + 1$.
6. Montrer que deux longueur d'ondes λ et $\lambda + \delta\lambda$ où $\delta\lambda \ll \lambda$ produit des maxima principaux avec une séparation angulaire donnée par

$$\Delta\theta = \frac{n\Delta\lambda}{d\cos(\theta)}, \quad n \in \mathbb{Z}$$

Calculer la séparation angulaire pour la raie D du sodium[c] où $\lambda = 589{,}0\ \text{nm}$, $\lambda + \delta\lambda = 589{,}6\ \text{nm}$, $n = 2$ et $d = 1{,}2 \times 10^{-6}\ \text{m}$

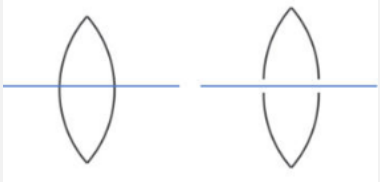
On donne la relation trigonométrique : $\cos(A) + \cos(B) = 2\cos\left(\frac{A+B}{2}\right)\cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$

a. on parle de "phaseur" ou de "vecteur de Fresnel"
b. on parle de "plan de Fresnel"
c. On doit la dénomination "D" à Fraunhofer, car il s'agit de la 4ème raie en partant du rouge qu'il a distingué dans le spectre du Soleil qui traverse l'atmosphère.

Lentille et oeil

Exercice 15 : Lentille évidée (issu des IPhO 2026 Term Q2)

On coupe une lentille mince en deux selon le plan de symétrie indiqué sur le schéma ci-dessous. La lentille mince initiale admet une distance focale image égale à $f' = 20\ \text{cm}$.

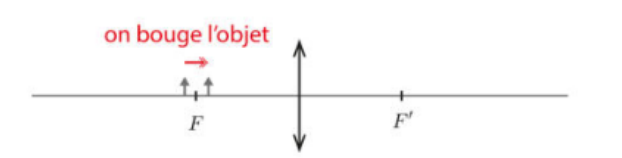


Quelle est la distance focale de chaque demi lentille ?

1. $f' = 10\ \text{cm}$;
2. $f' = 20\ \text{cm}$;
3. $f' = 5\ \text{cm}$;
4. $f' = -10\ \text{cm}$;

Exercice 16 : Un peu de vocabulaire (issu des IPhO 2026 Term Q9)

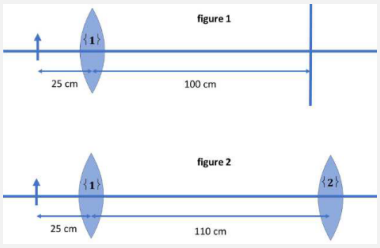
Lorsqu'on déplace un objet d'une position située légèrement en amont du foyer principal objet F d'une lentille convergente à une position située légèrement en aval (voir figure), l'image est $\cdots$ et $\cdots$, puis devient $\cdots$ et $\cdots$.



Compléter les quatre mots manquants par les termes : agrandie, réduite, droite et renversée.

Exercice 17 : Association de deux lentilles (issu des IPhO 2022 Term Q6)

On considère une lentille mince convergente notée $\{1\}$. L'image d'un objet situé à $25\ \text{cm}$ de cette lentille se forme $100\ \text{cm}$ après la lentille (figure 1). On rajoute une deuxième lentille mince convergente de focale $f' = 20\ \text{cm}$ (notée $\{2\}$), située à $110\ \text{cm}$ de la première lentille (voir figure 2). Comment peut on caractériser l'image finale de l'objet, formée par l'association des deux lentilles ($\{1\}$ et $\{2\}$) ?



Exercice 18 : Distance focale d'une loupe (issu des IPhO 2019 Term Q4)

On modélise une loupe comme une lentille sphérique convergente utilisée dans les conditions de l'approximation de Gauss. Un joaillier tient un diamant à $3\ \mathrm{cm}$ derrière sa loupe. à travers elle, il voit le diamant 5 fois plus gros qu'il ne l'est en réalité, et dans le même sens. Quelle est la focale f' de la loupe ?

1. $f' = 3{,}75\ \mathrm{cm}$;
2. $f' = -3{,}75\ \mathrm{cm}$;
3. $f' = 2{,}50\ \mathrm{cm}$;
4. $f' = -2{,}50\ \mathrm{cm}$.

Lunette astronomique de Kepler et de Galilée

Exercice 19 : Nouvelle association de deux lentilles (issu des IPhO 2018 Term Q1)

On considère l'association de deux lentilles convergentes. La première lentille a pour focale f et la deuxième pour focale $2f$. Le foyer image de la première lentille est confondu avec le foyer objet de la seconde lentille. On envoie sur la première lentille un faisceau lumineux, constitué de rayons parallèles à l'axe optique. Le diamètre du faisceau incident est de $1\ \mathrm{cm}$. Comment caractériser le faisceau en sortie de la deuxième lentille ?

1. Le faisceau est divergent.
2. Le faisceau est parallèle à l'axe optique et de diamètre $0{,}5\ \mathrm{cm}$.
3. Le faisceau est convergent.
4. Le faisceau est parallèle à l'axe optique et diamètre $2\ \mathrm{cm}$.

Exercice 20 : Lunette astronomique de Galilée (issu des IPhO 2007 Q14)

On réalise un système afocal, type lunette de Galilée, avec une lentille divergente et une lentille convergente. Afin que le grossissement soit supérieur à 1, il faut :

1. Placer l'œil du côté de la convergente
2. Placer l'œil du côté de la divergente
3. C'est impossible
4. Peu importe

Jumelles

Introduction

Le but de ce problème est d'étudier le fonctionnement d'une paire de jumelles. Une paire de jumelles est un système optique qui permet d'observer des objets lointains et de les grossir.

On regarde avec les deux yeux à travers les jumelles dans lesquelles le système optique de grossissement est répliqué pour chaque œil. Dans tout le problème, on s'intéressera à un seul

de ces deux systèmes optiques.



Paire de jumelles ; d'après Wikipédia

Chaque système optique est conçu pour donner en sortie une image à l'infini.

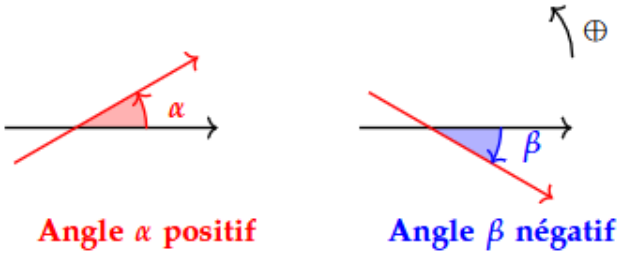
Formules et conventions d'orientation

On rappelle la formule de conjugaison de Descartes pour une lentille mince, de centre optique O et de distance f' :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

avec A la position de l'objet et A' la position de l'image, sur l'axe optique.

On donne ci-dessous les conventions d'orientation des angles orientés, le sens positif étant ici le sens trigonométrique :



1 Modélisation simplifiée des jumelles

Une jumelle est modélisée par deux lentilles minces convergentes : une première lentille $\mathcal{L}_1$, de centre optique O_1, de distance focale image $f'_1 = 200\ \text{mm}$, appelée objectif, et une seconde lentille $\mathcal{L}_2$, de centre optique O_2, de distance focale image $f'_2 = 10\ \text{mm}$, appelée oculaire (figure 2).

Le foyer principal image f'_1 de $\mathcal{L}_1$ et le foyer principal objet F_2 de $\mathcal{L}_2$ sont confondus.

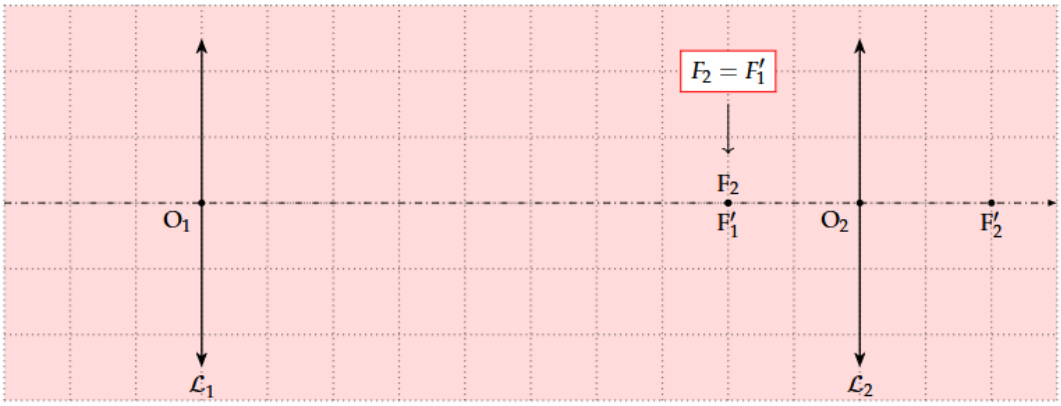
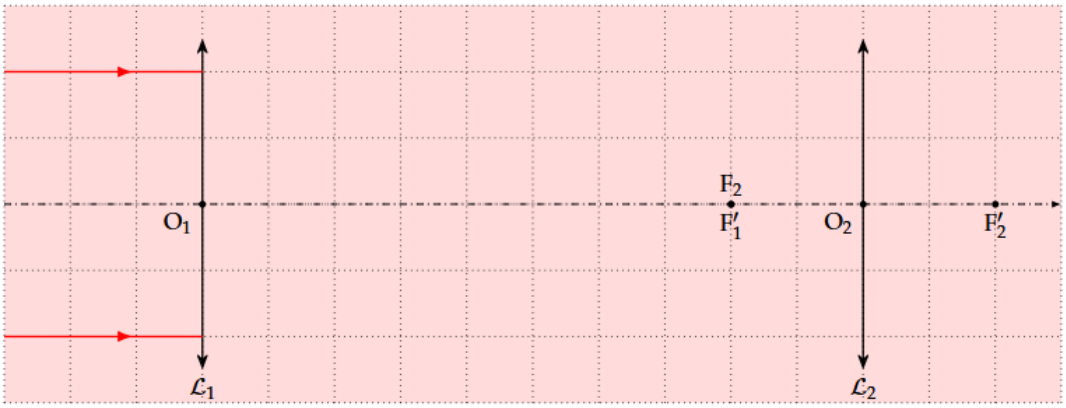


Schéma optique simplifié d'une jumelle (échelle non respectée)

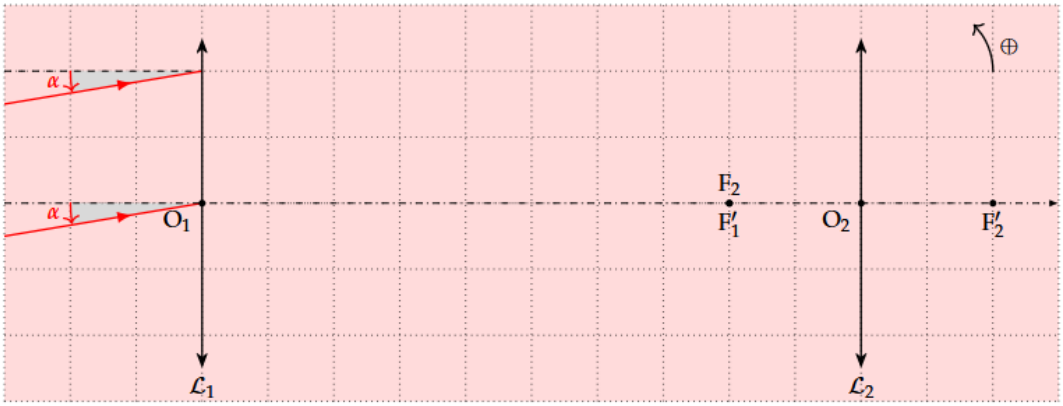
On se place dans les conditions de Gauss : les rayons sont peu inclinés et proches de l'axe optique.

1. On considère un objet A à l'infini sur l'axe optique. Où se trouvent l'image A_1 de A par la lentille $\mathcal{L}_1$ et l'image A' de A_1 par la lentille $\mathcal{L}_2$? Justifier la nécessité de former l'image A' à cet endroit.
2. Construire le trajet des rayons lumineux sur le schéma ci-après.



On considère un objet B à l'infini, tel que les rayons provenant de B sont inclinés d'un angle orienté α par rapport à l'axe optique (α positif et petit devant 1).

3. Construire le trajet des rayons lumineux sur le schéma ci-après. Placer B_1 , image de B par $\mathcal{L}_1$, et noter α' l'angle orienté que font les rayons émergents par rapport à l'axe optique.



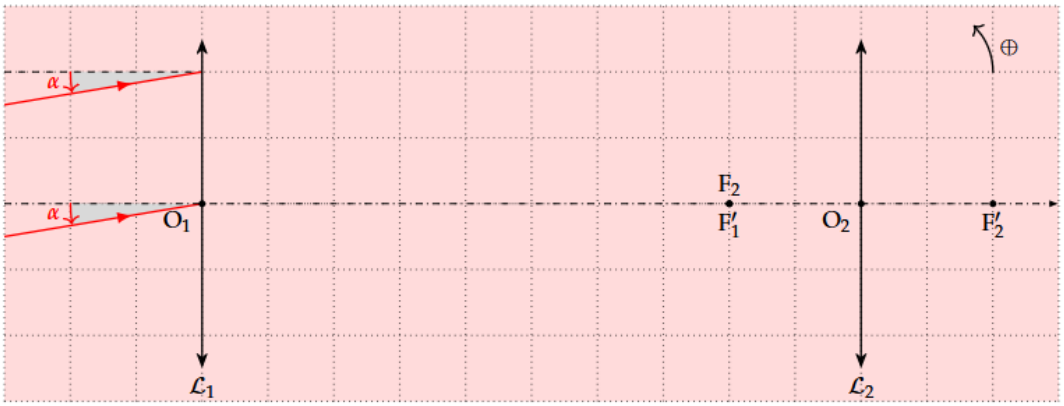
4. Le grossissement G du système optique est par définition :

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

Déterminer l'expression du grossissement G de ce système optique en fonction de f_1' et f_2' (on rappelle qu'on se place dans les conditions de Gauss).

5. Faire l'application numérique. Justifier que ce dispositif permet bien de voir les objets plus gros. Expliquer pourquoi l'image est retournée.
Les jumelles de marine permettent non seulement d'observer des objets à l'infini, mais également des objets proches (à distance finie). Pour observer ces objets proches, on fait tourner une molette qui permet d'éloigner l'oculaire de l'objectif : F_1' est alors situé avant F_2 sur l'axe optique.

6. Sur le schéma ci-après, représenter l'image A_1B_1 de l'objet AB par la lentille $\mathcal{L}_1$.



7. Où doit se situer la lentille $\mathcal{L}_2$ par rapport à A_1 ? Représenter la lentille $\mathcal{L}_2$ sur le schéma précédent, ainsi que le trajet des rayons lumineux issus de A_1B_1 à travers $\mathcal{L}_2$.

8. On note d la distance $\overline{F_1'F_2}$ et $D = -\overline{O_1A}$ la distance positive à laquelle se situe l'objet A par rapport à l'objectif. Déterminer l'expression de D en fonction de d et f_1'.

9. L'oculaire a une amplitude de déplacement maximale $d_{\text{max}} = 10\ \text{mm}$. Calculer jusqu'à quelle distance minimale D_{min} il est possible de voir un objet net à travers la jumelle de marine.

2 Prisme de Porro

On insère dans des jumelles un système de prismes, appelés prismes de Porro (figure 3).

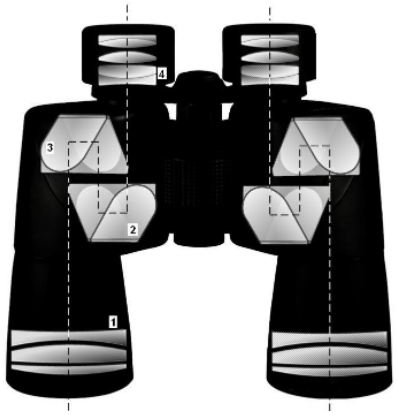


Schéma optique de jumelles. (1) objectifs, (2) et (3) prismes de Porro et (4) lentilles d'oculaire ; d'après Wikipédia

On s'intéresse dans cette partie à l'un de ces prismes (figure 4, à gauche). Il est composé d'un verre transparent d'indice optique $n = 1,5$. Le prisme est entouré d'air dont l'indice optique vaut 1. La tranche d'un prisme de Porro (figure 4, à droite) a la forme d'un triangle KLM rectangle isocèle en K. On s'intéresse à des rayons situés dans le plan (KLM) . La lumière rentre par le dioptre (LM) et ressort par ce même dioptre (figure 4, à droite).

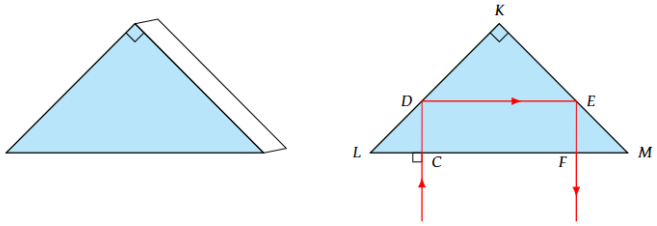
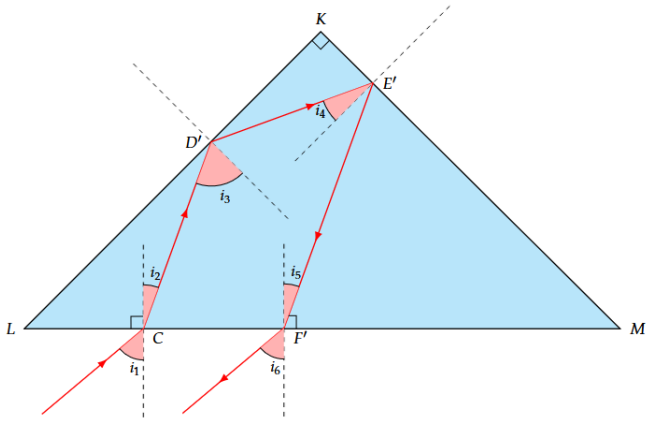


Schéma d'un prisme de Porro (à gauche) ; schéma de la tranche d'un prisme de Porro et trajectoire d'un rayon arrivant sous incidence normale (à droite)

10. Justifier que les angles à la base du prisme sont égaux à $45°$. On considère tout d'abord la trajectoire d'un rayon arrivant sous incidence normale en un point C du dioptre (LM) (figure 4, à droite).
11. Justifier que le rayon lumineux est non dévié après traversée du dioptre au point C .
12. Avec quel angle d'incidence i_1 (par rapport à la normale) le rayon arrive-t-il en D ? Il y a réflexion totale au point D si $n\sin(n_1) > 1$. Est-ce le cas ici ?
13. Déterminer l'angle d'incidence du rayon DE lorsqu'il arrive en E . On identifiera les angles introduits sur un schéma.
14. Justifier que le rayon incident sur le prisme et le rayon émergent de celui-ci sont parallèles.

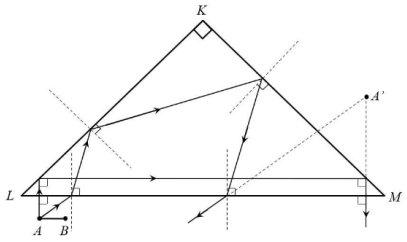
    On considère maintenant une situation où le rayon arrive sous un angle d'incidence quelconque i_1 dans le plan de la tranche du prisme de Porro (figure 5). On suppose qu'il y a réflexion totale sur les dioptres (LK) et (KM) du prisme. Les angles seront exprimés en radians et ne sont pas orientés (ils sont donc tous positifs).



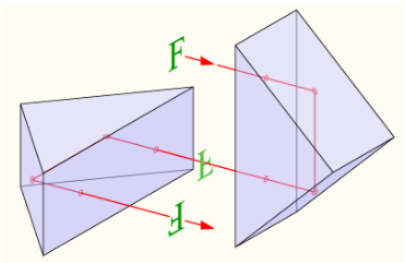
Trajectoire d'un rayon arrivant sous une incidence quelconque dans le plan de la tranche du prisme de Porro (les valeurs relatives des angles ne sont pas respectées)

15. Déterminer l'expression de i_2 en fonction de i_1 et n.

16. Déterminer l'expression de i_3 en fonction de i_2.
17. Déterminer l'expression de i_4 en fonction de i_2.
18. Montrer que $i_5 = i_2$ et en déduire que le rayon émergent en F' est parallèle au rayon incident en C. Justifier que l'image d'un objet à l'infini par un prisme de Porro est à l'infini.
19. On cherche à tracer l'image $A'B'$ d'un objet AB , situé à distance finie, par le prisme de Porro. On a tracé le trajet de deux rayons issus de A , ce qui a permis de déterminer la position de A' . Tracer sur le schéma ci-après le trajet de deux rayons issus de B , afin de déterminer la position de B' . Tracer alors l'image $A'B'$ de AB .



Au sein des jumelles, on a en fait une succession de deux prismes de Porro, tournés de $90°$ l'un par rapport à l'autre. La figure 6 présente comment est vu un « F » situé à l'infini, après traversée des deux prismes de Porro tournés de 90◦ l'un par rapport à l'autre.



Association de prismes de Porro dans une jumelle ; d'après Wikipédia

20. Expliquer qualitativement l'intérêt de l'association de deux prismes de Porro entre l'objectif et l'oculaire d'une paire de jumelles.

Puissance lumineuse

Exercice 21 : Moitié de lentille (issu des IPhO 2026 Term Q3)

Considérez les images obtenues quand on n'utilise qu'une moitié de la lentille dans la question précédente (soit la moitié au dessus de l'axe optique, soit la moitié en dessous) et celle obtenue quand on utilise la lentille entière. Laquelle des affirmations suivantes est juste ?

1. Quand on utilise la moitié haute de la lentille, la moitié haute de l'image disparaît. De même, quand on utilise le moitié basse de la lentille, la moitié basse de l'image disparaît ;
2. La luminosité de l'image obtenue avec une moitié de lentille est la moitié de celle obtenue avec la lentille entière ;

3. Quand on utilise la moitié haute de la lentille, la moitié basse de l'image disparaît. De même, quand on utilise le moitié basse de la lentille, la moitié haute de l'image disparaît ;
4. Aucune différence dans les images obtenues.

Exercice 22 : Image du Soleil (issu de 2016 Term Q12)

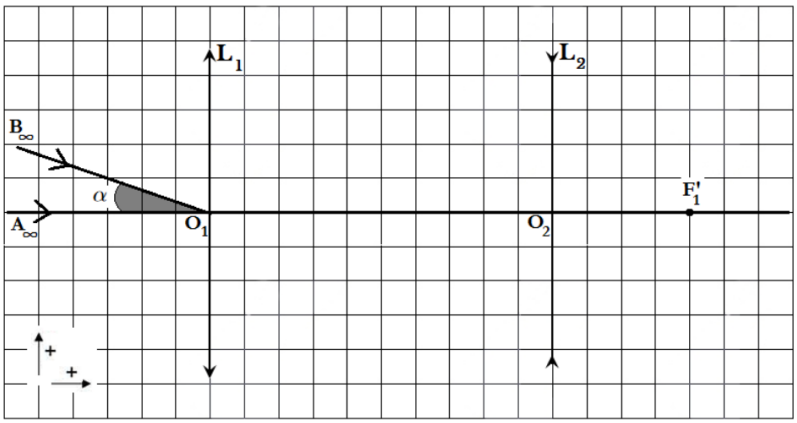
Le Soleil est vu depuis la Terre depuis un rayon angulaire apparent d'environ 5×10^{-3} rad. La puissance surfacique du rayonnement qu'on en reçoit vaut 1300 W m^{-2}. Quelle est la puissance surfacique au voisinage du foyer-image d'une loupe dont le rayon et la distance focale valent respectivement 4 cm et 15 cm ?

Instruments d'optique

1 Lunette de Galilée

Soit une lunette astronomique constituée d'une lentille mince convergente $\mathcal{L}_1$ et d'une lentille mince divergente $\mathcal{L}_2$ positionnées de manière à constituer une lunette afocale.

On utilise cette lunette pour observer deux étoiles A_∞ et B_∞ très éloignées de la Terre et séparées par une distance angulaire α. L'étoile A_∞ est située dans la direction de l'axe optique (O_1O_2) de la lunette (voir figure 1).

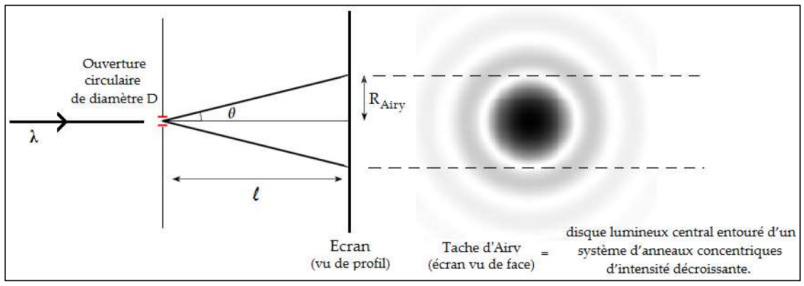


Schématisation d'une lunette de Galilée

1. Sur la figure 1, placer les foyer principaux objet et image de $\mathcal{L}_2$, notés respectivement F_2 et F_2'. Justifier la position attribuée à F_2.
2. Sur la figure 1 :
   - positionner l'image intermédiaire B_1 de l'étoile B_∞ par la lentille $\mathcal{L}_1$; repérer l'angle α' sous lequel l'étoile B_∞ est observée avec la lunette ;
   - tracer la suite du rayon lumineux $B_\infty O_1$;
   - calculer numériquement le grossissement α'/α en se servant du quadrillage de la figure 1.

2 Phénomène de diffraction

Lorsque de la lumière de longueur d'onde pénètre dans une lunette ou un télescope, elle est diffractée par le contour circulaire de son objectif et forme une tache d'Airy autour du point image prévu par l'optique géométrique (voir figure 2 où ce qui est très lumineux est représenté en noir et ce qui est sombre est en blanc).



Lumière diffractée par un diaphragme circulaire

En admettant que le demi-angle d'ouverture θ du cône lumineux central de la figure 2 a pour valeur $1,22$ fois celui de la bande centrale qu'on observerait en remplaçant l'ouverture circulaire par une fente de largeur D, exprimer le rayon R_{Airy} du disque d'Airy en fonction des paramètres du dispositif expérimental. On se placera dans l'hypothèse des petits angles pour θ.

3 Pouvoir de résolution

On considère de nouveau la lunette de Galilée étudiée en question 1 : celle-ci ne fournit des images distinctes des étoiles A et B qu'à la condition de pouvoir séparer leurs images intermédiaires A1 et B1 formées par la lentille $\mathcal{L}_1$.

Définition 1 : Critère de Rayleigh

On commence à distinguer deux points lorsque le maximum d'intensité de la figure de diffraction de l'un coïncide avec la première annulation de l'autre.

Traduire le critère de Rayleigh en une inégalité portant sur la distance A_1B_1 et R_{Airy}. En déduire une inégalité fonction de λ, de α et du diamètre D de $\mathcal{L}_1$ puis donner l'expression de l'angle α_{lim} en dessous duquel la lunette ne permet pas de distinguer A et B selon ce critère.

Cet angle limite est par définition le « pouvoir de résolution » théorique de la lunette. Dans la pratique, ce pouvoir de résolution est limité par les turbulences atmosphériques.

4 Application : télescope Hooker

L'expression du pouvoir de résolution lim obtenue en question 3 est valable pour tout type de lunette astronomique ainsi que pour tout type de télescope.

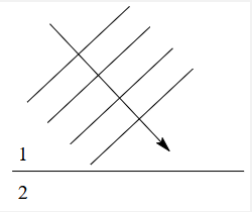
En 1917, l'Observatoire du Mont Wilson (Californie) met en service le télescope le plus puissant du monde : le télescope Hooker possédant un objectif de $2{,}54\ \text{m}$ de diamètre. Celui-ci pulvérise le record de $1{,}52\ \text{m}$ détenu jusqu'alors par un autre télescope du Mont Wilson.

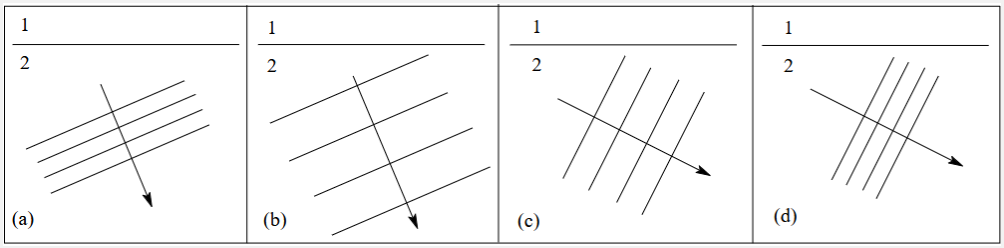
Calculer le facteur existant entre le pouvoir de résolution du télescope Hooker et celui de son prédécesseur.

L'onde lumineuse

Exercice 23 : Plans d'onde (issu des IPhO 2014 Q5)

Une onde plane progressive sinusoïdale est réfractée lors d'un changement de milieu de propagation. On représente ci-contre des plans d'ondes (plan dans lesquels tous les points ont la même phase), séparés d'une longueur d'onde dans le milieu 1. Parmi les dessins ci-dessous représentant les plans d'onde dans le milieu 2, lequel est compatible avec la réfraction de l'onde ?





Exercice 24 : Association de filtres (issu des IPhO 2010 Q9)

On dispose de 10 filtres identiques. Lorsqu'on met 1 filtre devant une lampe blanche, la lampe apparaît rouge. Quand on place les 10 filtres la lampe apparaît verdâtre. Quel est le profile de transmission d'un filtre ?

Autour des plumes d'oiseaux

Les plumes d'oiseaux sont constituées à plusieurs échelles de structures périodiques. Au niveau macroscopique, les barbes de la plume (figure 2) sont régulièrement espacées, d'une distance que l'on notera a dans la suite du problème. A leur surface, on retrouve également des microstructures périodiques, dont la longueur caractéristique sera notée b dans la suite du problème. Ces microstructures peuvent être responsables des irisations observées sur certains oiseaux, comme les pigeons. Ce problème aborde l'étude de ces structures périodiques en les assimilant à des réseaux de diffraction. La pre- mière partie portera sur l'étude des barbes et la seconde sur les microstructures.



Figure 1 : plume d'oiseau

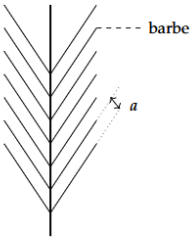


Figure 2 : vue de près d'une plume

1 Etude des barbes d'une plume

Au niveau macroscopique, on assimilera la plume étudiée à un réseau de diffraction de pas moyen a, représentant l'écart entre les barbes. On souhaite mesurer l'écart a entre ces barbes.

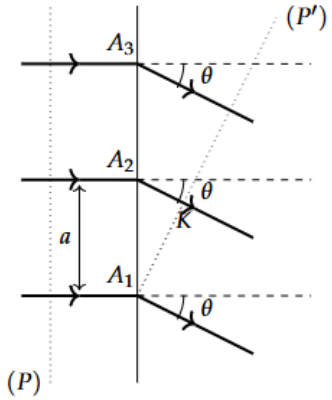


Figure 3 : réseau de diffraction éclairé en incidence normale

La plume est éclairée en incidence normale par des rayons lumineux, de longueur d'onde λ. Le passage à travers la plume entraîne une déviation des rayons lumineux, d'un angle θ. On s'intéresse à deux rayons successifs, passant par les points A_1 et A_2 par exemple. On note K le projeté orthogonal de A_1 sur le rayon émergent passant par A_2. Le plan (P) est un plan orthogonal à la direction de propagation des rayons avant le réseau. Le plan (P') est le plan orthogonal à la direction de propagation des rayons après le réseau passant par les points A_1 et K.

On admettra que les temps de parcours de la source au plan (P) d'une part et du plan (P') au point d'observation d'autre part sont identiques quel que soit le rayon lumineux considéré.

1. Le temps de parcours entre les plans (P) et $(P'$ est-il le même pour tous les rayons ?
2. En déduire alors que la différence de marche δ entre les deux rayons successifs, c'est-à-dire la différence de longueur entre les chemins suivis par la lumière sur chaque trajet, s'écrit $\delta = a\sin(\theta)$.
3. Pour quelles valeurs θ_k de θ (k étant un nombre entier relatif) peut-on observer des interférences destructives ?

On admettra que la superposition de tous les rayons émergents de la plume ne modifie pas les valeurs θ_k de l'angle θ pour lesquelles des interférences destructives sont observées. Expérimentalement, l'étude a été réalisée en éclairant la plume par un laser rouge, de longueur d'onde $\lambda = 650\ \text{nm}$. La figure d'interférence est observée sur un écran placé à une distance $D = 1{,}0\ \text{m}$ de la plume.

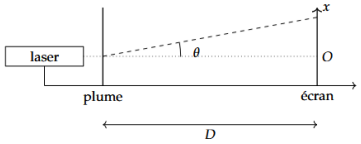


Figure 4 : montage expérimental

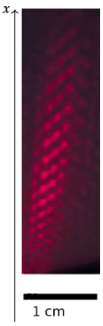


Figure 5 : figure d'interférence observée

4 On note x_k ma position sur l'écran de la $k^{\text{ième}}$ tache sombre, repérée par rapport à la position du faisceau lumineux en l'absence de plume. QUelle est la relation entre x_k et θ_k ?

5 Lorsque les angles θ considérés sont petits, on a $\sin(\theta) \approx \tan(\theta) \approx \theta$. En déduire l'expression de x_k en fonction de k, D, a et λ. En utilisant la figure 5 fournie et en détaillant le raisonnement suivi, déterminer la valeur de a. On précise que les échelles horizontale et verticale sont les mêmes.

2 Couleurs structurales

A la surface d'une barbe, on observe des structures périodiques similaires à un réseau de pas moyen b qui peuvent être responsables d'irisations. Les réseaux peuvent aussi permettre d'observer des interférences en réflexion. Les irisations des plumes d'oiseaux sont le plus souvent observées dans ce cas, le soleil se trouvant derrière l'observateur. On supposera que les rayons lumineux arrivent en incidence normale par rapport au plan de la plume et on notera θ l'angle que font les rayons réfléchis avec ce plan. On observera les rayons réfléchis dans cette direction θ.

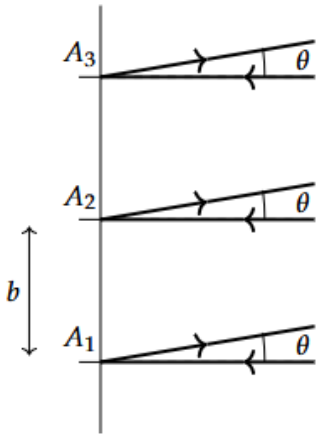


Figure 6 : réseau de diffraction étudié en réflexion

6 Déterminer la différence de marche δ entre deux rayons successifs.

7 Déterminer l'expression des angles θ_k, k étant un entier relatif, sous elsquels les ondes interfèrent constructivement.

8 Rappeler les limites du domaine visible en termes de longueurs d'onde.

9 Donner l'expression de svaleurs extrêmes k_{min} et k_{max} que peut prendre k pour les interférences soient visibles par l'observateur.

10 Réaliser les applications numériques pour une plume 1 pour laquelle $b = 10{,}0\ \mu\text{m}$ et pour une plume 2 pour laquelle $b = 1{,}00\ \mu\text{m}$.

θ [°]	k_{min}	k_{max}	θ [°]	k_{min}	k_{max}
90			90		
60			60		
45			45		
30			30		

Plume 1 à gauche et Plume 2 à droite

11 Pourquoi n'observe-t-on pas d'irisations pour la plume 1 ?

12 Pour la plume 2, on souhaite déterminer les couleurs observées lorsqu'un observateur se déplace par rapport à la plume, modifiant ainsi l'angle θ d'observation. Pour toutes les valeurs de k comprises entre k_{min} et k_{max}, calculer la longueur d'onde λ pour laquelle des interférences constructives sont observées dans le visible.

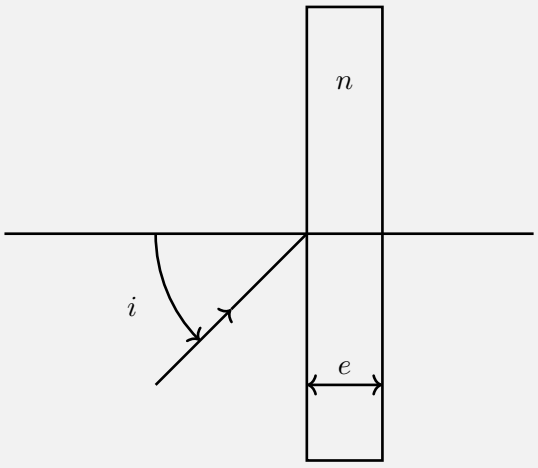
Chaque ligne du tableau suivant pourra comporter plusieurs valeurs de k et donc de λ.

θ [°]	k_{min}	k_{max}
90		
60		
45		
30		

13 En utilisant le tableau ci-dessous, en déduire l'ordre des couleurs observées lorsque l'observateur se dépllacement par rapport à la plume, et que θ varie de $90°$ à $30\ \text{degree}$.

Couleur	Longueur d'onde λ [nm]
Infrarouge	750-1000
Rouge	625-700
Orange	600-625
Jaune	585-600
Vert-jaune	575-585
Vert	520-575
Vert-bleu	495-520
Cyan	490-495
Bleu azur	465-490
Bleu	440-465
Violet	400-440
Ultraviolet	300-400

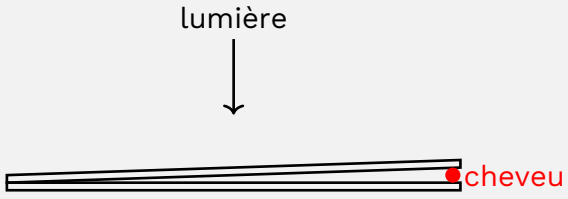
Exercice 25 : Incidence sur une lame d'indice n



1. Faire un schéma avec les deux rayons. Figurer la différence de marche δ entre les deux rayons, après leur passage dans le système.
2. Exprimer δ en fonction de i et de e.
3. L'onde a une longueur d'onde λ. En déduire que dans certaines directions, on ne récupère pas de lumière.

Exercice 26 : Diamètre d'un cheveu

Un cheveu est emprisonné" entre deux lames de verre identiques, de longueurs $\ell = 10\ \mathrm{cm}$. Ce dernier est disposé à l'extrémité droite du dispositif, tandis que les deux lames sont jointives à l'extrémité gauche. Un large faisceau lumineux monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 546\ \mathrm{nm}$ éclaire le système sous incidence normale à a lame inférieure. On négligera le phénomène de réfraction dans ce problème.



On constate la présence de $N = 73$ franges brillantes. Déterminer le diamètre d du cheveu. Vérifier a posteriori s'il est pertinent de négliger la réfraction.