
Physique pour les chimistes - Optique géométrique

La référence principale – un texte court et cohérent niveau agrégation :

– Sextant, *Optique expérimentale*, Hermann. – chapitre I sections 1,4,5,6 et 8

Illustrations des montages en couleur – une approche didactique et plus approfondie :

– Houard, *Optique*, De Boeck. – chapitres 2 à 6, se concentrer sur les débuts de chapitre

Banque de travaux pratiques – utiles pour trouver des idées (dans l'ordre de préférence) :

– Duffait, *Expériences d'optique*, Bréal. – chapitres 17 à 19

– Journeaux : *Travaux pratiques de physique*, de Boeck Université. – chapitres 14 à 17

– Bellier, Bouloy, Guéant : *Montages de physique*, Dunod.

Livres du secondaire et de prépa, en particulier – à consulter en parallèle du TP :

– Dulaurans, Durupthy, *Physique Chimie 1ère S*, Hachette ; – chapitre 1

I) Préambule

Ce TP porte sur la réalisation des montages d'optique géométrique élémentaires ainsi que sur la mise en évidence des lois fondamentales de l'optique. Il est indispensable pour aborder de nombreuses leçons au niveau lycée ("Spectres", "Aspects ondulatoires en optique", "L'œil et la vision et les couleurs", "Instruments optiques", "Sources de lumières", etc. . .)

Ce TP est basé en grande partie sur le Sextant que vous devez étudier avec soin. L'optique est une discipline expérimentale et à ce titre un candidat ne doit pas se contenter d'un résultat qualitatif (comportement qui est malheureusement souvent observé). Il doit au contraire s'interroger sur ses choix, implicites et explicites, et chercher à obtenir les meilleures conditions expérimentales. Il existe des méthodes d'alignement qui ne sont pas enseignées et ne se trouvent pas dans les livres grand public pour accélérer et faciliter l'obtention du meilleur résultat. Nous donnons l'esprit de ces méthodes dans ce polycopié.

II) Sources lumineuses

Commencez par vous familiariser avec les différentes lampes à votre disposition. Consultez le Sextant, chapitre I.1.

1) Lampes thermiques

Les sources thermiques fournissent une lumière "blanche", sur le principe des lampes à incandescence ordinaires : on chauffe un matériau suffisamment pour que son rayonnement thermique soit dans le visible.

- Quel est le spectre d'émission d'une lampe à incandescence ?
- À quoi sert l'halogène dans l'ampoule ?
- D'où vient le nom *Quartz-Iode* que l'on utilise familièrement pour les lampes thermiques de la collection ?

2) Lampes spectrales

Les lampes spectrales ont au contraire un spectre de raies caractéristique de la vapeur atomique présente dans leur enceinte (ce qui permet en astronomie d'obtenir des informations sur la composition chimique des étoiles, cf. thème Univers du nouveau programme de seconde). Elles sont alimentées par un autotransformateur spécial, qui provoque des décharges électriques excitant les atomes de la vapeur. La désexcitation qui s'ensuit est à l'origine de l'émission lumineuse. Ces sources ne fonctionnent normalement qu'après quelques minutes de chauffage, il faut donc les allumer à l'avance et éviter de les éteindre et de les rallumer trop fréquemment. Les modèles dits *haute pression* sont plus lumineux que les modèles *basse pression*, et ont des raies plus larges. La lampe *Philora* est une lampe à vapeur de mercure haute pression, montée dans un carter similaire à ceux des quartz-iode (QI).

Sur les lampes QI et Philora vous pouvez placer des *condenseurs*. Ce sont des lentilles (plus précisément deux lentilles plan-convexe accolées) qui permettent de collecter le maximum de rayons issus de la lampe et de les concentrer sur l'objet à éclairer. Leur distance focale varie entre 8 et 15 cm. Quel que soit le condenseur, la distance entre la lampe et la lentille vaut 15 cm quand le condenseur est fermé (on règle la distance entre la lampe et la lentille à l'aide d'une manette sur le condenseur).

- Vérifiez qu'un condenseur fermé de focale 15 cm donne un faisceau quasi-parallèle, alors qu'un condenseur de focale plus courte fait converger le faisceau à quelques dizaines de centimètres de la lampe.

3) Lampes fluocompactes

Ces lampes, qui remplacent progressivement les lampes à filament, fonctionnent sur le même principe que les "tubes néon", tout en pouvant être installées sur des culots similaires à ceux des ampoules classiques, et en occupant à peine plus de place. Elles fonctionnent comme les lampes à vapeur de mercure, mais sont recouvertes d'un ensemble de matériaux fluorescents, qui redistribuent la lumière ultraviolette de l'émission du mercure sur un ensemble de bandes spectrales assez larges. La composition de ce revêtement peut varier selon l'ampoule, permettant d'obtenir des couleurs tendant plutôt vers le jaune ou plutôt vers le bleu. Les fluocompactes consomment entre 1/5 et 1/3 de ce que consomment les ampoules à filament, et ont une durée de vie de 8 à 15 fois plus longue. La présence de mercure impose cependant un recyclage spécifique.

4) Laser

Les lasers les plus couramment utilisés dans l'enseignement sont du type hélium-néon (He-Ne), de puissance environ 1mW. Leur lumière rouge est très monochromatique, de longueur d'onde 632,8 nm. Vous disposez aussi de deux autres types de laser émettant dans le vert et dans le bleu.

Ne mettez jamais l'œil directement sur le trajet du faisceau : malgré leur faible puissance une exposition prolongée peut être dangereuse pour la rétine. Attention également aux réflexions malencontreuses, sur des verres de lunette par exemple.

Au contraire des sources classiques le laser est très directif, et a une très grande cohérence spatiale et temporelle (capacité à produire des interférences).

III) L'alignement en optique

Dès qu'un montage d'optique possède deux éléments ou plus il est nécessaire de les aligner.

1) Le type de montage d'optique

On distingue deux types de montages :

- Les montages sur pieds libres sont les plus grossiers. Ils permettent une expérimentation rapide mais sont inadaptés à la plupart des mesures quantitatives.
- Les montages sur banc d'optique sont précis et contraignent les degrés de libertés mécaniques (typiquement, on ne peut déplacer les optiques que le long de l'axe, mais il existe des pieds permettant aussi une translation perpendiculairement à l'axe). Ces contraintes sont handicapantes pour le débutant mais sont un énorme avantage pour la rapidité de l'alignement lorsqu'on a appris à les exploiter.

Dans ce TP nous nous concentrerons sur les montage sur pied libre. Les montages sur banc d'optique seront abordés lors du TP portant sur la diffraction et l'interférence, où ils seront particulièrement utiles.

2) Le type de source

Pour l'alignement d'un montage d'optique, on classe les sources en deux catégories :

- Les sources directives (les lasers)
- Les sources non-directives (toutes les autres)

De manière générale, les sources directives sont faciles à aligner, si bien que même lorsqu'on réalise un montage d'optique avec une source non-directive, on peut être amené à utiliser initialement un laser lors du montage pour faciliter son alignement. Pour cette raison, nous commencerons par étudier l'alignement d'optique avec un laser.

3) Avant de commencer

Avant de commencer un montage, il faut s'assurer que l'on dispose de tout le matériel que l'on va utiliser. Ce conseil est moins naïf qu'il n'en a l'air : par exemple, il faut s'assurer que l'on dispose de pieds qui permettent aux optiques de se situer à la même hauteur h que l'on choisit.

On détermine ensuite les dimensions approximatives prises par le montage et on choisit judicieusement la position et la direction des différents éléments. Il est par exemple souhaitable d'éviter de placer une lampe quartz-iode imposante au milieu de la table si elle doit dissimuler le tableau sur lequel est réalisé le cours. Autre conseil : Il faut positionner les éléments d'optique sur une même table, pas sur deux tables mises bout à bout.

Avant toute chose, on positionne un diaphragme à la hauteur h et on réalise l'alignement du laser sur ce diaphragme (méthode ci-dessous). L'objectif est d'arriver à ce que l'ouverture du laser soit à la hauteur h et que *le faisceau laser soit à la hauteur h en tout point du faisceau*, c'est à dire parallèle à la table. On ajuste ensuite la hauteur des différents éléments d'optique pour que le laser passe par leur centre optique. L'objectif de ce travail préliminaire est de permettre de déplacer les optiques sur la table sans avoir à se soucier désormais de leur réglage en hauteur.

Une fois le laser en place, on ne le déplace plus, et on met en place les autres éléments du montage d'optique. Lorsque leurs distances relatives sont choisies, il reste deux degrés de liberté à fixer :

- la distance entre le spot laser et le centre optique de l'optique considérée (qui doit être nulle)
- l'angle entre le faisceau incident et la normale de l'optique considérée (qui doit aussi être nul).

Ces réglages ne posent pas de problème majeur pour les diaphragmes et les écrans, mais sont plus difficiles pour les lentilles minces, pour lesquelles nous détaillons une procédure ci-dessous.

4) L'alignement du laser

L'alignement du laser est le prototype de tout protocole d'alignement. Deux objectifs :

- l'ouverture du laser doit être à la hauteur du centre du diaphragme
- le faisceau laser doit être parallèle à la table

Nous constatons que pour pouvoir satisfaire ces deux contraintes, nous devons disposer de deux degrés de liberté : la hauteur du laser, réglable avec le pied, et l'inclinaison, réglable par une vis qui se trouve sous le laser.

Nous suivrons une procédure récursive dont l'idée est la suivante :

- placer le diaphragme proche de l'ouverture du laser et régler la hauteur du laser ;
- éloigner le diaphragme à 1 m ou plus et régler l'inclinaison du laser.

Les deux degrés de libertés ayant une influence sur la position du faisceau pour les deux positions du diaphragme, ces deux étapes nous ont rapproché de l'alignement mais ne garantissent pas que nous

y soyons parvenu. On réitère donc ces deux étapes jusqu'à ce que la précision dans la manœuvre des degrés de liberté ou l'observation ne permette plus d'amélioration. En règle générale, 2 ou 3 itérations suffisent amplement.

5) L'alignement d'une lentille mince

Les objectifs d'alignement d'une lentille mince sont les suivants :

- le faisceau doit passer par le centre optique de la lentille (ou être centré dessus dans le cas d'une source étendue) ;
- le faisceau doit arriver orthogonalement à la lentille.

Ces objectifs correspondent à l'application des conditions de Gauss (ou conditions paraxiales).

Lorsque le faisceau passe par le centre optique d'une lentille il n'est pas dévié. L'alignement pour le réglage en hauteur se fait donc en plaçant le diaphragme de référence à distance puis en plaçant la lentille près du laser. Lorsque la lentille est à niveau, le faisceau laser en sortant doit atteindre le centre du diaphragme.

On procède de même pour l'alignement latéral.

Enfin, pour l'alignement angulaire, on utilise la réflexion du laser sur la surface de la lentille : si la lentille est correctement placée, cette réflexion doit coïncider avec l'ouverture du laser. Lorsque la lentille est épaisse, il peut être nécessaire de réitérer ces deux étapes d'alignement pour atteindre le réglage optimal.

IV) Lois fondamentales de l'optique

Consultez le Houard, chapitre 2.1.

1) Dispositif réfraction-réflexion

Le dispositif de mise en évidence des lois de la réfraction et de la réflexion est constitué d'une lentille hémicylindrique en plexiglas montée sur un rapporteur. L'idée de l'expérience consiste à envoyer un faisceau laser à l'interface air-plexiglas et d'observer la direction des faisceaux réfractés et réfléchis. Si le principe de l'expérience est simple, sa réalisation est beaucoup plus délicate.

D'abord pour une raison pratique : en utilisant un laser He-Ne standard, il est très difficile de voir le trajet effectué par celui-ci car le faisceau n'a presque aucune chance d'être diffusé par la surface du rapporteur en arrivant en incidence rasante. Pour surmonter cette difficulté, il convient d'utiliser un laser mis en forme ("laser *ray box*") ou bien, ce qui revient au même, d'accoler une lentille cylindrique à l'ouverture du laser pour provoquer l'étalement du faisceau.

Ensuite, la lentille hémicylindrique (qui n'est pas une lentille mince) doit être centrée. Son centre optique est le centre du disque dans lequel elle s'inscrit. On commence par aligner la source laser comme décrit précédemment. On recherche ensuite l'angle d'incidence normale en orientant l'interface air-plexiglas de manière à renvoyer le faisceau sur l'ouverture du laser. Enfin, on modifie la hauteur de la lentille jusqu'à ce que la déviation angulaire produite par celle-ci sur le rayon transmis soit nulle (pour déterminer qu'on est dans cette configuration, utiliser un diaphragme comme pour une lentille mince).

Expérience : Mesurez l'indice optique du plexiglas du dispositif en utilisant la loi de Descartes. Analysez soigneusement la précision de votre expérience (voir par exemple, le Journeaux, section 14.1, p. 288).

2) Dispositif multi-faisceaux

Ce dispositif vous permet de mettre en évidence de manière simple et très visible les lois de l'optique géométrique sur la propagation des faisceaux lumineux (réflexion, réfraction) ainsi que l'effet des optiques simples. Il est composé d'un tableau métallique sur lequel vous pouvez fixer une source lumineuse (son support est aimanté), ainsi que différents miroirs et lentilles (les tiges pour les bloquer se placent dans le rail en haut du tableau). Un réglage sur le boîtier de la lampe vous permet de choisir la divergence du faisceau lumineux ; vous pouvez aussi sélectionner le nombre de faisceaux lumineux avec un système de caches interchangeables. Consulter la notice et les ouvrages de lycée pour trouver des idées d'expériences sur les lois de la réflexion et de la réfraction.

V) Faire une image

L'obtention d'une image agrandie nette et lumineuse requiert un peu d'expérience, en particulier pour reconnaître les types de défauts (aberrations) et la manière d'y remédier. Nous commencerons donc par une description succincte de ces défauts que vous pourrez observer dans le Houard – chapitre 6.

1) Reconnaître les différentes aberrations optiques

Précisons que les aberrations optiques ne sont pas aux programmes de lycée.

a) L'aberration chromatique

C'est la plus facile à reconnaître, elle est toujours présente et est d'autant plus prononcée que le montage est mal aligné et possède des lentille de courte focale. On peut l'observer sur la figure 6.2 du Houard. Elle provient de la variation de l'indice optique du verre de la lentille avec la longueur d'onde.

b) Les aberrations géométriques

Il en existe un grand nombre et elles se produisent même avec un éclairage monochromatique. De manière générale elles disparaissent lorsqu'on se rapproche des conditions paraxiales. Trois d'entre elles sont particulièrement importantes :

- L'aberration sphérique : pour les rayons loin de l'axe optique, la distance focale effective de la lentille change. L'image d'un point prend alors la forme d'un anneau dont la forme dépend de la position de l'écran. Voir Houard, fig. 6.10.
- L'aberration de Coma : Elle se produit lorsque l'objet est en dehors de l'axe optique, par exemple parce qu'une lentille n'est pas orthogonale au faisceau incident. L'image d'un point se transforme alors en une tache de la forme d'une queue de comète, d'où le nom (qui lui même vient du grec signifiant "chevelure").

- Les distorsions en barillet ou en coussinet, souvent observées en photographie (Houard, section 6.2.5). Elles se produisent lorsqu'un diaphragme est introduit sur le chemin optique à distance de la lentille. L'image alors formée fait intervenir des rayons lumineux passant loin de l'axe optique. Si le diaphragme est accolé à la lentille, cette distorsion disparaît.

(Tiré du Sextant, section I.4.1, p. 16)

Expérience : Faire converger la lumière d'une QI sur un trou de petit diamètre, à l'aide d'un condenseur de courte focale. Observez les irisations sur le trou et sur un écran placé derrière lui, en éloignant et rapprochant le diaphragme par rapport à la lampe. Ces irisations sont dues aux *aberrations chromatiques* du condenseur : l'indice du verre dépend de la longueur d'onde. Déduisez de vos observations s'il croît ou s'il décroît avec elle. Dans les lentilles de meilleure qualité ces aberrations sont partiellement éliminées par l'association de deux types de verre (les flint et les crown) dont les indices varient différemment avec la longueur d'onde (voir Bottineau, chapitre I, p 6). On appelle ces systèmes des *doublets achromatiques*.

2) Les règles de base

Pour obtenir une image réelle avec une lentille convergente de focale f' ,

- la distance objet-image doit être supérieure à $4f'$;
- l'objet doit être distant d'au moins f' de la lentille.

Luminosité et aberrations

- Pour obtenir une image lumineuse, il faut utiliser un condenseur (grande lentille convergente devant la source) afin de concentrer la lumière sur la surface à éclairer.
- Pour limiter les aberrations géométriques, il faut que le système condenseur-lentille soit réglé de manière à ce que la majeure partie de la lumière passe par le centre optique de la lentille. En pratique, on place la source et son condenseur, puis la lentille au point de convergence de la source, et enfin l'objet entre le condenseur et la lentille.
- Pour limiter les aberrations sphériques, on utilise toujours la règle des **4P : "plus plat, plus près"** : Lorsqu'une lentille mince possède une face plus plate que l'autre, celle-ci doit être placée du côté de celui des deux points conjugués (l'objet ou l'image) qui s'en trouve le plus proche.
- Pour limiter au maximum les aberrations géométriques, on peut utiliser un diaphragme accolé à la lentille, de préférence côté source, afin d'arrêter les rayons hors des conditions paraxiales. Notez que cette amélioration est obtenue au détriment de la luminosité.

3) L'image d'un objet étendu en transmission (ou réflexion)

(Tiré du Sextant, section I.4.2, p. 18)

Une première situation concerne la projection d'un objet étendu transparent, vous pouvez notamment utiliser un quadrillage ou un cache en forme de F.

Expérience : Éclairez l'objet avec une lampe QI sans condenseur, et formez-en l'image agrandie sur un écran à l'aide d'une lentille de courte focale. Cette image est de mauvaise qualité : le champ de l'objet éclairé est petit, et la lentille de projection est largement couverte par les faisceaux ; elle travaille donc hors des conditions de Gauss. Rajoutez un condenseur à la lampe. Vous pouvez alors éclairer une plus grande partie de l'objet, et placer la lentille de projection au voisinage du point

de convergence du condenseur, de manière à vous rapprocher des conditions de Gauss. Essayez des lentilles de différentes focales. Comment varie la taille de l'image projetée avec la focale de la lentille de projection ?

4) L'image d'un objet diffusant

(Tiré du Sextant, section I.4.3, p. 21)

Si l'objet étendu est diffusant (écran dépoli, papier calque), le réglage de la convergence du condenseur n'est plus nécessaire : les points de l'objet se comportent comme des sources secondaires, ils émettent de la lumière dans toutes les directions. Il est donc souvent avantageux de placer une plaque de verre dépoli accolé à l'objet (côté source) ou bien de coller un morceau de papier calque sur l'objet. Dans ces conditions, l'objet et la source lumineuse sont confondus et il est donc possible de s'affranchir de l'image parasite du filament de la lampe quartz-iode. Pour limiter les aberrations géométriques liées à cette configuration, on utilise un diaphragme accolé à la lentille afin de ne garder que les rayons paraxiaux.

VI) Mesures de distances focales

1) Caractère convergent/divergent d'une lentille

On peut déterminer facilement si une lentille est convergente ou divergente en observant un objet proche à travers elle : une lentille convergente en donne une image agrandie (c'est le principe de la loupe), au contraire l'objet semble plus petit à travers une lentille divergente. Faire un schéma expliquant ce phénomène.

On peut déterminer grossièrement la distance focale d'une lentille convergente en mesurant la distance entre celle-ci et le sol lorsque l'on tente de faire l'image d'une source lointaine (soleil, tube fluorescent, etc.). Expliquer.

Plusieurs méthodes permettent de mesurer précisément la distance focale d'une lentille convergente (consulter le Sextant pour le cas des divergentes).

2) Autocollimation

(voir Sextant section I.5.1, p. 22)

Expérience : Placez un diaphragme au voisinage du point de convergence du condenseur, puis un miroir accolé à une lentille convergente. Déplacez l'ensemble lentille-miroir de manière à avoir une image réfléchi du diaphragme dans le même plan. Que vaut alors la distance entre la lentille et le diaphragme ? Enlevez le miroir et vérifiez que si le diaphragme est suffisamment petit le faisceau émergent de la lentille est parallèle. Agrandir le diaphragme. Le faisceau est-il encore parallèle ?

3) Utilisation des relations de conjugaison

- **Expérience :** Déterminez la focale d'une lentille convergente en faisant l'image d'un objet sur un écran et en mesurant les distances objet-lentille et lentille-écran. On analysera soigneusement les données et l'incertitude sur la distance focale obtenue.

On réalisera une série de mesures pour différentes positions de l'objet, de manière à modéliser le comportement de la lentille et de retrouver expérimentalement les relations de conjugaison. On présentera cette expérience, ses résultats et ses incertitudes aux encadrants de TP.

4) Méthode de Silberman

(voir Sextant section I.5.2, p. 23 et Journeaux, section 17.1, p. 340)

Expérience : Prendre pour objet le cache en forme de F, et régler la position de la lentille et de l'écran de manière à minimiser la distance entre l'objet et l'écran (on rappelle que cette distance minimale est $4f'$). En déduire la distance focale de la lentille. Que vaut alors le grandissement ?

VII) Modélisation de l'œil

L'œil est constitué, de manière très schématique, d'une lentille convergente (le cristallin) qui fait de l'objet observé une image sur la rétine. La distance entre le cristallin et la rétine est fixe (environ 17mm), et correspond à la distance focale de l'œil au repos, qui met alors au point sur l'infini. Pour observer des objets plus proches un effort musculaire est nécessaire, qui modifie la distance focale du cristallin. Celle-ci augmente-t-elle ou diminue-t-elle ? On dit que l'œil *accommode*, mais ceci n'est possible que pour des objets situés entre l'infini (*punctum remotum*) et une distance de l'ordre de 25 cm chez la plupart des personnes (*punctum proximum*). Consultez le Houard, chapitre 4.2 pour plus de détails, en particulier sur les imperfections possibles de la vision (myopie, presbytie, etc.)

On peut modéliser à une échelle agrandie l'œil par une lentille convergente et un petit écran à distance fixe de la lentille (bloqué à l'aide d'une tige et d'une noix). Ceci permet d'illustrer en particulier le phénomène d'accommodation. Positionner l'écran dans le plan focal de la lentille, de manière à ce qu'un objet très éloigné soit projeté nettement sur l'écran. Rapprocher l'objet, son image sur l'écran devient floue ; sans modifier la distance "cristallin-rétine" *i.e.* lentille-écran, on peut retrouver la netteté en changeant de lentille. Vous pouvez consulter les livres de lycée ou ceux de travaux pratiques pour trouver d'autres idées de manipulation.

1) Maquette de l'œil

(voir Sextant section I.6, p. 25 ainsi que la notice de la maquette)

Vous disposez aussi d'une maquette dédiée à la modélisation de l'œil. Elle se compose principalement d'un écran en plastique modélisant la rétine, et d'une lentille de distance focale variable correspondant au cristallin. Elle comprend aussi un objet transparent (à éclairer avec une lampe) en forme de Y, et deux lentilles (une convergente, marquée +2,0 D, et une divergente -2,0 D) à poser éventuellement sur le support devant le cristallin pour modéliser la correction des défauts de l'œil. Les points sur l'écran symbolisent la tache jaune (*fovea*) et la zone aveugle de l'œil.

Réglages :

- La distance entre le cristallin et la rétine se règle avec le cerceau de plastique. Les trous sur le côté désignent trois positions : la position centrale correspond à un œil normal, les deux autres sont celles de l'œil avec des défauts (myopie et hypermétropie).
- La distance focale du cristallin est modifiable en injectant ou retirant de l'eau dans la lentille flexible, à l'aide de la seringue.

Si la lentille et la seringue ne contiennent plus d'eau : retirer le cristallin de la maquette, débrancher la seringue et le tube plastique, remplir la seringue d'eau distillée (purger pour éviter d'injecter de l'air), aspirer à la bouche l'air du cristallin puis pincer son embout, et finalement connecter la seringue et l'embout.

En cas d'utilisation avec une lampe de forte puissance, interposer un filtre antithermique pour ne pas faire chauffer les éléments en plastique.

Expériences :

- Accommodation de l'œil normal. Régler la distance cristallin-rétine dans sa position médiane. Éclairer un objet transparent placé à environ un mètre de la maquette de l'œil. Rendre nette l'image sur la rétine en réglant la focale du cristallin à l'aide de la seringue. Modifier la distance entre l'objet et l'œil : constater que la mise au point doit être effectuée de nouveau. Comment a varié la forme de la lentille, et sa distance focale, si vous avez rapproché l'objet ? Mettre en évidence l'existence d'un *punctum proximum*, *i.e.* le point le plus proche que vous puissiez projeter de manière nette sur la rétine. Quelle est cette distance chez l'homme ?
- Correction de la myopie et de l'hypermétropie. Faire la mise au point avec l'œil normal. Modifier la distance entre le cristallin et la rétine, sur une des deux positions marquées. L'image n'est plus nette ; en rajoutant une des deux lentilles sur le support en plastique devant le cristallin, ce qui modélise l'utilisation de lunettes de vue, montrer la correction. Quel type de lentille corrige la myopie ? L'hypermétropie ?
- Correction de la presbytie. Déplacement du *punctum proximum*.

2) Représentation en coupe

La maquette de l'œil ne permet pas d'illustrer le trajet des rayons lumineux dans le globe oculaire. Utilisez le dispositif multi-faisceau pour réaliser une représentation en coupe et illustrer les différents défauts de l'œil ainsi que l'effet des verres correcteurs.

VIII) L'appareil photo

Le fonctionnement de l'appareil photo est semblable à celui de l'œil dans son principe : le capteur optique (CCD, pellicule) est l'équivalent de la rétine ; ils possèdent la même fonction d'acquisition trichromique. L'objectif (de focale fixe) est l'équivalent du cristallin ; ils permettent tous deux la mise au point de l'image. Le diaphragme, quant à lui, est l'équivalent de l'iris. L'ouverture du diaphragme (appelé simplement l'ouverture) possède deux rôles : choisir la quantité de lumière atteignant le capteur (à noter que pour l'appareil photo il est aussi possible de changer le temps d'exposition) et choisir la profondeur de champ (voir Sextant section I.7.3, p. 35).

1) Définition de la profondeur de champ

C'est la distance qui sépare deux points extrêmes de l'axe optique dont les images sont vues avec une «netteté suffisante» sur le capteur. C'est donc une notion assez qualitative.

En pratique, en photographie, on considère que la limite de netteté est atteinte lorsque l'image d'un point sur le capteur est une tache, appelée cercle de confusion, dont le diamètre est de l'ordre du 1/1000 de la taille de l'ensemble de l'image. Ce choix est un peu arbitraire, il est justifié par les faits

suivants : la limite de résolution de l'œil est de quelques minutes d'angle (0,001 rad) et les photos sont censées être observées, après agrandissement, à une distance de l'ordre de la taille de la photo.

2) Influence de l'ouverture

On se limite au cas usuel où les aberrations de l'objectif et la diffraction jouent un rôle négligeable et où l'objectif peut être considéré comme une lentille simple accolée à un diaphragme. La profondeur de champ résulte alors d'un simple effet géométrique qui est illustré sur le schéma suivant.

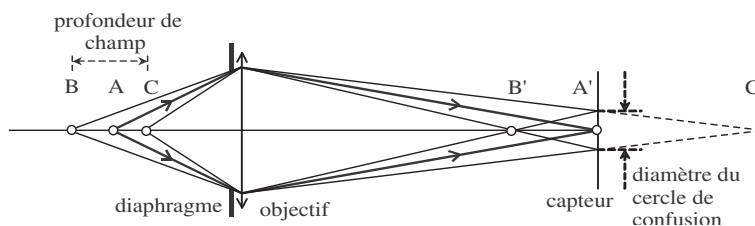


FIG. 1 – Définition de la profondeur de champ et du cercle de confusion

La mise au point étant faite sur A, son image A' sur le capteur est ponctuelle. L'image sur le capteur d'un point de l'axe différent de A est une tache et les points pour lesquels cette tache a un diamètre inférieur à celui du cercle de confusion sont les points du segment BC. La profondeur de champ est justement la distance BC. Il est facile de se rendre compte à l'aide du schéma qu'elle est d'autant plus grande que le diaphragme est petit.

On propose ici une expérience qualitative montrant que la profondeur de champ augmente avec le nombre d'ouverture¹. Réaliser le montage décrit ci-dessous. Attention, certains objectifs ont un picot, sur lequel il faut appuyer pour pouvoir jouer sur l'ouverture. Par ailleurs, si l'objectif ne possède pas de monture adaptée, vous pouvez utiliser une pince pour verrerie de chimie.

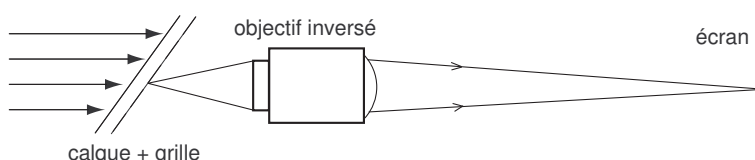


FIG. 2 – Protocole de mise en évidence de la profondeur de champ

Expérience : L'objet est une grille contrastée de pas environ 1 mm accolée à un calque. L'incliner fortement autour d'un axe parallèle aux traits et former l'image nette de son centre, à travers l'objectif, sur l'écran éloigné. Pour minimiser les aberrations, utiliser l'objectif dans le sens inverse du sens usuel car contrairement au cas de la photographie, l'objet est ici plus proche de l'objectif que l'image. L'usage du calque est obligatoire car chaque point de la grille doit éclairer tout l'objectif pour que l'effet du diaphragme soit celui qui est attendu.

¹Ce nombre est le rapport entre la focale et le diamètre de la pupille d'entrée. Il augmente donc quand on ferme le diaphragme. Cette expérience illustre la profondeur de champ en microscopie : l'objet est petit et proche, l'image se forme à grande distance. C'est pour une raison technique que l'on remplace le microscope par un objectif d'appareil photo : les objectifs de microscope n'ont pas de diaphragme.

Vérifier que le nombre de traits vus nets sur l'écran est une fonction croissante du nombre d'ouverture. Comment doit-on régler l'ouverture si l'on cherche à former un portrait net avec un second plan flou ?

IX) Le microscope

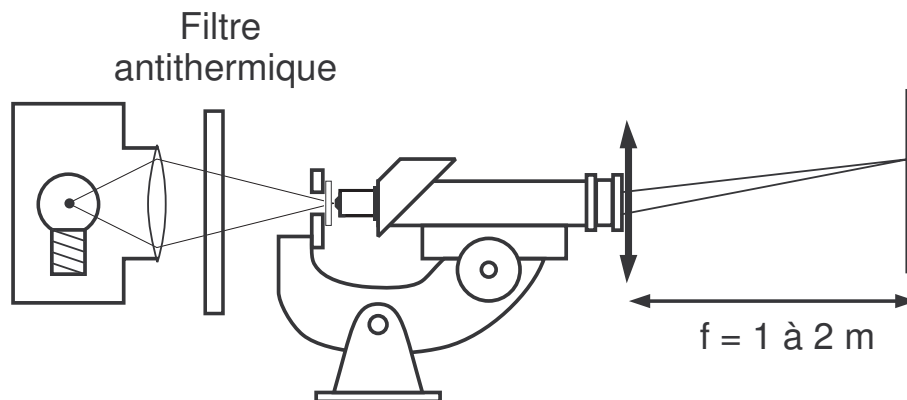
Le microscope a pour but de réaliser à partir d'un objet proche une image agrandie à l'infini (pour que l'œil n'accomode pas) dont les détails sont mieux perceptibles. Il est constitué d'un tube reliant deux cylindres, nommés objectif et oculaire et modélisés par des lentilles convergentes : le premier 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 grossissement 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 serait 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 $G_{c,mic} = G_{c,oc} |\gamma_{ob}|$

Expérience possible : Mesure du grossissement commercial d'un microscope (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 de cette lentille. 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 $G_{c,mic} = G_{c,oc} |\gamma_{ob}|$.

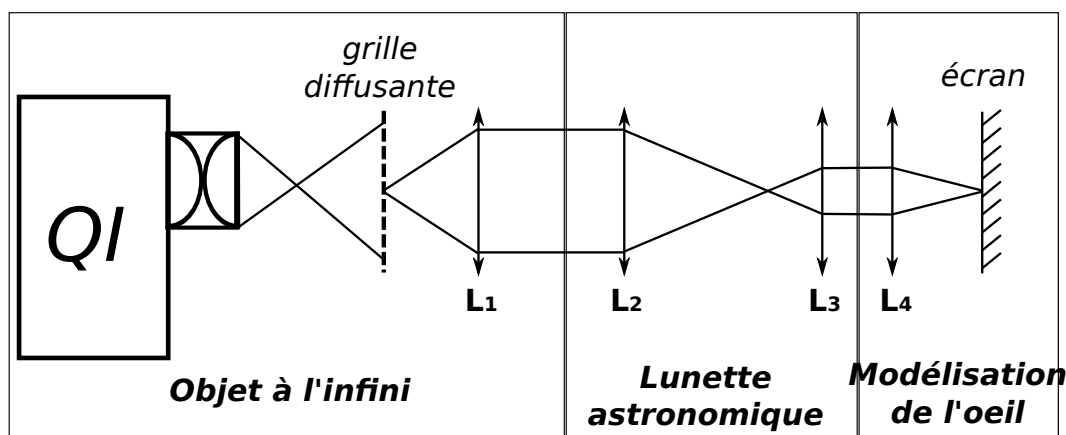


X) La lunette astronomique

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.



Aux endroits où les faisceaux sont envoyés à l'infini, il est conseillé de rapprocher autant que possible les systèmes optiques, pour éviter une perte de luminosité et la lumière parasite.

2) Grossissement

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 *ponctum proximum*). On peut 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 l'on choisit un objectif de courte focale ! Mesurer expérimentalement le grossissement, et vérifier la formule ci-dessus.