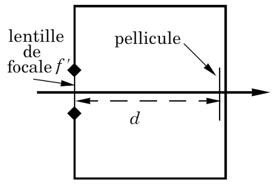
Exercice 1 Étude d'un appareil photo jetable

Les appareils photos jetables sont conçus pour ne servir qu'une seule fois. Ils sont donc de conception très simple afin que le prix de revient soit le plus bas possible. Nous étudierons tour à tour l'optique, puis l'électronique de tels appareils.

A Étude de la partie optique

L'objectif n'est composé que d'une seule lentille mince L de centre O, de distance focale f' et de diamètre utile D_L. La pellicule se situe à une distance d fixe de la lentille. Aucune mise au point n'est possible, c'est-à-dire que la distance d est fixée lors de la fabrication et n'est pas modifiable par l'utilisateur. Nous travaillerons dans les conditions de Gauss.



A.1 Conditions de Gauss

A.1.1 Rappeler les conditions de Gauss.

A.1.2 Pourquoi se place-t-on dans les conditions de Gauss ?

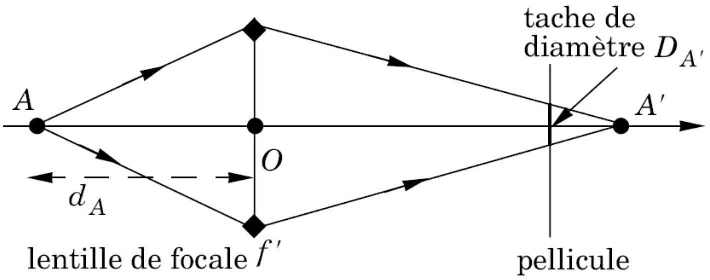
A.1.3 Comment fait-on en pratique pour travailler dans les conditions de Gauss ? Quel est l'inconvénient de se placer dans les conditions de Gauss ?

A.2 En fonctionnant usuel, les objets et les images données par L sur la pellicule sont réels. En prenant un objet AB tel que $|\overline{OA}| > |f'|$ et en traçant son image pour une lentille convergente puis divergente, déterminer la nature convergente ou divergente de la lentille L servant d'objectif.

A.3 L'objet à photographier étant situé à l'infini, déterminer la valeur de la distance d qu'il faut prévoir lors de la fabrication pour que son image soit nette sur la pellicule.

A.4 Quelle est alors la dimension X, sur la pellicule, de l'image de la Lune qui a un diamètre apparent α (on pourra s'aider d'une construction pour répondre). Faire l'application numérique avec $f' = 3,0\ cm$ et $\alpha = 0,50°$.

A.5 Un objet ponctuel A, qui n'est pas situé à l'infini, à son image en dehors du plan de la pellicule (confondu avec le plan focal image de la lentille) et donne sur la pellicule une tache de diamètre $D_{A'}$. Soit d_A la distance entre le point A et la lentille (d_A est une distance et est donc positive).



A.5.1 Exprimer $\overline{OA'}$ en fonction de f' et d_A.

A.5.2 Montrer que l'expression de $D_{A'}$ en fonction de D_L (diamètre utile de la lentille), f' et d_A est : $D_{A'} = D_L \frac{f'}{d_A}$.

A.6 La pellicule est formée de grains que l'on supposera circulaires et de même diamètre ε. Une image, après développement de la pellicule, paraît nette si un point objet n'a éclairé qu'un seul grain et a donc donné, sur la pellicule, une tache de diamètre inférieur ou égal à ε.

Sachant que $f' = 3,0\ cm$, $D_L = 2,0\ mm$ (partie utile de la lentille) et que $\epsilon = 20\ \mu m$, calculer numériquement la position du point A (d_A) le plus proche qui est encore net après développement.

A.7 Afin de pouvoir diminuer d_A, on augmente, lors de la fabrication, la distance d afin qu'un point à l'infini soit à la limite de netteté (il donne donc une tache de diamètre ϵ sur la pellicule).

A.7.1 Faire un schéma du dispositif montrant la tache donnée par l'objet à l'infini.

A.7.2 Déterminer d et faire l'application numérique.

A.7.3 Déterminer la nouvelle distance d_A correspondant au point le plus près donnant lui aussi une tache de diamètre ϵ sur la pellicule et faire l'application numérique.

Exercice 2 Onde progressive sinusoïdale sonore et ultrasonore

Les différentes parties de cet exercice sont complètement indépendantes.

A Étude d'une onde sonore

Un haut-parleur excité par un GBF émet une onde sonore sinusoïdale de pulsation ω. En considérant que l'atténuation peut être négligée, le signal $s(x,t)$ capté par un microphone placé au point d'abscisse x sur l'axe du haut parleur est donné par une expression de la forme :

$$s(x,t) = A\cos(\omega t - kx + \varphi)$$

La célérité du son dans l'air dans les conditions de l'expérience est égale à $c = 3{,}4 \times 10^2\,\mathrm{m\,s^{-1}}$.

A.1 Rappeler la relation liant ω, k et c. Quelle est la dimension de k ?

On visualise sur un oscilloscope le signal délivré par le microphone. L'oscillogramme obtenu lorsque le microphone se trouve dans le plan $x = 0$ est représenté sur la figure 1 fournie en annexe à la fin de l'énoncé.

A.2 Déterminer d'après cet oscillogramme les valeurs de l'amplitude A du signal, de sa fréquence f et de la phase à l'origine φ.

A.3 Déterminer la longueur d'onde, puis déterminer le retard temporel Δt correspondant à une progression de l'onde de $\Delta x = 34\,\mathrm{cm}$.

A.4 Représenter soigneusement sur la Figure 1, l'allure du signal dans le plan d'abscisse $x = 34\,\mathrm{cm}$ en le justifiant sommairement.

A.5 Reproduire sur la Figure 2 en annexe, l'allure des variations du signal s en fonction de x à la date $t = 0$ en le justifiant sommairement.

B Mesure de la célérité du son à l'aide d'une onde ultrasonore

Le GBF délivrant maintenant une fréquence $f = 40{,}0\,\mathrm{kHz}$ est relié à un émetteur à ultrasons. Le signal de l'émetteur et le signal fourni par un capteur placé devant l'émetteur sont visualisés simultanément sur l'écran d'un oscilloscope. On règle initialement la distance entre le capteur et l'émetteur de telle sorte que les signaux observés soient en phase.

B.1 En partant de cette position l'opérateur déplace lentement le capteur jusqu'à retrouver pour la première fois des signaux en phase. Que peut-on dire de la distance dont a été déplacée le capteur ?

B.2 L'opérateur déplace le capteur jusqu'à compter 10 coïncidences de phase successives après la position initiale et mesure entre ces deux positions une distance $d = 8{,}6\,\mathrm{cm}$. Calculer la valeur de la célérité du son que l'on peut déduire de cette expérience.

B.3 La distance d a été mesurée en évaluant une demie-étendue $\Delta d = 0{,}4\,\mathrm{cm}$ associée aux incertitudes de lecture, et de position des récepteurs. L'incertitude relative sur la valeur de la fréquence pouvant être négligée, on peut considérer que l'incertitude relative $\dfrac{u(c)}{c}$ sur la valeur de c s'identifie à l'incertitude relative $\dfrac{u(\lambda)}{\lambda}$ sur la valeur de la longueur d'onde. En déduire l'incertitude-type $u(c)$ sur c dans cette expérience.

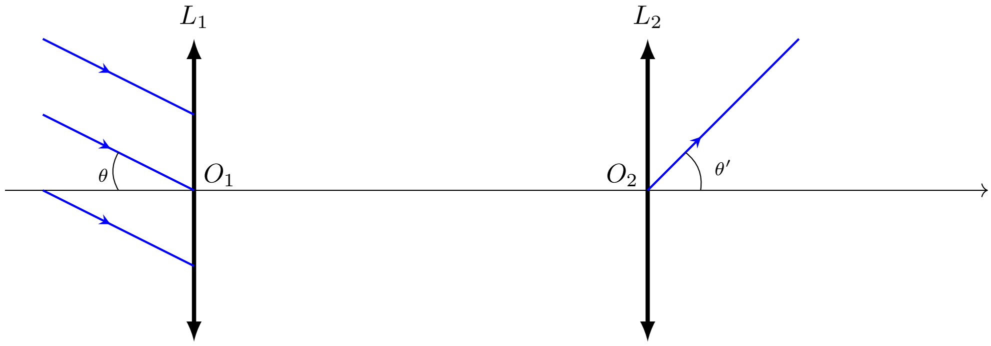
B.4 Comment pourrait-on procéder pour améliorer la précision de la mesure ?

Exercice 3 Lunette astronomique

La lunette astronomique est un système centré constitué d'un objectif et d'un oculaire. L'objectif est assimilé à une lentille mince convergente de centre optique O_1, de distance focale f_1' et de diamètre D_1. L'oculaire est une lentille mince convergente de centre optique O_2, de distance focale f_2' et de diamètre D_2.

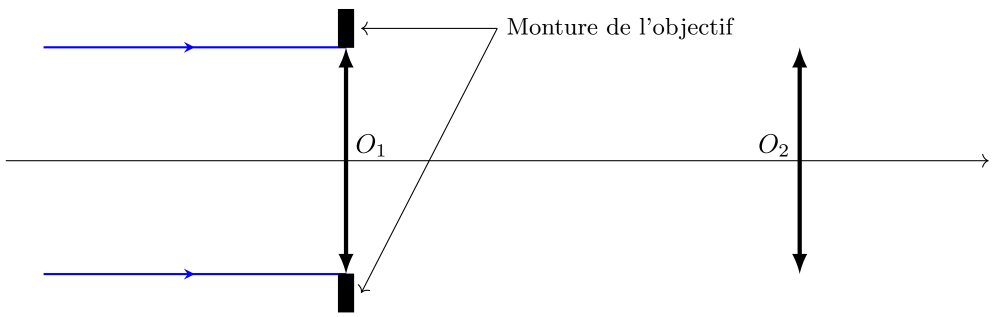
L'objectif donne, d'un objet éloigné, une image réelle appelée objective. Cette dernière est observée au moyen de l'oculaire.

1. A quelle condition l'œil d'un observateur, supposé sans défaut, n'accommode pas (ne se fatigue pas) ? En déduire la position relative de l'objectif et de l'oculaire lorsque l'observateur n'accommode pas. Ce système optique possède-t-il des foyers ? Comment se nomme un tel système optique ?
2. Réaliser un schéma, sans respecter les échelles, montrant le devenir d'un faisceau incident faisant un angle θ avec l'axe optique et émergeant sous un angle θ' dans les conditions de Gauss. On fera apparaître l'image intermédiaire sur le schéma.



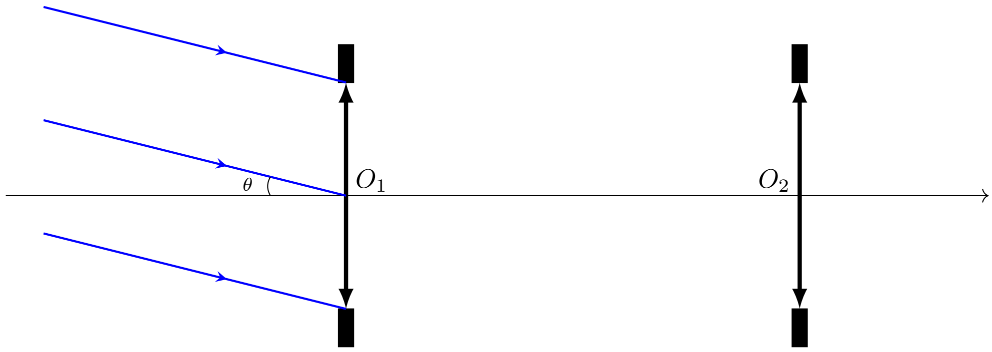
3. Déterminer l'expression du grossissement de la lunette $G = \frac{\theta'}{\theta}$ en fonction de f_1' et f_2', et calculer ce grossissement si $f_1' = 1,0$ m et $f_2' = 20$ mm.

On considère un faisceau lumineux issu d'un point objet A à l'infini sur l'axe optique de la lunette.



4. Sans respecter les échelles, représenter le devenir d'un tel faisceau lumineux limité par la monture de la lentille objectif (encore appelée diaphragme d'ouverture).
5. Exprimer le diamètre D du faisceau de rayons issu de l'oculaire en fonction des distances focales images f_1' et f_2' et du diamètre D_1 du diaphragme d'ouverture. En déduire une relation entre D, D_1 et le grossissement G de la lunette.
6. Après avoir calculé la valeur numérique du diamètre D du faisceau de rayons issu de l'oculaire, montrer que c'est le diaphragme d'ouverture, de diamètre D_1, qui le limite et non l'oculaire de diamètre D_2. On donne $D_1 = 10$ cm et $D_2 = 6,0$ mm.

On considère un objet ponctuel situé à l'infini en dehors de l'axe optique et dans la direction θ par rapport à ce dernier (figure ci-dessous).



7. Montrer à l'aide d'une construction l'existence d'un angle limite θ_{max} au delà duquel aucun des rayons entrant dans l'objectif ne passe à travers la monture de l'oculaire. Exprimer θ_{max} en fonction du diaphragme d'ouverture D_1, des distances focales f_1' et f_2' et du diamètre de l'oculaire D_2.
8. L'objectif d'une lunette astronomique doit être capable de donner une image parfaite d'un point infiniment éloigné. Pour cela il doit, notamment, être achromatique. D'où provient l'aberration chromatique d'une lentille ? Comment, en physique qualifie-t-on ce type de milieu ?

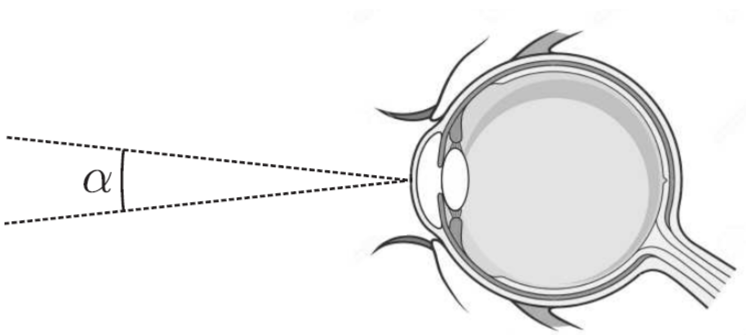
Exercice 4 Microscopie optique

Afin de contrôler la qualité des tissages, Antoni Van Leeuwenhoek (1632-1723), apprenti drapier aux Pays Bas, inventa le premier microscope à fort grandissement vers 1668. Cet instrument permit, grâce à la curiosité de son inventeur, de découvrir l'existence d'un monde vivant à une échelle invisible à l'œil nu. Ces découvertes marquèrent la naissance de la microbiologie. Cet instrument n'a jamais cessé d'évoluer pour extraire un maximum d'informations de l'échantillon étudié en trouvant de nouveaux contrastes et en explorant des échelles toujours plus petites.

Dans ce problème, nous préciserons la limite de résolution de l'œil afin d'apprécier ensuite, l'apport du microscope de Van Leeuwenhoek pour réussir à voir de petits détails.

A Pouvoir de résolution de l'oeil humain

Cette partie s'appuie sur les documents 1, 2 et 3 situés à la fin du problème. L'œil peut être modélisé par une lentille mince convergente de distance focale variable f' placée dans l'air, d'indice $n = 1$ et de diamètre D, identique à celui de la pupille d'entrée de l'œil. On désigne par λ la longueur d'onde moyenne du rayonnement visible égale à 500 nm. Dans cette partie on considérera deux objets, ponctuels, placés dans l'air à une distance grande devant le punctum remotum, dont les images se forment au centre de la fovéa d'un œil emmétrope. Comme indiqué sur la figure ci-dessous, ils sont vus sous un angle α.



A.1 En considérant le nombre fini N de cônes présents par unité de surface au centre de la fovéa et sans tenir compte de la diffraction, estimer la valeur minimale de α notée α_1, permettant de discerner les deux objets situés à l'infini. Le résultat sera donné en fonction de N, et f' puis sera estimé numériquement en minute d'arc.

A.2 En raison de la diffraction par la pupille, l'image d'un objet ponctuel est une tâche sur la rétine. En tenant compte de la diffraction, estimer de nouveau la valeur minimale de α notée α_2 séparant deux objets ponctuels vus distinctement par un œil emmétrope au centre de sa fovéa. Exprimer α_2 en fonction de λ et D et comparer sa valeur à celle de α_1.

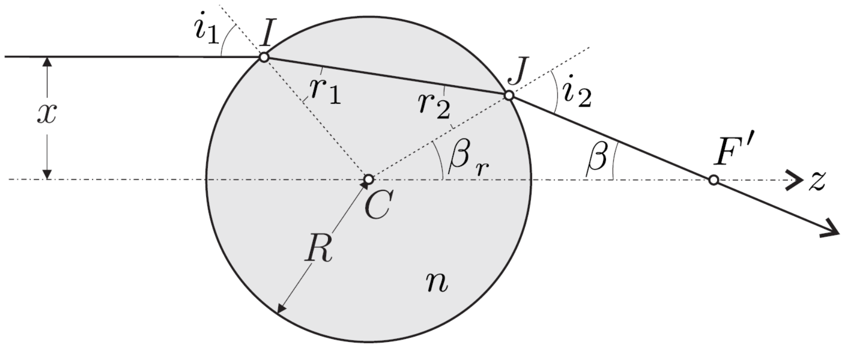
A.3 En utilisant la valeur minimale $\alpha_2 = 1\,'$ séparant deux objets ponctuels à distance finie, calculer numériquement la dimension α_1 du plus petit motif observable à l'œil nu. Donner un exemple d'objet possédant une dimension de longueur comparable à α_1.

B Microscope de Van Leeuwenhoek

Le premier microscope de Van Leeuwenhoek, était rudimentaire et reposait sur l'utilisation d'une seule lentille boule. Après polissage d'une goutte de silice fondue, Van Leeuwenhoek, obtint des lentilles boule de rayon $R = 0{,}60\,\text{mm}$ de centre C. L'indice optique de la silice sera noté n, les foyers objet et image de la lentille sont respectivement notés F et F'.

B.1 Expliquer, à l'aide d'un schéma optique précis, l'intérêt d'introduire une telle lentille entre l'échantillon et l'observateur.

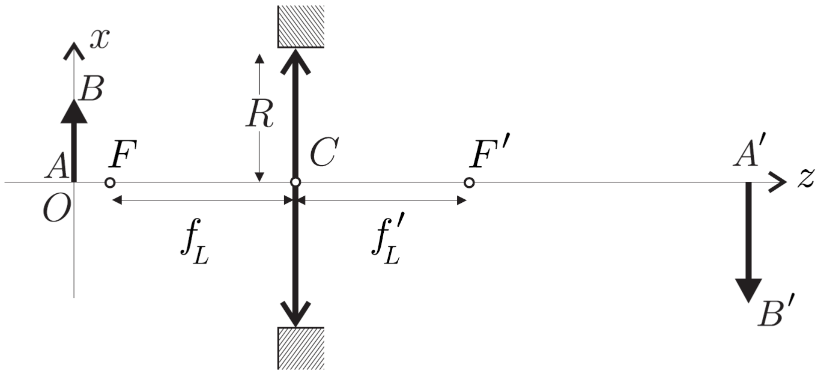
Sur la figure ci-dessous on a représenté la trajectoire d'un rayon lumineux initialement parallèle à l'axe optique (Cz) se propageant dans une lentille boule d'indice optique n placée dans l'air d'indice unitaire. Les rayons incidents et émergents se coupent dans un plan passant par C, perpendiculaire à l'axe (Cz). L'étude sera menée dans l'approximation de Gauss.



Les angles formés entre les rayons lumineux et les normales aux dioptres sont notés i_1, au point I en entrée de la lentille et i_2 à l'extérieur de la lentille au point J, en sortie. De même, les angles intérieurs seront notés r_1 et r_2. L'angle $F'CJ$ est noté β_r et l'angle de déviation CFJ sera noté β.

B.2 Déterminer la relation entre i_1 et i_2. Exprimer i_1 en fonction de x et R. Exprimer β_r en fonction de i_1 et n, puis en fonction de x, R et n. Exprimer β en fonction de i_1 et β_r puis de x, R et n. En déduire la distance focale f'_L définie comme la distance CF' sur la figure ci-dessus en fonction n et R. Estimer enfin numériquement f'_L en prenant $n = 1,5$.

Dans toute la suite, (Ox) désigne la direction transverse à l'axe optique contenant l'objet étudié. On limite l'étude au plan (Ox, Oz) et on prendra $f'_L = 1{,}0\,\text{mm}$. On utilise à présent un modèle de lentille mince équivalent à la lentille boule, possédant la même distance focale f'_L et le même rayon R. Celle-ci est représentée sur la figure ci-dessous.



On rappelle que la relation de conjugaison pour une lentille mince de centre C dans l'approximation de Gauss s'écrit :

$$\frac{1}{\overline{CA'}} - \frac{1}{\overline{CA}} = \frac{1}{\overline{CF'}}$$

Le grandissement transversal γ d'un système optique est défini comme le rapport de la taille de l'image et de la taille de l'objet $\gamma = \dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$, tous deux orientés transversalement à l'axe optique. Une des normes actuelles est d'imposer une distance $\ell = 195\,\text{mm}$ sur l'axe optique entre un objet et son image à travers l'objectif.

B.3 Déterminer l'expression de $\overline{CA}$ en fonction de ℓ et f'_L pour que le grandissement transversal γ du microscope de Van Leeuwenhoek soit supérieur à 1 en valeur absolue dans l'approximation de Gauss. On a ici $\ell \gg 4f'_L$, en déduire une expression approchée de γ.

C Un microscope optique « classique »

C.1 Un microscope optique permet d'observer des globules sanguins, un microscope électronique des défauts d'une structure cristalline, un microscope à force atomique des atomes. Quels sont les ordres de grandeur des objets observés et du pouvoir de résolution minimal de chacun des microscopes utilisés ?

Un microscope optique porte les indications suivantes. Sur son objectif : $\times 40$; sur l'oculaire : $\times 10$. La notice constructeur précise : ouverture numérique de l'objectif $\omega_0 = 0,65$, intervalle optique $\Delta = 16\ cm$. **La signification de ces indications sera précisée dans la suite**. Le microscope sera modélisé par deux lentilles minces convergentes. Il est réglé pour donner une image à l'infini d'un objet réel AB, perpendiculaire à l'axe optique, A étant placé sur l'axe, légèrement en avant du foyer objet de l'objectif. Cette image est observée par un œil emmétrope placé au voisinage du foyer image de l'oculaire. L'œil nu voit nettement des objets situés entre la distance $\delta = 25\ cm$ et l'infini.

C.2 Faire un schéma du dispositif (sans respecter l'échelle) et tracer soigneusement la marche de deux rayons lumineux issus du point B de l'objet AB, l'un émis parallèlement à l'axe optique, l'autre passant par F_1 foyer objet de la lentille L_1 équivalente à l'objectif de centre optique O_1.

C.3 Interprétation de la notice constructeur

C.3.1 L'indication portée sur l'oculaire ($\times 10$) est le grossissement commercial, c'est à dire le rapport de l'angle sous lequel on voit l'image à l'infini d'un objet à travers l'oculaire seul et l'angle sous lequel on voit ce même objet à l'oeil nu lorsqu'il est situé à la distance minimale de vision distincte. Déterminer f'_2, distance focale image de l'oculaire.

C.3.2 L'intervalle optique correspond à la distance F'_1F_2 . La valeur absolue du grandissement de l'objet AB par l'objectif est : $\times 40$. Calculer f'_1, distance focale image de la lentille équivalente à l'objectif. Calculer la distance O_1A permettant de positionner l'objet.

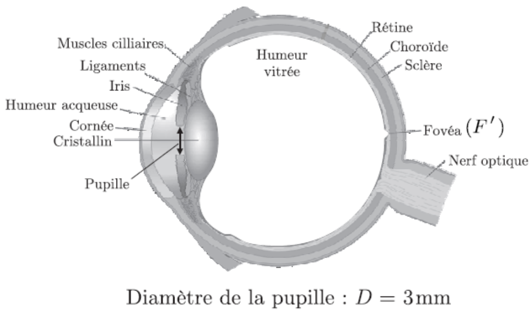
C.3.3 Déterminer la latitude de mise au point, c'est-à-dire la variation de la distance O_1A compatible avec une vision nette de l'image finale par l'observateur, dont l'oeil est au foyer image de l'oculaire. Interpréter le résultat obtenu.

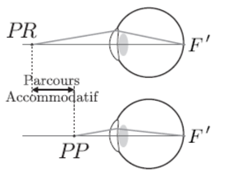
C.3.4 Calculer dans le cas d'une image finale à l'infini le grossissement commercial du microscope.

C.4 L'ouverture numérique du microscope, ω_0, correspond à $n \sin u$, n indice du milieu dans lequel plonge l'objectif, u angle maximum des rayons issus de A arrivant sur l'objectif. Calculer u pour un objectif plongé dans l'air. Le microscope est-il utilisé dans les conditions de Gauss ? Quel type d'aberrations doit-on corriger ? Quel est l'ordre de grandeur du diamètre de la monture de l'objectif ?

C.5 Déterminer la position et la taille du cercle oculaire, image de la monture de l'objectif à travers l'oculaire. Quel est l'intérêt de placer l'œil dans le plan du cercle oculaire ? On serait tenté pour augmenter le grossissement du microscope de prendre un oculaire de grossissement élevé ; est-ce judicieux ? Justifier votre réponse.

Document 1 : Modélisation de l'œil humain emmétrope

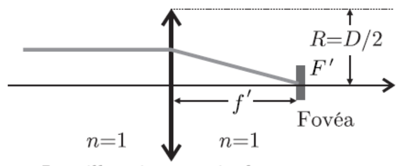




Diamètre de la pupille : $D = 3\,\mathrm{mm}$

Indice de l'humeur vitrée : 1,33

Indice du cristallin : 1,45



Lentille mince équivalente

La fovéa contient en son centre environ $N = 160\ 000$ cônes/mm^2, chacun de ces cônes est une cellule photosensible.

Le punctum proximum (PP) est le point le plus proche que l'on peut voir distinctement. Il est situé à 25 cm de la pupille et tel que dans cette situation $f' = f_1' = 16\,\mathrm{mm}$.

Le punctum remotum (PR) est la distance à partir de laquelle l'œil n'accommode plus, il est tel que dans cette situation $f' = f_2' = 17\,\mathrm{mm}$.

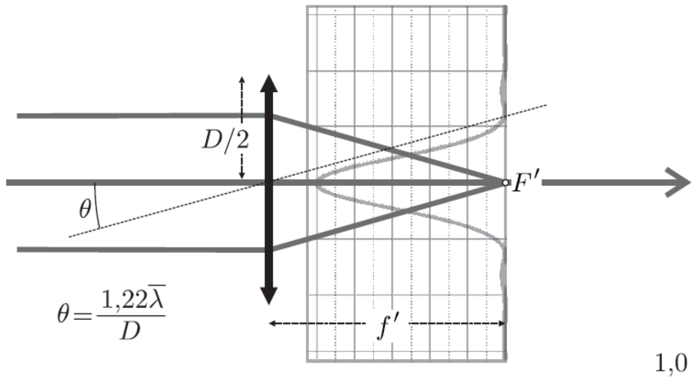
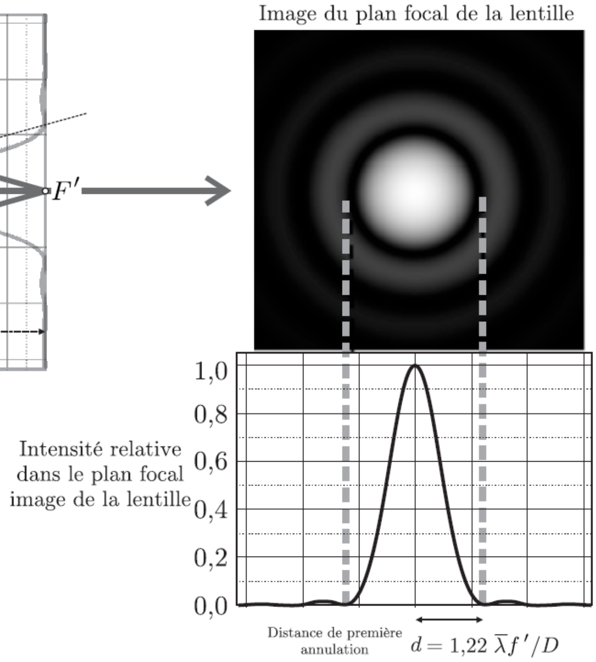
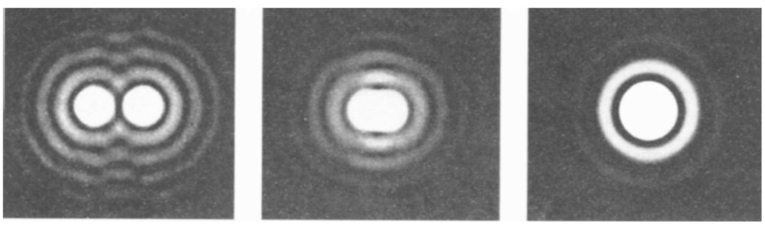


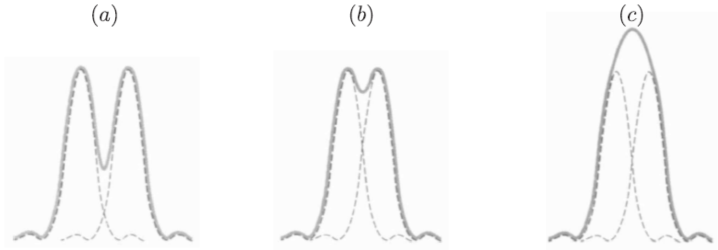
Image du plan focal de la lentille



Document 2 : Diffraction par la pupille d'une lentille mince convergente



(a) (b) (c)



Images de deux sources ponctuelles incohérentes à travers une lentille convergente pour différentes valeurs de l'angle α par rapport à l'axe de symétrie.

Seuls les cas (a) et (b) permettent de discerner deux maxima. En (b), il s'agit de l'angle minimal permettant de discerner deux taches.

Document 3 : Pouvoir de séparation entre deux taches issues de sources incohérentes

Feuille annexe exercice 2

Nom :