
Instruments d'optique

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

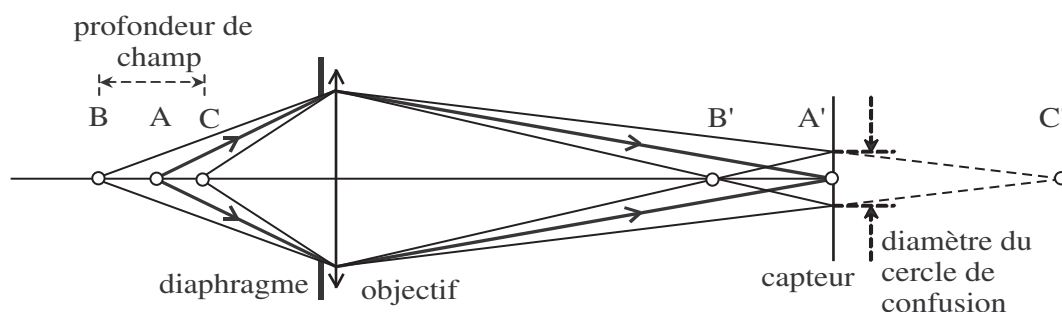
I) Appareil photo

Nous commençons l'étude des instruments d'optiques par celle d'un objectif d'appareil photographique. Son but est de réaliser sur une pellicule fixe l'image d'un objet distant de quelques décimètres à l'infini ¹. On le modélise par une simple lentille convergente de distance focale f' ².

Regarder l'objectif dont on dispose : on distingue déjà une 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) 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, il est nécessaire de prendre un critère objectif : 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 ces propos :



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. Dans le cas particulier d'une mise au point à l'infini (photographie de paysage), on peut montrer que la profondeur de champ est proportionnelle à N .

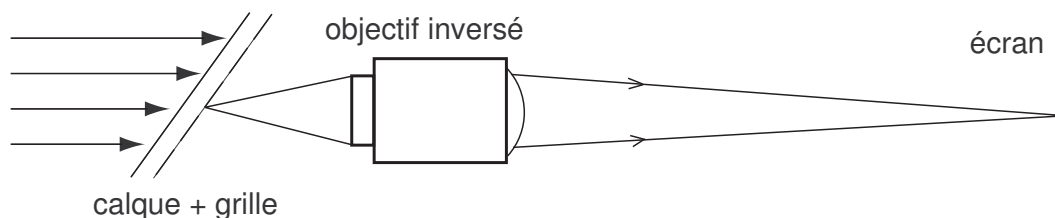
Manipulation (cf. *Sextant*) : on propose ici une expérience qualitative montrant l'augmentation de la profondeur de champ avec le nombre d'ouverture. Éclairer une grille diffusante avec une lampe quartz-iode et faire l'image avec l'objectif d'appareil photo de cet objet sur un écran

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

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).



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) Nombre d'ouverture et éclairement

On pourrait penser qu'il faut toujours choisir le nombre d'ouverture le plus élevé disponible. 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 une plaque opaque non inclinée et accoler à l'objectif photographique, du côté opposé à celui de l'objet, une lentille de courte distance focale (10 centimètres). Positionner le luxmètre 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.

II) 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). Chacun de ces constituants participe à l'agrandissement de l'image, mais du fait de leur mode de fonctionnement différent, on est amené à quantifier cet effet via deux grandeurs distinctes :

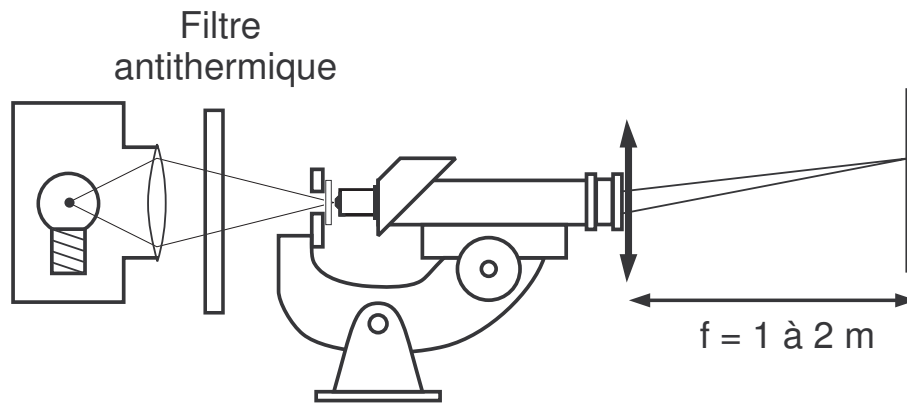
- pour l'objectif, le chiffre gravé sur le cylindre (x4, x10, x60) est son grandissement γ_{ob} , *i.e.* le rapport entre deux tailles : celle de l'image intermédiaire et celle de l'objet ($\gamma_{ob} < 0$ car l'image est renversée)

- 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 25cm (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) 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-iode 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.** 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) 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 : 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)

III) Lunette astronomique

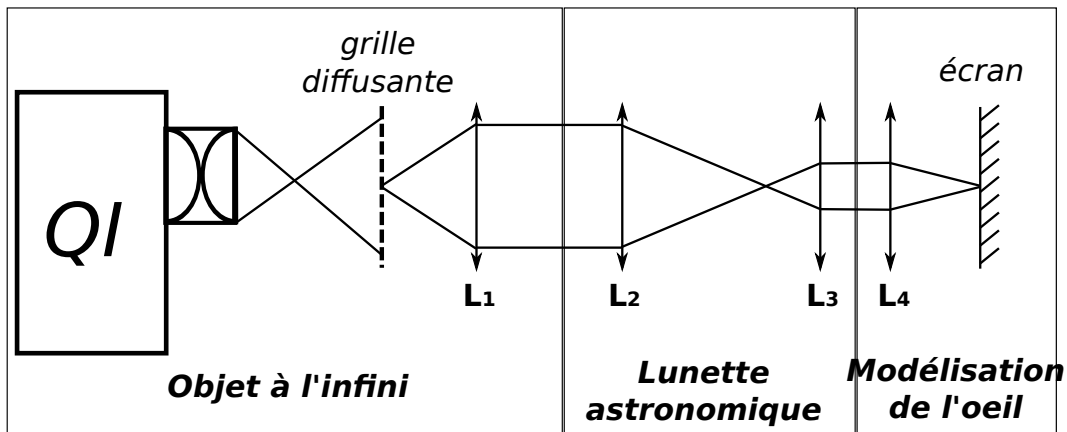
Références :

- 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*.

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.



2) 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 (au *punctum proximum*). Démontrer que

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

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 $f'_{\text{ob}} = 50\text{cm}$) et un oculaire de petite focale ($f'_{\text{oc}} = 10$ 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) 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 20cm) 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) 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 : Pour pouvoir étudier l'effet des diaphragmes D_1 et D_2 , il faut toujours s'assurer que ceux-ci sont assez fermés pour que les montures des lentilles ne diaphragment pas.

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) Pour aller plus loin : Notion de lucarne et de pupille (Facultatif)

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) Augmentation du champ d'une lunette

On cherche en général à avoir le grossissement le plus grand possible. Cependant, lorsqu'on augmente G , la zone 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 33cm), et observer l'effet sur la zone de champ visible.

5) 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.

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

a) Mise en évidence

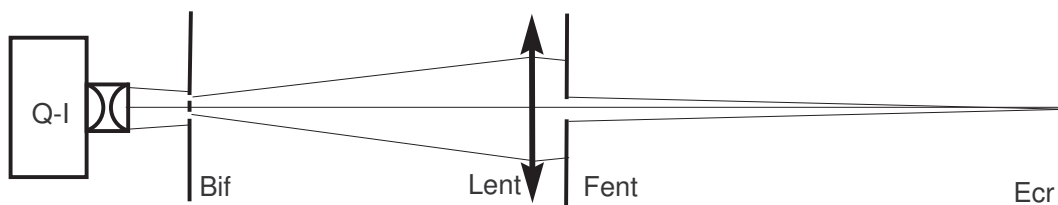
En pratique, G ne dépasse jamais 100-200. Cela n'est pas dû à une limite technologique, mais à une limite fondamentale des instruments d'optique : la diffraction.

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

Pour visualiser cela avec la lunette astronomique, utiliser comme objet une fente double, et la placer à l'infini. Placer une fente de largeur variable parallèle à l'objet devant l'objectif. En fermant progressivement la fente, visualiser la perte de résolution de l'instrument, on ne distingue plus les deux fentes. Changer d'oculaire pour augmenter le grossissement, la limite de séparation reste la même.

C'est pour cette raison qu'en pratique, on s'efforce toujours d'avoir des lunettes de grand diamètre.

b) Critère de Rayleigh



L'objet est une bifente d'Young (Bif sur le schéma), et 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 : Cette expérience peut être analysée quantitativement avec une barrette CCD ou une Webcam. Ajouter de même un filtre anti-thermique.

Note 2 : 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).

IV) Aberrations des lentilles sphériques

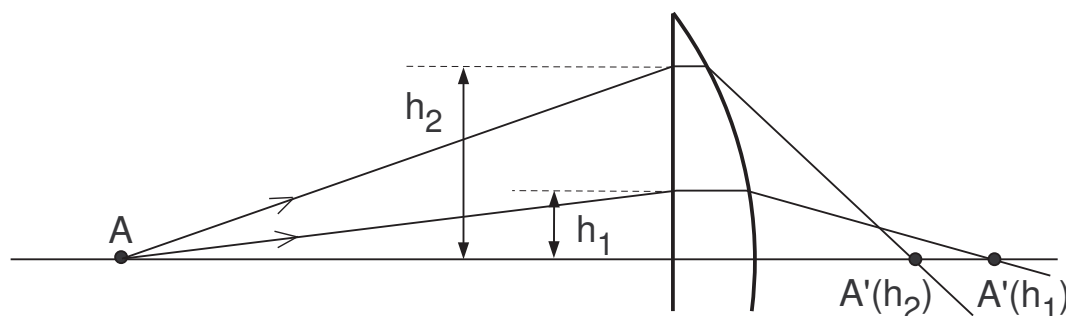
La formation d'image est en pratique souvent limitée par la non-idéalité des composants optiques utilisés, on parle d'aberrations géométrique ou chromatique :

- 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 sphérique
- les aberrations chromatiques, provenant de la variation de l'indice des verres avec la longueur d'onde (dispersion)

c) L'aberration 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 sphérique à l'aide de la figure ci-dessous.

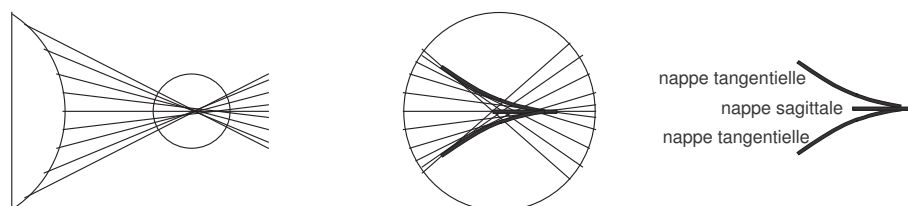


d) Caustiques

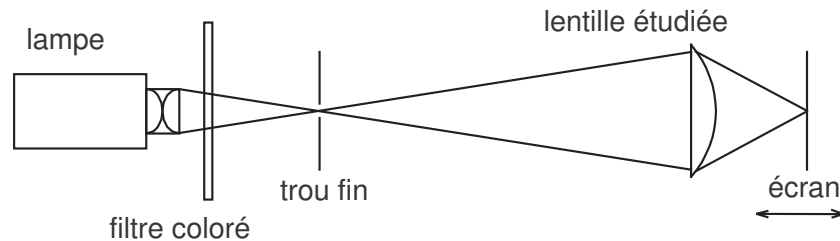
Un rayon issu de A qui atteint la lentille à une distance h de l'axe optique, rencontre cet axe en un point $A'(h)$. Plus h est grand, plus $A'(h)$ est situé près de la lentille : il n'y a donc pas stigmatisme.

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*.



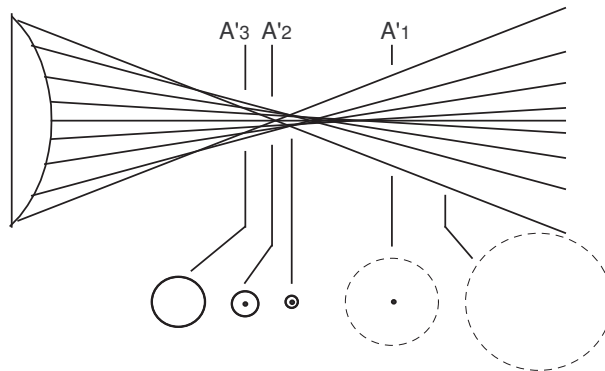
Manipulation (cf. *Sextant*) : Pour n'étudier que l'aberration sphérique, on propose de réaliser l'expérience en prenant un objet ponctuel situé sur l'axe et une lentille L plan-convexe *non corrigée des aberrations* ("lentille simple") de courte distance focale et grand diamètre (nombre d'ouverture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

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.

e) 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*⁴ 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 :

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

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).

f) 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 ?

⁴Les 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'éclairement par un trou n'est donc pas optimal. Le diffuseur permet lui d'éviter ces problèmes.