
Instruments d'optique

- HOUARD : Optique
- SEXTANT : Optique expérimentale
- GRECIAS : Physique SUP PCSI

I) Rappels et conseils pour les manipulations en optique

Nous donnons ici une liste de recommandations pour les manipulations décrites dans le présent polycopié, mais elles doivent être appliquées à l'intégralité des manipulations d'optique. Bien que fastidieuses au début, leur respect systématique doit devenir une habitude, qui améliorera grandement la qualité de vos montages optiques.

1) [1P] Condenseur

Le condenseur est une lentille convergente placée entre la lampe et l'objet. Les condenseurs s'adaptent directement sur les carters des lampes Q.I. ou Philora. Ils servent à collecter le maximum de rayons issus de la lampe et à les renvoyer sur l'objet. Leur distance focale va de 8 à 17 cm. Sachant que la distance lampe-lentille vaut 15 cm quand le condenseur est fermé :

- un condenseur de 17 cm fermé donne un faisceau divergent ;
- un condenseur de 15 cm fermé donne un faisceau quasi parallèle ;
- un condenseur de 8 cm fermé donne un faisceau convergent à une vingtaine de centimètres du condenseur.

Il est possible dans chaque cas d'augmenter un peu la convergence en éloignant le condenseur de la lampe à l'aide de la poignée. Il est important de choisir pour chaque expérience le condenseur adapté.

2) [1P] Formation des images et utilisation des lentilles

- On rappelle qu'il n'est possible de former l'image d'un objet sur un écran à travers une lentille que si la distance objet-écran est au moins égale à $4f$ où f est la distance focale de la lentille utilisée.
- La règle des 4P ('plus plat plus près') doit être systématiquement respectée.
- Le centrage des systèmes optiques doit être vérifié à chaque ajout sur le trajet optique ; on vérifiera donc que le faisceau passe bien par le centre des systèmes optiques en utilisant au besoin un papier blanc pour faire apparaître le faisceau.
- De même pour l'alignement des systèmes optiques : on observera à chaque étape le reflet du faisceau sur le système déjà en place (qui doit être centré). Quand le reflet est difficilement visible, faire pivoter légèrement le système optique sur son axe permet généralement de le faire apparaître.
- Le recours au banc optique est impératif quand des mesures précises de distance entre éléments optiques doivent être effectuées.
- Accoler un diaphragme à une lentille permet de sélectionner les rayons lumineux satisfaisant le plus à l'approximation de Gauss et donc de rapprocher l'expérience des conditions d'idéalité. On note par ailleurs que ce diaphragme joue souvent le rôle de diaphragme d'ouverture et permet donc d'augmenter la profondeur de champ (ce point sera discuté au cours du présent TP).

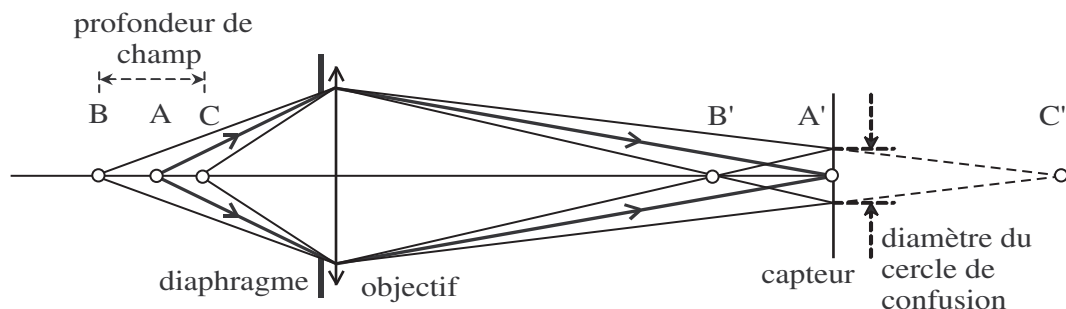
II) L'appareil photo

Nous commençons l'étude des instruments d'optiques par celle d'un objectif d'appareil photographique. Le but est de réaliser sur une pellicule fixe l'image d'un objet distant de quelques décimètres à l'infini¹. On le modélise par une lentille convergente de distance focale f' ².

Regarder l'objectif dont on dispose : on distingue une première bague de rotation permettant de modifier le tirage (distance entre la pellicule et l'objectif) pour que l'objet observé soit net. Les nombres allant de l'infini à 1.5 m aident à la mise au point en indiquant une distance approximative de netteté sur la pellicule (ici non présente, l'intérêt est donc limité). Plus proche du corps de l'objet se trouve une autre bague affichant des nombres entre 22 et 2,8 ; il s'agit de l'échelle des nombres d'ouverture permettant, grâce au contrôle de la taille d'un diaphragme, d'adapter le compromis entre luminosité et profondeur de champ : c'est l'objet de cette étude.

1) [1P] Nombre d'ouverture et profondeur de champ

En toute rigueur, un objet est net seulement s'il est dans le plan conjugué à celui de la pellicule. Cependant, l'expérience commune montre qu'il existe une certaine plage de tolérance, appelée profondeur de champ, sur laquelle une translation de l'objet laisse son image nette. Le passage à une image floue étant progressif, on recourt à un critère objectif pour définir cette profondeur de champ : on compare par exemple la taille de l'image d'un point sur la pellicule (le "cercle de confusion") à celle d'un pixel, ou à celle d'un grain en photographie argentique. Le schéma suivant illustre cette définition empirique :



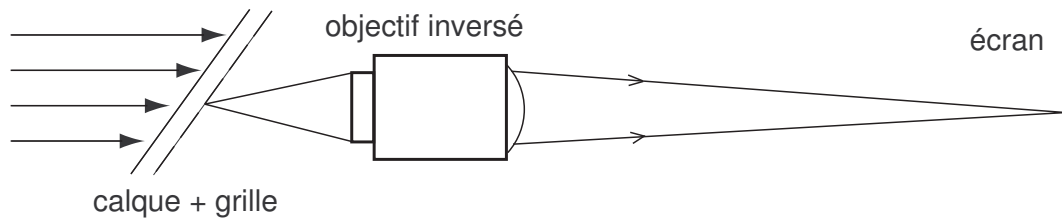
On remarque notamment sur cette figure que l'introduction proche de l'objectif d'un diaphragme, dont le diamètre sera noté D par la suite, augmente ainsi la profondeur de champ. Le nombre $N = f'/D$ est appelé nombre d'ouverture : c'est celui affiché sur l'objectif³.

Manipulation (cf. *Sextant*) : on propose ici une expérience qualitative montrant l'augmentation de la profondeur de champ avec le nombre d'ouverture. Éclairer une grille diffusante avec une lampe quartz-iode et faire l'image avec l'objectif d'appareil photo de cet objet sur un écran situé à environ un mètre (pour minimiser les aberrations géométriques décrites dans la suite de ce TP, orienter l'objectif dans le sens inverse au cas usuel, l'objet étant ici plus proche de l'objectif que l'image). Incliner maintenant la grille comme représenté sur la figure ci-dessous et observer l'influence du nombre d'ouverture sur l'image (en particulier le nombre de carreaux apparaissant nets).

¹Pour des objets très proches on utilise des objectifs dits "macro", alors que pour des objets petits ou éloignés, on utilise un téléobjectif, non présentés ici.

²Bien qu'il soit en réalité constitué d'une succession de lentilles pour minimiser l'encombrement ainsi que les aberrations chromatiques et géométriques.

³En pratique, il est réglable en modifiant D



Il est possible de rendre cette manipulation quantitative, en mesurant la profondeur de champ en fonction de l'ouverture de l'objectif (voir Sextant).

2) [2P] Nombre d'ouverture et éclairage

On pourrait penser qu'il faut toujours choisir le nombre d'ouverture le plus élevé disponible afin d'optimiser la profondeur de champ. Cependant, un grand nombre d'ouverture diminue fortement l'intensité lumineuse reçue sur la pellicule (inversement proportionnelle à N^2) et oblige à utiliser un temps de pose long entraînant des risques de bougé : il faut donc établir au cas par cas le bon compromis entre profondeur de champ et durée d'exposition.

Manipulation (inspirée du *Sextant*) : il est possible de montrer quantitativement la dépendance en N^{-2} de l'intensité reçue sur la pellicule. Pour cela, remplacer la grille diffusante par un calque non incliné (ou tout du moins vérifier que le faisceau incident est homogène sur la surface de l'objectif), et accoler à l'objectif photographique, du côté opposé à celui de l'objet, une lentille de courte distance focale (10 centimètres). Positionner le capteur (luxmètre ou photodiode) de manière à capter tous les rayons issus de l'objectif, faire le zéro de manière appropriée pour s'affranchir de toute lumière diffusée et tracer l'intensité lumineuse en fonction de N^{-2} en prenant en compte les incertitudes, puis vérifier la loi proposée.

III) Le microscope

Le microscope a pour but de réaliser à partir d'un objet proche une image agrandie à l'infini (pour que l'œil n'accomode pas) dont les détails sont mieux perceptibles. Il est constitué d'un tube reliant deux cylindres, nommés objectif et oculaire et modélisés par des lentilles convergentes : le premier fait de l'objet une image intermédiaire, agrandie, située dans le plan focal objet du second (utilisé comme une loupe : il renvoie l'image agrandie à l'infini). Chacun de ces constituants participe à l'agrandissement de l'image, mais du fait de leur fonction différente, on est amené à quantifier cet effet via deux grandeurs distinctes :

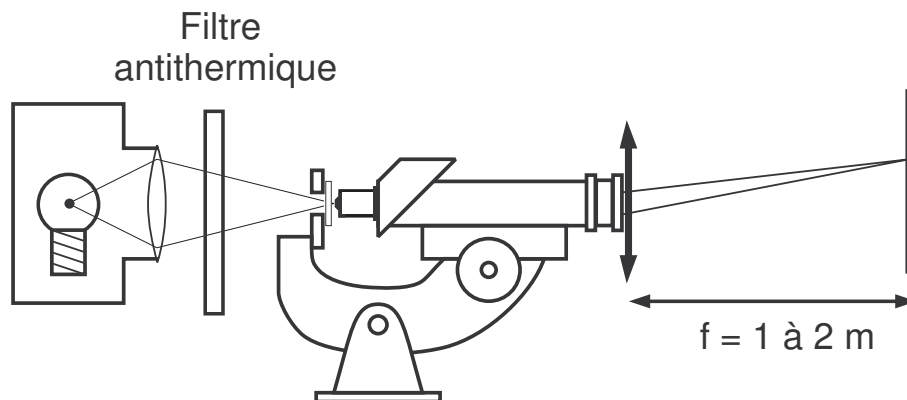
- pour l'objectif, le chiffre gravé sur le cylindre (x4, x10, x60) est son grandissement γ_{ob} , *i.e.* le rapport entre deux tailles : celle de l'image intermédiaire et celle de l'objet ($\gamma_{ob} < 0$ car l'image est renversée)

- pour l'oculaire, il s'agit en revanche de son grossissement commercial $G_{c,oc}$ (x6, x10, x15), à savoir le rapport entre deux angles : celui sous lequel est vu l'objet après l'oculaire et celui sous lequel il est vu sans oculaire à une distance de 25 cm (le *punctum proximum*)

- pour le microscope entier, on utilise aussi le grossissement commercial et on peut alors montrer que $G_{c,mic} = G_{c,oc} |\gamma_{ob}|$

1) [1P] Mesure du grossissement commercial

Manipulation (cf. *Sextant*) : Disposer le microscope horizontalement comme indiqué sur la figure et le poser sur un support élévateur. Placer une mire graduée en dixièmes de millimètre dans la platine porte-objet et choisir par exemple $\gamma_{ob} = 4$ et $G_{c,oc} = 10$. Éclairer l'objet grâce à une lampe quartz-iodé avec un condenseur de courte focale faisant converger le faisceau sur l'objet. **Il est indispensable de prendre l'habitude de placer entre le condenseur et l'objet un filtre antithermique pour éviter une destruction rapide de l'objet**⁴. Placer juste après l'oculaire une lentille de grande focale (1 à 2 m) et un écran dans le plan focal. Régler le microscope pour que l'image de la mire soit nette sur l'écran, mesurer l'angle sous lequel on voit une graduation de la mire à la sortie du microscope, en déduire le grossissement commercial du microscope et vérifier la relation $G_{c,mic} = G_{c,oc} |\gamma_{ob}|$.



2) [AP] Autres manipulations possibles

La profondeur de champ est définie de manière différente pour l'objectif d'appareil photo et le microscope (l'œil accommodant au maximum pour toujours avoir une image nette sur la rétine), sa valeur variant typiquement entre le micron et la centaine de microns pour ce dernier appareil : il est cependant délicat d'en faire une mesure quantitative. D'autres expériences concernant le microscope sont néanmoins réalisables, on se référera par exemple au *Sextant* ou à *Optique* (S. Houard).

IV) La lunette astronomique

Références :

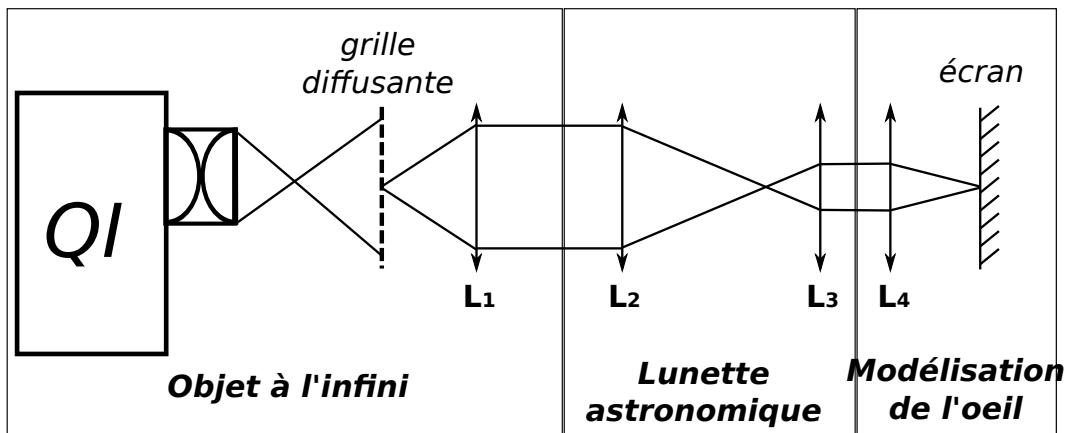
- Houard, *Optique* (lecture au moins partielle très chaudement recommandée)
- Duffait, *Expériences d'optique*

Comme le microscope, la lunette astronomique est formée de deux lentilles convergentes (une variante existe avec une lentille convergente et une divergente). Cependant, la lunette est conçue pour observer des objets à l'infini. On souhaite également une image sortante à l'infini pour que l'œil n'ait pas besoin d'accomoder. C'est ce qu'on appelle un système *afocal*.

⁴Un tel filtre est normalement déjà installé au dessous de la platine porte-objet, donc on pourra se contenter de vérifier sa présence.

1) Schéma

Le schéma de principe d'une lunette est donné ci-dessous. L'objet sera l'image à l'infini d'un quadrillage, renvoyé à l'infini par une lentille convergente (L_1) de focale 20 cm. La lunette astronomique est représentée par une lentille de grande focale (L_2) appelée *objectif*, et une lentille de petite focale (L_3) appelée *oculaire*, le foyer image de la première est confondu avec le foyer objet de la seconde. On modélise l'œil par une lentille convergente (L_4) de 20 cm également, munie d'un écran dans son plan focal image (œil sans accommodation). Réaliser le montage ci-dessous sur banc d'optique.



On rappelle qu'il n'est pas nécessaire d'éloigner les systèmes optiques aux endroits où les faisceaux sont envoyés à l'infini. En effet, cet éloignement provoque une perte de luminosité et engendre de la lumière parasite : il ne faut pas oublier que des faisceaux envoyés à l'infini sont a priori divergents.

2) [1P] Grossissement

L'objet AB étant à l'infini, le grossissement n'est pas une grandeur pertinente. Comme pour le microscope, on définit le *grossissement* $G = \frac{\theta'}{\theta}$, rapport des angles sous lesquels sont vus l'objet avec et sans lunette. Démontrer que

$$G = \frac{\theta'}{\theta} \approx -\frac{f'_{ob}}{f'_{oc}}$$

dans l'approximation des petits angles. Le signe moins témoigne du fait que l'image obtenue est renversée. Il faut donc choisir un objectif de grande focale (ici on prendra $f'_{ob} = 50$ cm) et un oculaire de petite focale ($f'_{oc} = 10$ ou 20 cm). Noter que c'est l'inverse du microscope où on choisit un objectif de courte focale ! Mesurer expérimentalement le grossissement, et vérifier la formule ci-dessus.

3) [1P] Cercle oculaire

Le cercle oculaire est le lieu de convergence de tous les rayons passant à travers l'objectif. Il est habituellement situé derrière l'oculaire. Plus clairement, c'est l'endroit situé derrière l'oculaire où les rayons lumineux sont les plus concentrés. Le repérer. C'est à cet endroit qu'il convient de placer l'œil (ici la focale de 20 cm) afin d'avoir le maximum de champ. La taille du cercle oculaire dépend-elle du grossissement de la lunette ? Quelle est la taille optimale du cercle oculaire ?

4) Diaphragmes d'ouverture et de champ

a) [1P] Définitions et mise en évidence

On s'intéresse ici aux limitations de la luminosité et du champ transversal dans un instrument d'optique. On a observé leur importance dans l'étude de l'appareil photo et du microscope.

Dans un instrument d'optique, on distingue deux notions : le *champ* qui est la partie visible de l'objet à travers l'instrument, et l'*ouverture* qui sélectionne les rayons incidents selon l'angle qu'ils forment avec l'axe optique.

Placer un diaphragme réglable D_1 contre l'objectif et un diaphragme réglable D_2 dans le plan de l'image intermédiaire (foyer de L_2).

NB : Dans cette manipulation, les diaphragmes D_1 et D_2 doivent être plus fermés que les montures des lentilles afin que ce ne soit pas ces dernières qui limitent l'étendue du faisceau.

Manipulation

Sans modifier D_1 , réduire la taille de D_2 . Vérifier que la luminosité de l'image n'est pas affectée mais que la surface visible de l'objet est réduite : D_2 est appelé *diaphragme de champ*.

Faire ensuite varier D_1 à D_2 fixé. Cette fois le champ n'est pas modifié, mais la luminosité de l'image diminue lorsque le diamètre de D_1 diminue : D_1 est appelé *diaphragme d'ouverture*.

Pour une introduction complète des notions de diaphragme de champ et d'ouverture, voire *Sextant* (p.42).

b) [2P] Pour aller plus loin : Notion de lucarne et de pupille

Les systèmes optiques réels contiennent plusieurs diaphragmes, dont les montures des lentilles. Parmi eux, l'un joue le rôle de diaphragme de champ, un autre d'ouverture. Quand on modélise l'instrument on remplace ces diaphragmes réels par deux diaphragmes fictifs placés dans l'espace objet (ou dans l'espace image : on passe de l'espace objet à l'espace image par conjugaison à travers l'ensemble de l'instrument).

- la *lucarne d'entrée* est un diaphragme en général fictif de l'espace objet, qui est le conjugué du diaphragme de champ à travers toutes les lentilles qui le précèdent dans l'instrument. Par exemple, dans l'instrument du paragraphe précédent, la lucarne d'entrée est le conjugué de D_2 par rapport à l'objectif.
- la *pupille d'entrée* est définie de la même façon à partir du diaphragme d'ouverture.

On peut aussi modéliser l'instrument par sa *lucarne de sortie* et sa *pupille de sortie*, qui sont respectivement les conjugués dans l'espace image du diaphragme de champ et du diaphragme d'ouverture à travers les lentilles de l'instrument qui les suivent.

Montrer expérimentalement que l'effet d'un diaphragme de champ (resp. d'ouverture) est le même que celui d'une lucarne (resp. pupille) d'entrée ou de sortie (voir *Sextant*).

c) [2P] Augmentation du champ d'une lunette

On cherche en général à avoir le grossissement le plus grand possible. Cependant, lorsqu'on augmente le grossissement G , le champ visible de l'objet diminue. On dit que le *champ image* de l'instrument diminue. Pour palier ce problème, on place une *lentille de champ* entre l'objectif et l'oculaire. Utiliser la lentille de très grand diamètre (de distance focale 33 cm), et observer l'effet sur la zone de champ visible (pour plus d'informations, voir le *Sextant* p. 46).

5) [AP] Clarté

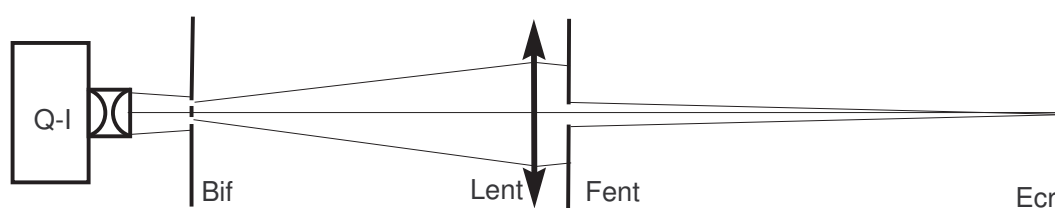
Cette notion subtile mais néanmoins importante pour un instrument d'optique n'est pas traitée dans ce TP. Dans un second temps, vous pouvez vous référer au Duffait d'optique pour la mesurer.

V) Limite de résolution d'un instrument d'optique

1) [1P] Mise en évidence et critère de Rayleigh

En pratique, le grossissement G ne dépasse jamais 100-200. Cela n'est pas dû à une limite technologique, mais à une limite fondamentale des instruments d'optique : la diffraction.

Elle va intervenir d'autant plus que l'ouverture du système optique sera faible. Dans les instruments d'optique usuels, elle se manifeste assez peu. Pour la rendre visible, on va ici diaphragmer énormément une lentille.



L'objet dont on fait l'image est une bifente d'Young (Bif sur le schéma), et l'objet diffractant une fente réglable étalonnée (Fent).

Faire l'image de la bifente sur l'écran (Ecr) à grande distance en faisant converger le faisceau lumineux de la Q.I. au voisinage de la lentille (Lent). Placer la fente réglable juste après la lentille. Observer les variations d'aspect de l'image sur l'écran et mesurer la largeur minimale de la fente à partir de laquelle les images sont vues séparées sur l'écran.

Pour rendre l'expérience plus visible, on peut incliner fortement l'écran, ce qui est sans inconvénient car la profondeur de champ est très grande (la fente diaphragme beaucoup). Faire une mesure quantitative (critère de Rayleigh) en ajoutant un filtre orange ordinaire (avec $\lambda \simeq 600$ nm, ne pas oublier un filtre anti-thermique).

Note 1 : on apportera la plus grande rigueur à l'identification des grandeurs comparées, les erreurs étant très fréquentes sur ce point. Pour ne pas se tromper, le plus simple est de se ramener au schéma des deux images voisines de fentes élargies par la diffraction et d'identifier proprement l'origine des deux grandeurs caractéristiques sur ce schéma.

Note 2 : Il est possible de visualiser de façon plus précise le critère de Rayleigh à l'aide d'une barrette CCD ou d'une Webcam. Ajouter de même un filtre anti-thermique. On peut aussi systématiser cette mesure en utilisant des filtres à différentes longueurs d'onde.

Note 3 : Une expérience analogue peut être réalisée en remplaçant la bifente par une raie spectrale double traversant un élément dispersif : prisme à vision directe (doublet du sodium) ou réseau (doublet du mercure) (cf. poly Spectroscopie).

2) [AP] Mise en évidence sur un instrument réel

Utiliser le microscope de la collection, et réaliser la manipulation de la mesure du grossissement commercial (voir Section III.1). Remplacer la mire graduée par différents réseaux optiques (commen-

cer par le moins dispersif), et observant leur image de deux manières différentes :

- en projetant sur un écran l'image réelle du réseau en sortie du microscope à l'aide d'une lentille de 1m : si le pas du réseau est grossier on voit les stries à l'écran, mais si le pas est trop fin elles disparaissent ;

- en regardant la TF de cette image localisée au niveau de la pupille de sortie de l'objectif. Quelques détails :

– il faut enlever l'oculaire du microscope et faire l'image de l'intérieur de l'objectif sur un écran avec une lentille de 20 cm ;

– on voit alors les différents ordres d'interférences du réseau sur l'écran, plus le pas du réseau est petit plus ils sont espacés ;

– lorsque le premier ordre est si espacé qu'il est coupé/filtré par la monture de l'objectif, alors on a atteint la limite de résolution de l'instrument et cela correspond au moment où les stries disparaissent de l'écran.

Cette manipulation permet d'évaluer le pouvoir de résolution du microscope de façon simple (par exemple si les stries disparaissent pour un réseau de 600 traits/mm, la résolution est de 1/600 mm), de voir concrètement l'effet du filtrage spatial, et de comprendre l'intérêt d'un objectif à grande ouverture numérique. En effet, la résolution est proportionnelle à $1/ON$, et le microscope possède deux objectifs de $ON=0.1$ et $ON=0.25$: on peut ainsi constater que l'un a un pouvoir de résolution environ double de l'autre.

VI) Aberrations des lentilles sphériques

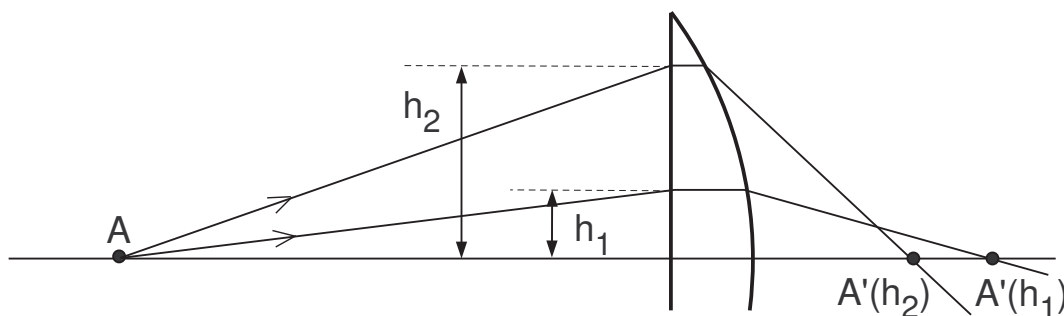
La formation d'image est en pratique souvent limitée par la non-idéalité des composants optiques utilisés, on parle d'aberrations géométrique ou chromatique :

- les aberrations géométriques qui sont dues à l'écart aux conditions de Gauss. Il en existe plusieurs types et on se limitera ici à l'aberration géométrique sphérique ;
- les aberrations chromatiques, provenant de la variation de l'indice des verres avec la longueur d'onde (dispersion).

1) [1P] L'aberration géométrique sphérique

Hors des conditions de Gauss, une lentille sphérique n'est pas stigmatique. Dans le cas d'un point sur l'axe, ce défaut résulte uniquement de l'aberration sphérique alors que pour un point hors de l'axe, d'autres aberrations interviennent également.

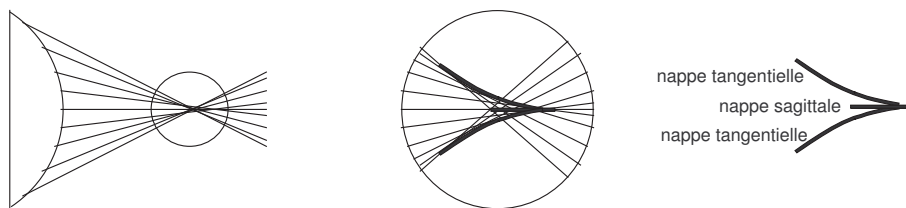
On peut comprendre l'aberration géométrique sphérique à l'aide de la figure ci-dessous.



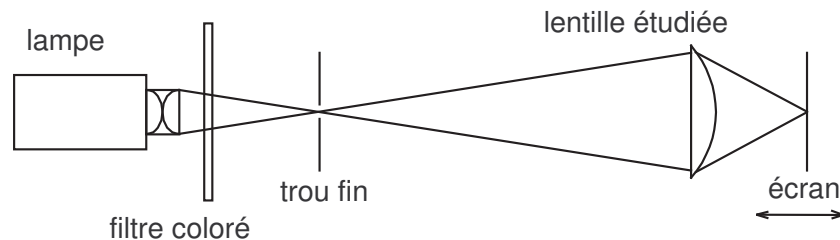
Caustiques : Un rayon issu de A qui atteint la lentille à une distance h de l'axe optique, rencontre cet axe en un point $A'(h)$. Plus h est grand, plus $A'(h)$ est situé près de la lentille : il n'y a donc pas stigmatisme.

La figure ci-dessus possède la symétrie de révolution autour de l'axe optique : tous les rayons incidents traversant la lentille à la distance h de l'axe optique passent par le point $A'(h)$ qui est donc très lumineux et l'ensemble de ces points correspondants aux diverses valeurs de h forme la *nappe sagittale*. Cette nappe est un segment de droite dont l'extrémité la plus éloignée de la lentille est l'image de Gauss du point A, correspondant à $h = 0$.

À l'aide de la figure suivante, on comprend que les points de la surface latérale sont aussi des points d'accumulation de lumière. Cette deuxième nappe qui est l'enveloppe des rayons émergents est appelée *nappe tangentielle*.



Manipulation (cf. *Sextant*) : Pour n'étudier que l'aberration sphérique, on propose de réaliser l'expérience en prenant un objet ponctuel situé sur l'axe et une lentille L plan-convexe *non corrigée des aberrations* ("lentille simple") de courte distance focale et grand diamètre (nombre d'ouverture ≤ 3). Réaliser le montage décrit suivant :

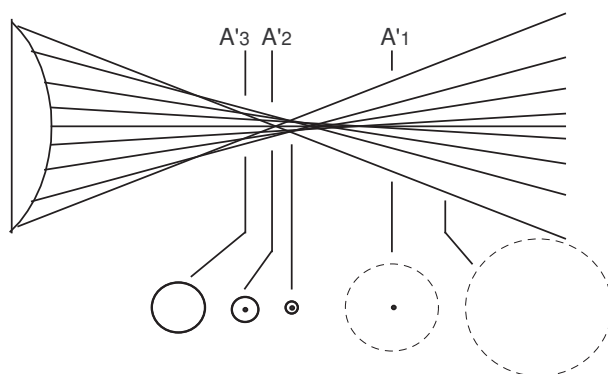


Le trou doit être très petit (≈ 1 mm). Pour faire apparaître au maximum l'aberration sphérique, la lentille doit être éclairée sur toute sa surface et son sens d'utilisation doit être choisi de façon à violer la «règle des 4 P (Plus Plat Plus Près)».

Le filtre coloré sert à éliminer l'aberration chromatique. En déplaçant l'écran, faire apparaître les nappes sagittale et tangentielle. Il est également possible d'incliner l'écran pour qu'il soit proche d'aligné avec l'axe optique, et faire apparaître ainsi directement les nappes sur celui-ci.

Les phénomènes observés peuvent être interprétés à l'aide de la figure suivante : en A_3 , on observe une tache lumineuse circulaire dont le bord est très lumineux (coupe de la nappe tangentielle). De A_3 à A_2 , la seule modification observée est une diminution du rayon de la tache lumineuse. En A_2 , il apparaît en plus un point lumineux au centre de la tache (coupe de la nappe sagittale). Après A_1 , on n'observe plus ni la nappe sagittale, ni la nappe tangentielle. Par contre, on observe une tache peu lumineuse dont le diamètre s'accroît rapidement lorsqu'on s'éloigne de A_1 .

Rechercher la position de l'écran pour laquelle l'image obtenue a la plus petite taille (cercle de moindre diffusion).



Placer un diaphragme réglable contre la lentille et vérifier que l'aberration sphérique (notamment la taille du cercle de moindre diffusion) décroît très rapidement lorsqu'on diminue la taille du diaphragme.

En absence de diaphragme, retourner la lentille et vérifier que les aberrations sont moins grandes lorsque l'on respecte la règle des 4 P.

Remarque : une manipulation alternative consiste à visualiser les différentes nappes dans une cuve remplie d'eau dans laquelle on rajoute un peu de lait en poudre.

2) [1P] L'aberration chromatique

Manipulation (cf. *Sextant*) : Pour la mettre en évidence, utiliser une *lentille simple non corrigée* (voir la remarque en fin de ce paragraphe) de distance focale environ 20 cm. Former l'image d'une fine grille *diffusante*⁵ éclairée par une lampe quartz-halogène. Faire la mise au point sur un petit écran mobile situé à plus d'un mètre de la lentille. Éventuellement diaphragmer légèrement la lentille pour minimiser les aberrations géométriques tout en gardant une faible profondeur de champ.

Comme toutes les manipulations d'optique où on mesure des distances entre différents éléments du montage, on conseille très fortement l'utilisation d'un banc optique.

Placer un filtre interférentiel rouge près de la grille et repérer avec soin la position de l'image la plus nette. Procéder de la même façon avec un filtre bleu.

On propose ici une exploitation quantitative : soit p la distance constante trou-lentille et p' la distance lentille-écran. À partir de la relation de conjugaison :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

et de la formule :

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

où n est l'indice du verre et R_1 et R_2 sont les rayons de courbure algébriques des deux faces de la lentille. On montre qu'une petite variation Δn de l'indice entraîne en première approximation une variation de la distance lentille-image qui vaut :

⁵Les auteurs du *Sextant* proposent de faire l'expérience avec un très petit trou. En effet, si on éclaire toute la lentille, on observe des aberrations géométriques. Pour s'en affranchir, on est tenté d'éclairer localement le centre, mais alors, la profondeur de champ devient trop grande. Ce choix d'éclairage par un trou n'est donc pas optimal. Le diffuseur permet lui d'éviter ces problèmes.

$$\Delta p' \approx -\frac{p'^2}{f} \frac{\Delta n}{n-1}$$

On voit sur cette formule qu'une valeur élevée de p' facilite l'observation du phénomène. En déduire une valeur approchée du pouvoir dispersif du verre de la lentille dont on rappelle qu'il est défini par :

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

où n_C , n_D et n_F sont les indices pour les radiations C ($\lambda = 656$ nm), D ($\lambda = 589$ nm) et F ($\lambda = 486$ nm). Les valeurs usuelles de K sont $K \approx 1/60$ pour les verres peu dispersifs (crowns) et $1/50 < K < 1/30$ pour les verres très dispersifs (flints).

Remarque : On corrige l'aberration chromatique en accolant deux lentilles (d'où le nom de *doublet achromatique*), l'une très convergente mais peu dispersive et l'autre peu divergente mais très dispersive. Cela diminue par la même occasion les aberrations géométriques, aussi traitées en modifiant légèrement la forme des lentilles. **Les lentilles usuelles de la collection sont des doublets achromatiques.** Pourquoi les lentilles en quartz ne sont-elles pas corrigées de l'aberration chromatique ? Quel est leur usage ? (réponses dans le *Sextant* p13.)