

TD 2 : Formation des images

TD 3 : Modèle de quelques dispositifs optiques

Questions de cours

Chapitre 2

1. Donner la définition d'un système optique centré.
2. Définir un rayon lumineux virtuel.
3. Donner la définition d'un point objet. À quelle condition celui-ci est-il réel ? Virtuel ? Répondre aux mêmes questions pour un point image.
4. Présenter la construction de l'image par un miroir d'un point objet réel, puis d'un point objet virtuel. On représentera quelques rayons lumineux issus de l'objet.
5. Donner la définition d'un dispositif optique stigmatique. Le miroir plan en est-il un exemple ?
6. Rappeler les conditions de Gauss. Quel est l'intérêt de se placer dans de telles conditions ?
7. Expliquer pourquoi la réalisation d'un stigmatisme approché est généralement suffisante pour les dispositifs optiques usuels.
8. Définir le grandissement transversal d'un système optique. Quelle information son signe nous donne-t-il ?
9. Qu'est ce qu'une lentille ? Donner les deux grandes familles de lentille. Définir le centre optique d'une lentille. Qu'est ce qu'une lentille mince ?
10. Définir les foyers principaux objet et image d'un système optique.
11. Donner le signe des distances focales image et objet pour une lentille mince convergente et une lentille mince divergente.
12. Définir la vergence d'une lentille. En quelle unité est-elle usuellement exprimée ?
13. Qu'est ce qu'un dispositif optique afocal ?
14. Donner les trois règles permettant de construire l'image $A'B'$ d'un objet AB par une lentille mince.
15. Deux rayons lumineux arrivent parallèles entre eux sur une lentille mince. Où se coupent les rayons émergents ?
Deux rayons lumineux émergent parallèles entre eux d'une lentille mince. Où se coupent les rayons incidents ?
16. Rappeler les relations de conjugaison de Descartes et de Newton.

Chapitre 3

1. Proposer une modélisation simple de l'œil humain faisant intervenir trois composants optiques, en précisant ce que chacun d'entre eux modélise.
2. Comment appelle-t-on un œil ne présentant pas de dysfonctionnement ?
3. Définir les notions de punctum remotum et punctum proximum.
4. En quoi le mécanisme d'accommodation consiste-t-il ?
5. Où se trouvent les punctum remotum et punctum proximum d'un œil emmétrope ? Où cet œil voit-il net sans accommoder ? Quel est l'intérêt d'une observation sans accommodation ?
6. Définir la limite de résolution angulaire de l'œil et donner sa valeur numérique.

Application directe du cours

.1 Prolongement d'un rayon lumineux quelconque

1. Tracer un rayon lumineux quelconque arrivant sur une lentille convergente. Après avoir placé les foyers objet et image de la lentille sur votre schéma, tracer le prolongement de ce rayon lumineux.
2. Même question pour une lentille divergente.

.2 Utilisation des relations de conjugaison

1. Un objet réel est placé un mètre en amont d'une lentille mince convergente de focale $f' = 20$ cm, utiliser la relation de conjugaison de Descartes pour déterminer la position de l'image. Vérifier graphiquement. Vérifier qu'on obtient le même résultat avec la relation de conjugaison de Newton.
2. Répondre à la même question pour une lentille divergente de focale $f' = -20$ cm.

Exercices

Exercice 1 : Construction à grandissement donné ● ● ●

Déterminer les positions d'un objet A et de son conjuguée image A', qui par une lentille convergente de focale $f' = 5,0$ cm, mène à un grandissement $\gamma = -2$

Exercice 2 : Observation dans un miroir ● ● ●

Vous êtes debout devant un miroir plan rectangulaire, fixé sur un mur vertical. Votre œil est à 1,5 m du sol. La base du miroir est à une hauteur h au dessus du sol.

1. Déterminer la valeur maximale de h pour que vous puissiez vous admirer en entier.

Exercice 3 : Focométrie : Méthode d'autocolimation ♥ ● ● ●

On place un miroir plan derrière une lentille convergente de distance focale f' .

Un objet est matérialisé par une figure, découpée dans un écran placé contre une source lumineuse, elle même disposée avant le système lentille-miroir.

1. Montrer graphiquement qu'une image nette se forme sur l'écran si l'objet est placé dans le plan focal objet de la lentille.
2. Comment exploiter expérimentalement ces résultats ?

Exercice 4 : Focométrie : Méthodes de Bessel et de Silbermann (CCP MP 2008) ♥ 📄 ● ● ●

On considère un objet lumineux et un écran, séparés d'une distance $D = 1,0$ m. Une lentille (\mathcal{L}) de distance focale f' est positionnée entre les deux.

— Méthode de Bessel :

1. Montrer que si $D > D_{\min}$, valeur minimale que l'on exprimera en fonction de f' , alors il existe deux positions distinctes $\overline{OA_1}$ et $\overline{OA_2}$ de (\mathcal{L}) pour lesquelles une image nette se forme sur l'écran. Donner les expressions de $\overline{OA_1}$ et $\overline{OA_2}$ en fonction de D et f' .

En déplaçant la lentille le long de l'axe optique, on trouve deux positions pour lesquelles elle forme sur l'écran une image nette de l'objet. Ces deux positions sont séparées d'une distance $d = 800$ mm.

2. Déterminer une expression de f' en fonction de D et d . Calculer sa valeur numérique.

— Méthode de Silbermann :

On modifie alors le réglage de la position écran-objet, qu'on note à présent D' pour qu'il n'existe plus qu'une position menant à une image nette de l'objet par la lentille.

3. Exprimer puis calculer D' .
4. Ces deux méthodes sont-elles utilisables pour une lentille divergente ?

Exercice 5 : Focométrie : Méthode de Badal (CCP MP 2008)



On dispose de trois lentilles minces :

- une lentille convergente \mathcal{L}_1 , de distance focale image f'_1 connue et de centre optique O_1 ;
- une lentille convergente \mathcal{L}_2 , de distance focale image f'_2 connue et de centre optique O_2 ;
- une lentille divergente \mathcal{L} , de distance focale image f' inconnue et de centre optique O .

Afin de déterminer f' , on met en œuvre la méthode de Badal, qui se déroule en deux étapes :

- 1ère étape : une lentille convergente (\mathcal{L}_1) donne d'un objet ponctuel A situé au foyer objet F_1 de cette lentille, une image rejetée à l'infini. Une seconde lentille convergente (\mathcal{L}_2) de distance focale connue f'_2 est disposée à la suite de (\mathcal{L}_1) à une distance supérieure à f'_2 . L'image finale ponctuelle A' se trouve sur un écran (E) situé au foyer image F'_2 de (\mathcal{L}_2).
- 2ème étape : la lentille divergente (\mathcal{L}), de distance focale f' inconnue, est positionnée dans le plan focal objet de (\mathcal{L}_2).
Pour obtenir la nouvelle image nette A' , il faut éloigner (E), de (\mathcal{L}_2), d'une distance D .

1. Schématiser la formation de l'image de A dans l'étape 1.
2. Schématiser la formation de l'image de A après ajout de la lentille divergente.
3. En appliquant la relation de conjugaison de Newton à la lentille (\mathcal{L}_2), déterminer la relation donnant l'expression de la distance focale f' en fonction des distances f'_2 et D .
4. Pour les distances $f'_2 = 12,5$ cm et $D = 6,5$ cm, calculer f' .

Exercice 6 : Étude d'un microscope



Un microscope optique est modélisé par deux lentilles minces convergentes : l'objectif, placé du côté de l'objet, et l'oculaire, placé du côté de l'observateur. 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 avant du foyer objet de l'objectif.

L'image finale est observée par un œil emmétrope placé au voisinage du foyer image de l'oculaire. On modélise l'objectif par une lentille \mathcal{L}_1 convergente de distance focale image f'_1 et l'oculaire par une lentille \mathcal{L}_2 convergente de distance focale image f'_2 .

La notice constructeur précise également l'intervalle optique $\Delta = \overline{F'_1 F_2} = 16$ cm.

1. Comment placer le foyer principal objet de \mathcal{L}_2 pour que l'image finale se forme à l'infini ?
Faire un schéma du dispositif. Placer un objet AB en tenant compte du principe de fonctionnement d'un microscope puis tracer la marche de 3 rayons issus de B en faisant bien apparaître l'image intermédiaire $A_1 B_1$.

On s'intéresse tout d'abord à l'oculaire seul. L'indication $\times 10$ portée sur l'oculaire est le grossissement commercial $G_0 = \frac{\alpha'}{\alpha}$ où α' est l'angle sous lequel on verrait l'objet intermédiaire transverse $A_1 B_1$ à l'œil nu lorsqu'il est situé à la distance minimale de vision distincte $d_m = 20$ cm et α' est l'angle sous lequel on voit l'image à l'infini de $A_1 B_1$ lorsqu'il est placé dans le plan focal objet de l'oculaire seul.

2. Déterminer la distance focale f'_2 de l'oculaire.

On s'intéresse maintenant à l'objectif seul, modélisé par une lentille \mathcal{L}_1 de distance focale image f'_1 . La valeur absolue du grandissement $\gamma_1 = \frac{\overline{A_1 B_1}}{AB}$ de l'objet AB par l'objectif est indiquée à $\times 40$.

3. Déterminer la distance focale f'_1 de l'objectif.

Pour finir, on s'intéresse au microscope dans son ensemble.

4. Calculer la distance $\overline{O_1 A}$ à laquelle positionner l'objet pour que l'image intermédiaire $A_1 B_1$ obtenue par l'objectif donne une image finale à l'infini.

5. Calculer dans ce cas le grossissement commercial du microscope en entier, défini comme étant $G_C = \frac{\alpha'}{\alpha''}$, avec α'' l'angle sous lequel on voit l'objet AB à l'œil nu placé au punctum proximum.

Exercice 7 : La loupe

Une loupe est une lentille convergente de distance focale image f' . On l'utilise pour observer une image agrandie d'un objet à travers la lentille.

- De quelle nature est l'image donnée par la loupe ?
- Pour observer l'image de l'objet sans fatigue, où doit-elle se former ? Où doit être placé l'objet par rapport à la lentille pour qu'il en soit ainsi ? Faire un schéma dans cette situation.

On définit le grossissement commercial par $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$, où α est l'angle sous lequel est vu l'objet à l'œil nu (sans loupe) observé au punctum proximum ($d_m = 25 \text{ cm}$), et α' l'angle sous lequel est vue l'image observée à travers la loupe.

- Exprimer le grossissement commercial de la loupe en fonction de f' et d_m .
- Calculer la valeur du grossissement commercial d'une loupe de vergence $V = 10 \text{ δ}$.
- Quel est le pouvoir de résolution de l'œil dans de bonnes conditions d'éclairement ? Donner la taille du plus petit objet que peut distinguer un œil normal en accommodant au maximum.
- Donner la taille du plus petit objet que peut distinguer un œil normal en utilisant la loupe sans accommoder. Conclure.

Exercice 8 : Lunette astronomique

On considère une lunette astronomique, comportant un objectif constitué d'une lentille mince convergente \mathcal{L}_1 de centre O_1 et de focale $f'_1 = \overline{O_1F'_1} > 0$ et un oculaire constitué d'une lentille mince convergente \mathcal{L}_2 de centre O_2 et de focale $f'_2 = \overline{O_2F'_2} > 0$. Un astronome souhaite utiliser la lunette pour observer la planète Mars.

- La lunette astronomique est un dispositif afocal.
 - Rappeler la définition d'un système optique afocal.
 - Pourquoi est-il ici intéressant de former un système optique afocal ?
 - Quelle est la conséquence sur le positionnement des lentilles ?
 - Faire un schéma en prenant $f'_1 = 5f'_2$ et représenter l'image intermédiaire $A'B'$ formée de Mars par l'objectif.
- On note α' le diamètre angulaire de la planète vue à travers la lunette (angle entre les rayons extrêmes de l'image) et α le diamètre angulaire de la planète vue à l'œil nu.
 - L'image finale est-elle droite ou renversée ?
 - Exprimer le grossissement de la lunette, défini par :

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

- On veut augmenter le grossissement et redresser l'image. Pour cela, on intercale entre l'objectif et l'oculaire une lentille mince convergente \mathcal{L}_3 de centre O_3 et de distance focale image f'_3 , qu'on place de telle sorte que l'image finale à travers l'ensemble de la lunette soit à l'infini.
 - Quel couple de points la lentille \mathcal{L}_3 doit-elle conjuguer pour que le système soit afocal ?
 - Faire un schéma de la situation. On notera $A'B'$ la première image intermédiaire, $A''B''$ la seconde.
 - On appelle γ_3 le grandissement de la lentille \mathcal{L}_3 . Exprimer $\overline{O_3F'_1}$ en fonction de γ_3 et f'_3 .
 - Déterminer le nouveau grossissement G' de l'ensemble en fonction de G et de γ_3 .

Exercice 9 : Lunette de Galilée

Mars est située à une distance variant entre 56 et 160 millions de kilomètres de la Terre. Son diamètre vaut 6800 km. On l'observe au travers d'une lunette de Galilée composée d'un objectif et d'un oculaire.

Ces deux systèmes optiques complexes peuvent être modélisés par deux lentilles minces la première (l'objectif) de focale $1,0\text{ m}$ et la seconde (l'oculaire) de focale $-2,5\text{ cm}$.

1. On appelle diamètre apparent l'angle sous lequel est vu un objet. Calculer le diamètre apparent α de la planète Mars lorsqu'elle est observée sans lunette, lorsqu'elle est au plus proche de la Terre. Est-il possible de voir à l'œil nu la surface de Mars ?
2. Où se forme l'image intermédiaire de Mars par l'objectif ?
3. Où doit se former l'image finale pour pouvoir être observée sans fatigue ? Pour cela, où doit alors se trouver l'image intermédiaire de Mars par l'objectif qui joue le rôle d'objet pour l'oculaire ?
4. En déduire avec quel point le foyer principal objet F_{oc} de l'oculaire doit-il coïncider. On réalise dans ce cas là ce qu'on appelle un **système afocal**.
5. Faire un schéma en positionnant les lentilles convenablement.

Mars est assimilé à un objet AB situé à l'infini, où A est sur l'axe optique.

6. Faire le tracer des rayons lumineux à travers la lunette. L'image finale est-elle droite ou renversée ?

On appelle grossissement de la lunette le rapport $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ où α' est le diamètre apparent sous lequel est vue Mars à travers la lunette.

7. Exprimer le grossissement en fonction des distances focales de l'objectif f'_{obj} et de l'oculaire f'_{oc} . Le calculer.
8. Sous quel angle Mars est-elle perçue lorsqu'elle est au plus proche ? Est-il cette fois possible de distinguer sa surface ?

Exercice 10 : Doublet optique de Huygens ● ● ●

On considère un doublet de lentilles minces convergentes non accolées. Ce doublet est caractérisé par les focales f'_1 et f'_2 des deux lentilles et par l'intervalle optique $\overline{O_1O_2} = e$.

Un doublet de Huyghens est du type $f'_1 = 3a$, $e = 2a$ et $f'_2 = a$. Pour les applications numériques, on prendra $a = 2,0\text{ cm}$.

1. Placer sur l'axe optique, en effectuant une construction à l'échelle, les foyers principaux des deux lentilles et déterminer par construction géométrique les positions des foyers principaux objet et image du doublet, notés respectivement F et F' .
2. Vérifier ces résultats par le calcul en déterminant algébriquement $\overline{F_1F}$ et $\overline{F_2F'}$.

Exercice 11 : Temps de pose ● ● ●

L'objectif d'un appareil photographique numérique est modélisé par une lentille mince convergente de distance focale $f' = 38\text{ mm}$. Le diaphragme d'ouverture de l'objectif a un diamètre réglable. Le capteur CCD est composé de cellules photovoltaïques carrées de côté $30\text{ }\mu\text{m}$. L'objectif est mis au point sur un coureur de 100 m , situé à 30 m , se déplaçant perpendiculairement à l'axe optique avec une vitesse de $36\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

1. Quel temps de pose maximal (durée d'exposition) peut-on choisir pour que le mouvement du coureur ne détériore pas la netteté de la photographie ?



Exercice 12 : Œil myope ● ● ●

Un œil myope est constitué d'un ensemble cornée/cristallin trop convergent. La myopie est un défaut de l'œil que l'on peut corriger grâce à des verres correcteurs, des lentilles de contact ou bien de façon définitive par une opération au LASER.

1. Pour un œil myope, où se forme, par rapport à la rétine, l'image d'un objet situé à l'infini ?
2. Construire, pour un œil myope, l'image d'un objet situé à l'infini en dehors de l'axe optique.
3. Quel type de verre correcteur ou de lentille de contact doit-on choisir pour corriger ce défaut ?



4. On donne une liste de verres correcteurs avec les vergences suivantes : -7δ , -3δ , $-0,25 \delta$, $+0,25 \delta$, $+3 \delta$, $+7 \delta$.

Quel verre conviendra pour corriger une myopie faible, moyenne, forte ?

Pour un œil adulte emmétrope (œil sans défaut), l'œil au repos voit net jusqu'à une distance infinie, on dit que son punctum remotum est à l'infini. On considère ici un individu très myope avec un punctum remotum situé à $d = 11 \text{ cm}$ de l'œil. Un opticien lui propose une paire de lunettes avec une distance œil-lunettes de 1 cm .

5. Quelle vergence doit-il choisir pour voir net sans accommoder un objet à l'infini ?
6. Lorsqu'il porte ses lunettes, on constate que les yeux d'un individu myope semblent plus petits et en avant de son visage. Dans un premier temps, justifier ces observations en vous appuyant sur une construction graphique dans laquelle on construit l'image de l'œil par les lunettes.
7. Dans un second temps, et grâce aux relations fournies, calculer de quel pourcentage a varié la taille apparente de ses yeux.

Exercice 13 : Aberrations chromatiques des lentilles minces



À traiter si tout le reste est fait.

1. Les verres courants sont soit de type *crown* soit de type *flint*.
- (a) En analysant les courbes suivantes (figure 1), distinguer ces deux types de verre selon leur pouvoir réfringent et leur pouvoir dispersif.
- (b) Dans le domaine visible, commenter l'évolution de l'indice n de chaque verre avec la longueur d'onde de la lumière dans le vide λ_0 .

On rappelle la loi de Cauchy : $n(\lambda_0) = A + \frac{B}{\lambda_0^2}$ avec A et B des constantes positives.

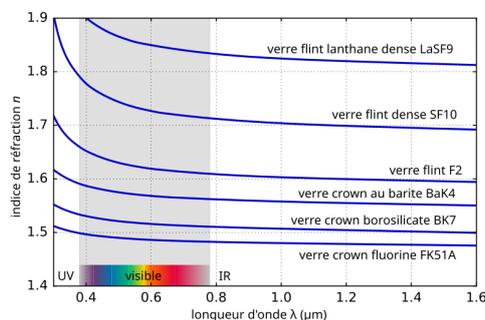


FIGURE 1 – Indice de différents verres selon la longueur d'onde

Pour pouvoir comparer le pouvoir dispersif de deux verres différents, on utilise trois radiations de référence :

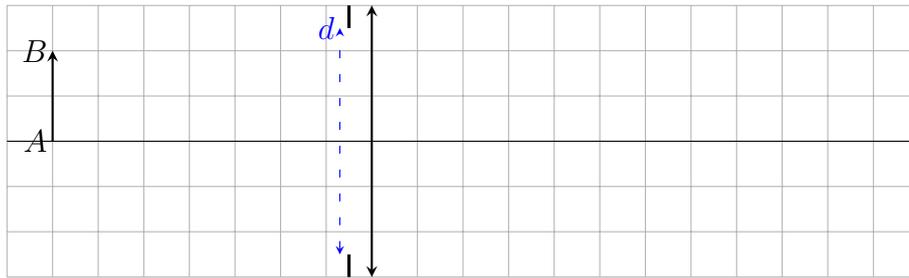
- la radiation rouge C de l'hydrogène, de longueur d'onde dans le vide $\lambda_{0,C} = 653,6 \text{ nm}$
- la radiation bleue F de l'hydrogène, de longueur d'onde dans le vide $\lambda_{0,F} = 481,1 \text{ nm}$
- la radiation jaune D du sodium, de longueur d'onde moyenne dans le vide $\lambda_{0,D} = 589,3 \text{ nm}$

En notant n_C , n_F et n_D les indices du verre pour les radiations respectivement C, F et D, on définit la constringence ν du verre ou nombre d'Abbe, égale à l'inverse de son pouvoir dispersif K par

$$\nu = \frac{1}{K} = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

On considère une lentille mince convergente (\mathcal{L}) et un objet AB éclairé en lumière bichromatique rouge et bleu (radiations C et F). Un diaphragme (D) collé à une lentille limite l'ouverture du faisceau incident. On admet que la vergence de la lentille dépend de l'indice du verre qui la construit selon $V = G(n - 1)$ où G est un facteur ne dépendant que de la géométrie de la lentille.

2. (a) Expliquer pourquoi la lentille va former deux images de l'objet AB , une image $A'_C B'_C$ rouge et une image $A'_F B'_F$ bleu. On supposera par la suite ces deux images réelles.
- (b) Compléter la figure suivante en indiquant qualitativement les positions relatives des foyers principaux images F'_C et F'_F pour les radiations respectives C et F, puis les images $A'_C B'_C$ et $A'_F B'_F$.



La lentille est désormais éclairée par un faisceau de lumière bichromatique rouge et bleu (radiations C et F) parallèle à son axe optique (le point-objet A est donc rejeté à l'infini).

3. Compléter le tracé sur la figure en y ajoutant le cheminement des faisceaux rouge et bleu qui émergent de la lentille.

On appelle aberration chromatique principale longitudinale d'une lentille la distance δ qui sépare ses foyers F'_C et F'_F .

4. Exprimer δ en fonction de la constringence ν du verre de la lentille et de la distance focale image moyenne f'_D , assimilé à celle calculée pour la radiation D. Commenter.
Calculer δ pour une lentille plan convexe ($G = 1/R$) de rayon $R = 15,0$ cm, en verre de type *crown* (constringence $\nu = 37,0$ et indice moyen $n_D = 1,660$).

On appelle aberration chromatique principale transversale d'une lentille le rayon ρ minimal du faisceau émergent intercepté par un écran normal à l'axe optique. La tâche circulaire correspondant définit le cercle de moindre aberration chromatique.

5. (a) Exprimer ρ en fonction de la constringence ν du verre de la lentille et du diamètre d du diaphragme qui contrôle l'ouverture du faisceau incident.
- (b) Calculer ρ pour les deux types de verres précédents et un diamètre d'ouverture $d = 4,0$ cm.

On a mis en évidence le phénomène d'**aberrations chromatiques**, pouvant entraîner des images de mauvaise qualité.

Pour éviter ce problème, on propose de réaliser un **doublet** (= association de deux lentilles) **achromatique**. On admet que la vergence totale d'un système optique constitué de deux lentilles (vergences V_1 et V_2) séparées d'une distance e est $V = V_1 + V_2 - eV_1V_2$ (formule de Gullstrand).

Dans le cas où les deux lentilles sont accolées ($e = 0$), on obtient la formule des opticiens $V = V_1 + V_2$. On considère donc un oculaire constitué de deux lentilles minces de distances focales moyennes $f'_{1,D}$ et $f'_{2,D}$. Dans les conditions usuelles d'observation, on montre que l'oeil voit l'image d'un objet AB éclairé en lumière monochromatique à travers l'oculaire sous un angle $\alpha' \simeq \frac{AB}{|f'|}$ où f' est la distance focale image de l'oculaire.

6. L'objet AB est éclairé en lumière blanche. Pour que l'oeil ait l'impression de voir une unique image blanche à travers l'oculaire, il suffit qu'il voit toutes les images colorées correspondant aux différentes radiations composant la lumière sous le même angle α' . On dit que l'oculaire réalise alors un achromatisme apparent. Quelle condition doit vérifier la vergence $1/f'$ de l'oculaire pour que tel soit le cas ?
7. Montrer que cette condition impose que $f'_{1,D} + f'_{2,D} = 2e$ avec e la distance entre les deux lentilles supposées taillées dans le même verre dans cette question.
L'oculaire de Huygens de l'exercice 10 réalise-t-il un achromatisme apparent ?
8. Les deux lentilles sont désormais accolées ($e = 0$). On note $1/f'_i = G_i(n_i - 1)$ la vergence de la lentille i pour une radiation monochromatique donnée.
Montrer que le système réalise un achromatisme pour deux radiations monochromatiques de longueurs d'onde dans le vide λ_0 et $\lambda_0 + \Delta\lambda_0$ si $G_1\Delta n_1 + G_2\Delta n_2 = 0$ où Δn_i est la variation de l'indice du verre

de la lentille i pour la variation $\Delta\lambda_0$ de la longueur d'onde de la lumière.

En considérant les deux radiations C et F , montrer que la condition précédente s'écrit encore : $\frac{f'_{2,D}}{f'_{1,D}} = -\frac{v_1}{v_2}$

où v_i est la constringence de la lentille i .

9. Peut-on réaliser un achromat mince en accolant deux lentilles taillées dans un même verre ?
 Peut-on réaliser un achromat mince en accolant deux lentilles de même nature ?
 Expliquer finalement comment réaliser un achromat mince convergent.

Résolutions de problèmes

Exercice 14 : Estimation de la profondeur d'un pont ● ● ●

Cette résolution de problème fait suite à l'exercice 6 sur le microscope.

On photographie une feuille de papier millimétré au travers d'un microscope optique (figure 2). Ce microscope porte les indications suivantes : « Objectif $\times 4$; Oculaire $\times 10$ ».

1. Déterminer le diamètre du tube du microscope séparant l'objectif et l'oculaire.

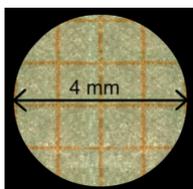


FIGURE 2 – Photographie du papier millimétré observé au microscope

Exercice 15 : Estimation de la profondeur d'un pont ● ● ●

La photographie du pont présentée en figure 3 a été réalisée à l'aide d'un appareil photographique argentique. On donne les caractéristiques suivantes :

- format de l'image sur la pellicule : $24\text{ mm} \times 36\text{ mm}$,
- focale de l'objectif : $f' = 35\text{ mm}$.



FIGURE 3 – Photographie d'un pont

1. Estimer la profondeur du pont en exploitant la photographie.