



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

PHYSIQUE POUR LES CHIMISTES - OPTIQUE I

2022-2023

Bibliographie :

- Sextant (bible)
- Duffait (bible bis)
- Houard (pour de jolies images)
- Sanz PCSI (pour l'appareil photo)

Table des matières

1	Préambule	3
2	Sources lumineuses	3
3	Différents types de sources (à lire)	3
3.1	La lampe à incandescence	3
3.2	La LED	4
3.3	La lampe spectrale	4
3.4	Le LASER	4
4	Dispersion de la lumière (important)	5
4.1	Dispersion par un prisme	5
4.2	La synthèse des couleurs	5
5	Lentilles minces	5
6	Relation de conjugaison (important)	6
7	Mesurer une distance focale	6
7.1	Par autocollimation (important)	6
7.2	Méthode de Bessel (leçons niveau post-bac uniquement)	7
7.3	Méthode de Silberman (facultatif)	7
7.4	Petites focales et lentilles divergentes	8
8	Instruments d'optique	8
9	Rappels/Definitions	8
10	La lunette astronomique (important)	9
10.1	Principe	9
10.2	Mesure du grossissement	9
10.3	Diaphragmes et pupilles	10
11	L'appareil photo (important)	11
11.1	Principe	11
11.2	Profondeur de champ et ouverture	11
12	Le microscope (en seconde lecture)	11
12.1	Principe	11
12.2	Mesure du grossissement	12
13	Appendice (à lire)	13
14	Les aberrations optiques	13
14.1	Les aberrations géométriques	13
14.2	Les aberrations chromatiques	14
15	Obtenir une image de bonne qualité (important)	15
15.1	Choisir une lentille de projection	15
15.2	Aligner le montage	16
15.3	Optimiser la luminosité	16
15.4	Conclusion : préparer un montage optique	16

1 Préambule

- Ce TP porte sur la réalisation des montages d'optique élémentaires ainsi que sur la mise en évidence des lois fondamentales de l'optique géométrique. Il est indispensable pour aborder de nombreuses leçons au niveau lycée (leçons numéros 3. "Aspects ondulatoires en optique", 5. "Phénomènes de polarisation optique", 9. "Image, couleur, vision", 10. "Modèles de l'optique géométrique", 18. "Spectres").
- Pour une grande partie des manipulations décrites plus bas, vous pourrez vous baser sur le Sextant. Le Houard est aussi une très bonne référence, avec de nombreuses images illustratives notamment.
- L'optique est une discipline expérimentale avant tout, et à ce titre le jury attend d'un.e candidat.e qu'un soin tout particulier soit accordé à la qualité du montage : seront valorisées les images nettes, lumineuses, de taille suffisante et sans distorsion. C'est pourquoi avant même d'aborder le principe physique et l'aspect quantitatif d'un montage d'optique, il est primordial de veiller à aligner correctement les différents éléments et de se placer dans les meilleures conditions expérimentales possibles afin de former des images de qualité. Dans ce but, vous trouverez en appendice de ce sujet un tutoriel à la réalisation d'un montage d'optique de qualité. Bien qu'il ne contienne aucune manipulation quantitative à proprement parler, il est indispensable d'en maîtriser les étapes-clés.

2 Sources lumineuses

Ce paragraphe présente d'abord les différents types de sources et leur principe d'émission d'un point de vue plutôt théorique, puis propose de caractériser expérimentalement le spectre d'une source donnée, notamment de décomposer la lumière blanche et de réaliser une synthèse de couleurs.

3 Différents types de sources (à lire)

Les différentes sources ci-dessous reposent sur des procédés d'émission différents et sont classées suivant leur spectre : du plus large au plus étroit. Pour plus de détails sur leurs principes de fonctionnement respectifs, on pourra consulter le Sextant, chapitre I.1.

3.1 La lampe à incandescence

La lampe à incandescence (ou lampe thermique) fournit une lumière "blanche", c'est-à-dire dont le spectre s'étend sur tout le domaine visible, voire au-delà dans l'IR. A l'intérieur d'une ampoule protectrice en quartz, un filament de tungstène est chauffé suffisamment pour que son rayonnement thermique soit dans le visible. L'ampoule contient un gaz halogène (souvent de l'iode, d'où le nom de Quartz-Iode abrégé Q.I.) qui permet la régénération du filament et prolonge ainsi la durée de vie de l'ampoule. Les lampes QI à votre disposition peuvent s'équiper d'un condenseur, c'est-à-dire une lentille permettant de focaliser le faisceau ou bien de le collimater en réglant la distance condenseur-filament.

Attention : L'utilisation d'une lampe QI nécessite systématiquement de la faire suivre d'un filtre anticalorique (AC) ! Ces lampes chauffent énormément (pour s'en rendre compte, il suffit de condenser la lumière sur sa main). L'oubli du filtre peut conduire à détériorer les différentes optiques utilisées (achromats, miroirs du Michelson, polariseurs, etc.).

Attention : Ne pas confondre avec les nouvelles lampes à LED (décrites au paragraphe suivant) montées dans les mêmes carter que les QI.



3.2 La LED

Une LED (Light-Emitting Diode) est un composant opto-électronique à l'intérieur duquel la recombinaison d'un électron et d'un trou au sein d'un semi-conducteur provoque l'émission d'un photon. La longueur d'onde émise est donnée par l'énergie de gap, qui dépend du type de semi-conducteur. Les recombinaisons se faisant à des énergies thermiquement réparties autour de l'énergie de gap, on obtient une raie spectrale centrée autour de la longueur d'onde de gap, mais avec une largeur finie (entre 10 et 50 nm selon les LED). Selon le type de semi-conducteur, l'énergie de gap varie et il existe des LED rouges/vertes/bleues. Quant aux LED blanches, il en existe deux types : elles peuvent être composées de plusieurs LED de couleurs (rouge/vert/bleu) dont les spectres se recouvrent pour donner un spectre 'plat' dans la gamme du visible. Il existe également des LED blanches qui sont composées d'une LED bleue et d'un matériau phosphorescent qui absorbe une partie du bleu pour réémettre dans le jaune et le rouge. Les LED blanches présentent l'avantage de dégager moins de chaleur que les lampes à incandescence tout en conservant un flux lumineux important et suffisant pour les expériences proposées. Elles sont à privilégier dans la majorité des cas.

Dans la suite de ce TP, vous aurez besoin de sources de lumière blanche. Dans la collection vous sont proposées des lampes LED, mais il faudra faire attention au concours si l'on vous fait utiliser des lampes QI de ne pas oublier le filtre anti-calorique.

3.3 La lampe spectrale

La lampe spectrale (ou lampe à décharge) contient une vapeur métallique (sodium ou mercure le plus souvent) soumise à des décharges électriques qui provoquent l'ionisation de certains atomes de la vapeur. La désexcitation qui s'en suit donne lieu à l'émission de lumière. Le spectre d'émission d'une lampe à décharge est caractéristique de l'espèce atomique qui la compose, il s'agit donc d'un spectre de raies. On distingue les lampes à vapeur basse pression des lampes à vapeur haute pression, ces dernières - plus lumineuses - émettant un spectre élargi par effet Doppler (~ 1 nm). 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. Elles peuvent également s'équiper d'un condenseur pour focaliser ou collimater le faisceau.

On parle de lampes fluocompactes pour les lampes à vapeur de mercure recouvertes d'un matériau fluorescent (comportant du béryllium) qui redistribue la lumière UV sur un ensemble de bandes spectrales assez larges (de même qu'une LED). Ces lampes remplacent peu à peu les lampes à filament car elles consomment entre 1/5 et 1/3 de leur puissance, et ont une durée de vie de 8 à 15 fois plus longue. La présence de mercure et de béryllium impose cependant un recyclage spécifique.

Remarque : Les lampes spectrales sont très largement utilisées pour l'éclairage public : au mercure pour les espaces industriels (usines, hangars, etc.), au sodium pour l'éclairage de rue.

3.4 Le LASER

Le LASER (light amplification by stimulated emission of radiation) est la source de lumière la plus monochromatique qui soit. Il consiste en un milieu amplificateur placé au sein d'une cavité optique qui agit comme un filtre très sélectif et permet d'obtenir une lumière monodirectionnelle, très puissante et d'une pureté spectrale inférieure au nm. Les lasers les plus couramment utilisés dans l'enseignement sont du type hélium-néon (He-Ne), de puissance environ 1 mW. 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.

Attention : Ne mettez jamais l'œil directement sur le trajet du faisceau : même à relativement faible puissance, une exposition prolongée est dangereuse pour la rétine. Attention également aux réflexions malencontreuses (verres de lunette, montre, bijoux, etc.). Une mauvaise manipulation lors de l'oral reste du plus mauvais effet pour le jury.



4 Dispersion de la lumière (important)

Ce paragraphe aborde la décomposition spectrale de la lumière de manière qualitative, c'est-à-dire de manière avant tout visuelle grâce à un prisme. Il est possible d'étudier plus quantitativement le contenu spectral d'une source, notamment avec un réseau. C'est l'objet des techniques de spectroscopie qui vous seront présentées en série 2.

4.1 Dispersion par un prisme

Un prisme a pour fonction de disperser la lumière, c'est-à-dire d'en séparer géométriquement les différentes composantes spectrales. Son principe repose sur le fait que l'indice de réfraction d'un matériau – le verre en l'occurrence – dépend de la longueur d'onde de la lumière qui le traverse. La collection dispose de deux types de prisme : le prisme droit et le prisme à vision directe (PVD). Ce dernier a l'avantage de recentrer la lumière dispersée le long de l'axe du faisceau incident, grâce à un système de trois prismes accolés possédant des indices différents de manière à compenser la déviation induite par le prisme le plus réfringent. Aussi, pour mesurer des angles de déviation, il convient d'utiliser un prisme droit, mais pour illustrer la dispersion de manière qualitative, un PVD convient mieux pour des raisons d'encombrement.

Pour une longueur d'onde donnée, l'indice de réfraction d'un matériau est donné par la loi phénoménologique de Cauchy :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (1)$$

où A et B sont des constantes positives caractéristiques du matériau considéré. Ainsi, si l'on fait traverser les faces en regard d'un prisme droit par un faisceau de lumière blanche, chaque longueur d'onde est déviée selon les lois de Descartes au niveau de chaque dioptré air/verre, avec un angle qui dépend de l'indice correspondant.

Question : D'après vous, quelle longueur d'onde du spectre visible serait la moins déviée par un prisme droit d'après la formule de Cauchy ?

Expérience qualitative : Focaliser le faisceau d'une lampe (QI suivie d'un filtre anticalorique)

Remarque : Vous verrez dans le TP spectroscopie qu'un réseau optique disperse les longueurs d'onde dans l'ordre inverse de celui du prisme.

4.2 La synthèse des couleurs

Expériences qualitatives :

- * Placer une seconde lentille convergente de courte focale après le PVD de manière à faire converger les couleurs.
- * Mettre en évidence la complémentarité des couleurs en bloquant, entre le prisme et la seconde lentille, une partie du spectre.
- * A l'aide de filtres colorés, réaliser quelques essais pour observer la synthèse soustractive.
- * Observer à l'aide d'une loupe (ou d'une lentille convergente de courte focale) votre écran d'observation.
- * Observer à l'aide d'une loupe ou mieux un microscope une photographie couleur imprimée. Pourquoi ?
- * Pour mettre en évidence le spectre d'absorption des solutions colorées, ôter la seconde lentille.

5 Lentilles minces

Une lentille mince est une lentille dont l'épaisseur est faible devant les rayons de courbure de ses faces, ainsi que devant la différence de ces rayons. Elle sert à faire converger ou diverger les rayons lumineux émis par un objet afin d'en projeter l'image sur un écran. Noter toutefois qu'il est possible de faire l'image d'un objet sur un écran avec un diaphragme ponctuel : par définition, l'image d'un objet est nette dès lors que les rayons issus d'un unique point de l'objet s'intersectent en un unique point de l'écran. La présence d'un diaphragme réduisant le nombre de rayons

1. Le centre d'examen dispose également de l'appareil adéquat pour la synthèse additive.



atteignant l'écran à un seul par point de l'objet, on obtient une image nette quelle que soit la position de l'écran. La lentille est donc une version améliorée du diaphragme en ce qu'elle permet, pour chaque point de l'objet, de faire converger plusieurs rayons en un même point de l'écran et donc d'augmenter la luminosité de l'image tout en préservant sa netteté.

- Faire un schéma de l'image virtuelle $A'B'$ donnée d'un objet AB par une lentille convergente (fonctionnement "loupe").
- Faire un schéma de l'image virtuelle $A'B'$ donnée d'un objet AB par une lentille divergente.
- En déduire une méthode simple et rapide pour déterminer la nature convergente ou divergente d'une lentille inconnue.

Expériences préliminaires (important) :

- * Munissez-vous de deux lentilles (une convergente et une divergente) et vérifiez la validité de la relation de conjugaison.
- * Avec une lampe (QI suivie d'un filtre anticalorique ou LED) et de la lentille convergente, réalisez une image nette sur un écran.
- * Sans déplacer l'écran, comment changer de lentille pour réaliser une image plus grande ?
- * Sans changer de lentille, comment faut-il déplacer les éléments pour réaliser une image plus grande ?

6 Relation de conjugaison (important)

Cette expérience permet de vérifier la relation de conjugaison avec origine au centre pour une lentille mince convergente. La méthode est décrite par Sextant [1, p. 22]. En notant O le centre de la lentille, f' sa distance focale, A un point de l'axe optique et A' son image à travers la lentille, on rappelle la relation de conjugaison de Descartes

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'} \quad (2)$$

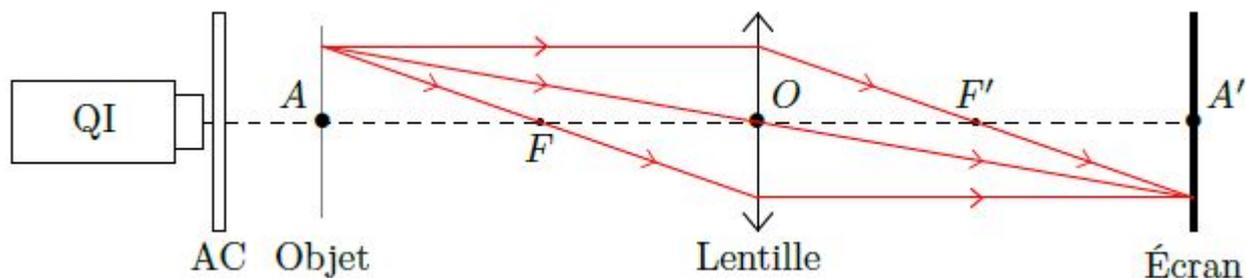


FIGURE 1 –

Expérience quantitative : Réaliser le montage ci-dessus en fixant précisément la distance objet

7 Mesurer une distance focale

7.1 Par autocollimation (important)

L'autocollimation permet non seulement d'estimer rapidement la distance focale d'une lentille convergente mais également de la placer correctement vis-à-vis de la source en amont afin d'obtenir un faisceau de lumière parallèle. Son principe de fonctionnement est représenté ci-dessous.

Expérience : Réaliser le montage ci-dessus en prenant pour objet une grille, un trou ou une di-



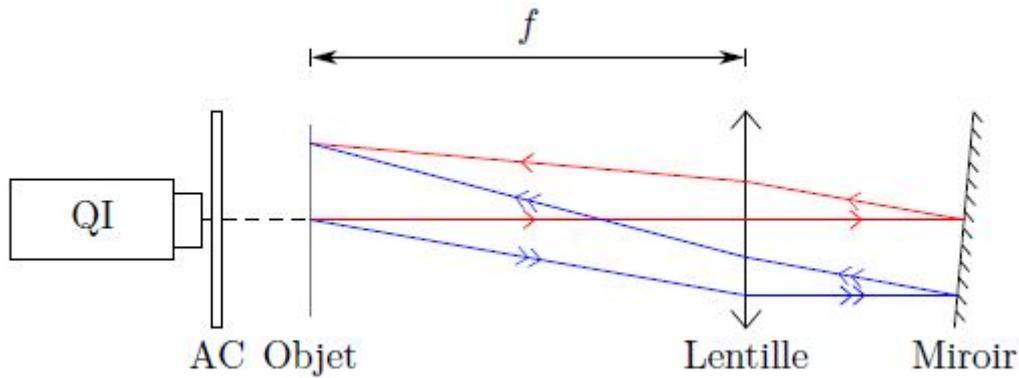


FIGURE 2 –

7.2 Méthode de Bessel (leçons niveau post-bac uniquement)

Il s'agit d'une méthode classique pour déterminer précisément une distance focale. Elle figure au programme de CPGE, c'est pourquoi vous la trouverez décrite dans divers ouvrages de prépa comme le Sanz PCSI [21 p. 303]. Elle s'appuie à nouveau sur la relation de conjugaison mais de manière plus subtile : pour une distance fixée L entre l'objet et l'écran, on cherche les positions de la lentille qui permettent d'obtenir une image nette. En notant $x = |\overline{OA}|$ la distance géométrique objet-lentille, la relation de conjugaison devient

$$\frac{1}{L-x} + \frac{1}{x} = \frac{1}{f'} \quad (3)$$

que l'on peut réécrire sous la forme d'une équation du second degré

$$x^2 - Lx + f'L = 0 \quad (4)$$

qui n'admet de solutions réelles que si $L > 4f'$. On retiendra que pour conjuguer deux plans à l'aide d'une lentille convergente donnée, il faut nécessairement les éloigner d'une distance supérieure à 4 fois la distance focale. On parle de "montage 4F". Dans le cas où cette condition est respectée, on a donc deux positions possibles pour la lentille, toutes deux éloignées d'une distance

$$\Delta x = \sqrt{L(L - 4f')} \quad (5)$$

La mesure de Δx permet alors de remonter à f' :

$$f' = \frac{L^2 - \Delta x^2}{4L} \quad (6)$$

Expérience quantitative : Réaliser un montage 4F à l'aide d'une lentille convergente de votre c

7.3 Méthode de Silberman (facultatif)

La méthode de Silbermann est un cas particulier de la méthode de Bessel, qui donne un résultat bien moins précis mais qui permet d'estimer rapidement la focale d'une lentille convergente. Elle peut typiquement se substituer à l'autocollimation si l'on ne dispose pas de miroir plan.

Expérience : Reprendre le montage 4F précédent, et déplacer alternativement l'écran et la lenti

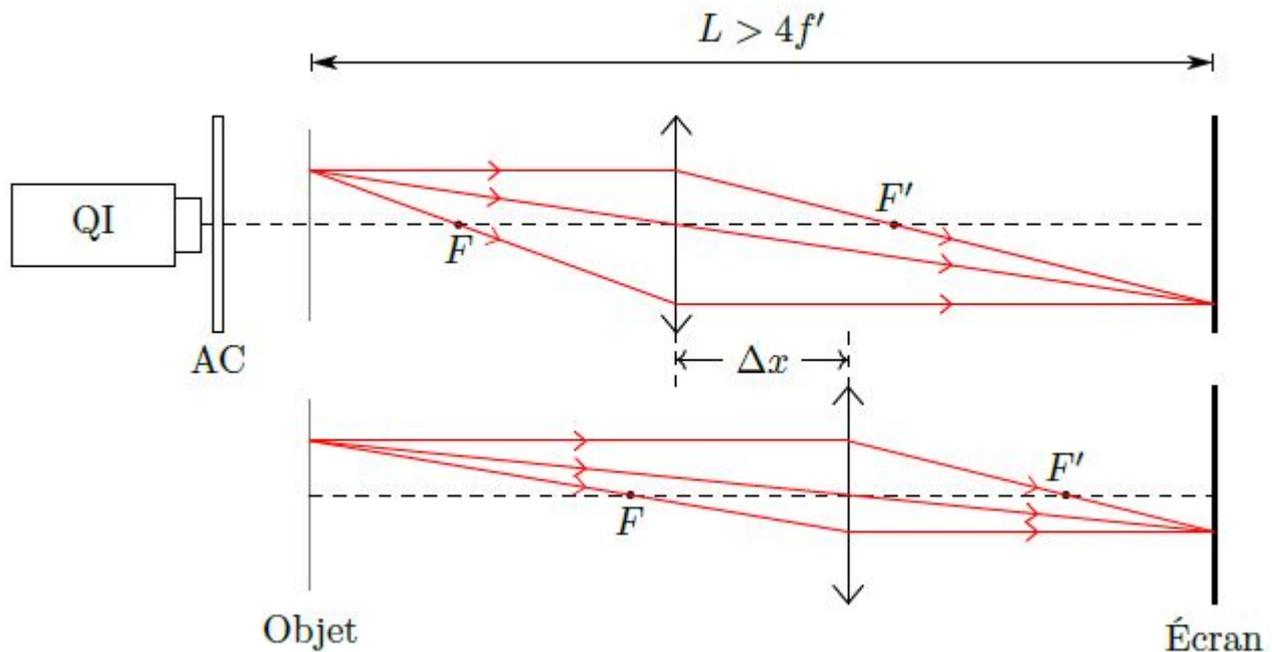


FIGURE 3 –

7.4 Petites focales et lentilles divergentes

- Les méthodes précédentes ne conviennent que pour des lentilles de focale appréciable, de l'ordre de 10 cm. Pour les lentilles de distance focale plus faible comme les objectifs de microscope, on n'obtient pas une précision suffisante et il devient nécessaire de recourir à d'autres méthodes. Certaines d'entre elles s'appuient sur des mesures de grandissement et sont présentées dans le Sextant [1, p.23].
- Pour mesurer la distance focale d'une lentille divergente, il faut lui adjoindre une lentille convergente de vergence connue de manière à former un doublet qui soit globalement convergent.

8 Instruments d'optique

Un instrument d'optique désigne une association de systèmes optiques destinée à favoriser l'observation d'un objet. Cet objet pouvant être plus ou moins grand, plus ou moins distant, etc. il existe de nombreux instruments d'optique dont les fonctions sont très variables. Cette partie se propose d'en étudier trois en particulier : la lunette astronomique, l'appareil photo et le microscope (vous trouverez décrits dans la littérature d'autres instruments comme le télescope).

9 Rappels/Definitions

On confond souvent le grandissement et le grossissement des instruments d'optiques. En voici les définitions pour se rafraîchir la mémoire : Grandissement : C'est le rapport de la taille réelle de l'image à la taille réelle de l'objet. C'est un nombre sans dimension. ATTENTION : On ne pourra parler de grandissement que si l'objet et l'image sont à des distances finies du système optique.

Grossissement : C'est le rapport de l'angle α sous lequel on voit l'objet à travers l'instrument à l'angle β sous lequel on le voit à l'œil nu. C'est un nombre sans dimension. $G = \frac{\alpha}{\beta}$



10 La lunette astronomique (important)

10.1 Principe

La lunette astronomique est un instrument adapté à l'observation d'objets lointains. Elle permet de recueillir un faisceau parallèle issu d'un objet à l'infini et d'en faire une image agrandie, également à l'infini afin que l'œil n'ait pas à accommoder pour l'observer. En effet, lorsque le cristallin est au repos, la rétine se trouve dans son plan focal image et les rayons parvenant de l'infini s'y projettent sans effort. En revanche, pour faire l'image d'un objet proche, le cristallin doit adapter sa distance focale afin de conjuguer le plan de l'objet et celui de la rétine : on dit qu'il accommode.

La lunette est un système afocal : elle forme une image à l'infini d'un objet à l'infini.

Réalisation d'une lunette "maison"

- * Réserver les lentilles de focale 20cm et 40cm pour la lunette, utilisez les autres pour l'œil
- * Formation d'un objet à l'infini : Eclairer en lumière blanche un objet "F" et le placer par a
- * Modélisation de l'œil : Prendre une lentille L_4 de focale peu encombrante en guise de cristallin
- * Réalisation de la lunette : Choisir pour objectif une lentille L_2 de focale 40cm et pour oculaire

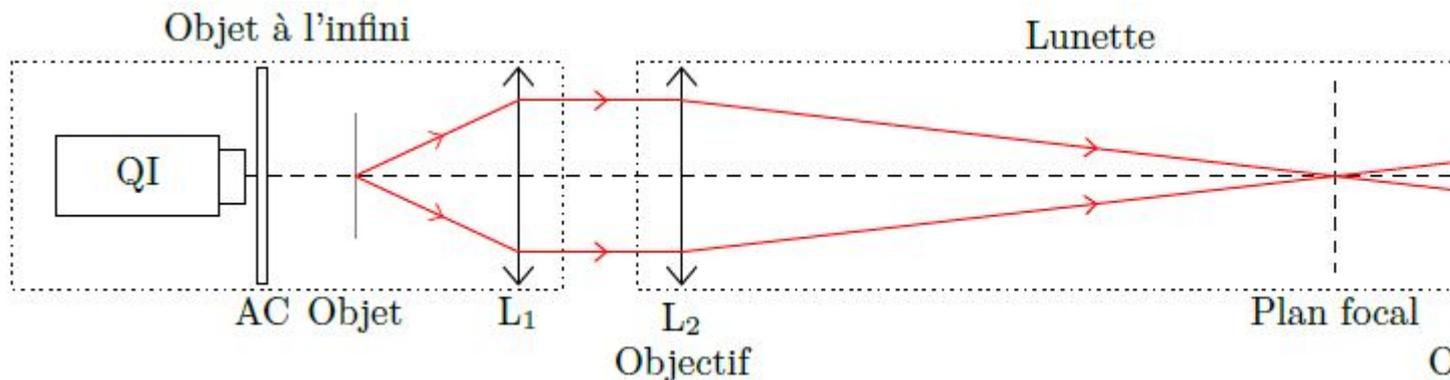


FIGURE 4 –

10.2 Mesure du grossissement

L'objet et l'image à travers une lunette astronomique étant tous deux à l'infini, la notion de grandissement transversal n'a plus de sens. En revanche, on peut définir le grossissement (ou grandissement angulaire) comme le rapport des angles sous lesquels est perçu l'objet avec et sans lunette (voir figure ci-dessous) :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} \quad (7)$$

Dans les conditions de Gauss, on peut réexprimer G en fonction des focales de l'objectif et de l'oculaire :

$$G = -\frac{f'_{obj}}{f'_{oc}} \quad (8)$$

Il est donc indispensable pour une lunette d'avoir un objectif de focale supérieure à celle de l'oculaire afin d'obtenir un grossissement supérieur à 1.

Expérience quantitative : Mesurer la taille de l'image du "F" formée sur l'œil simplifié, en p

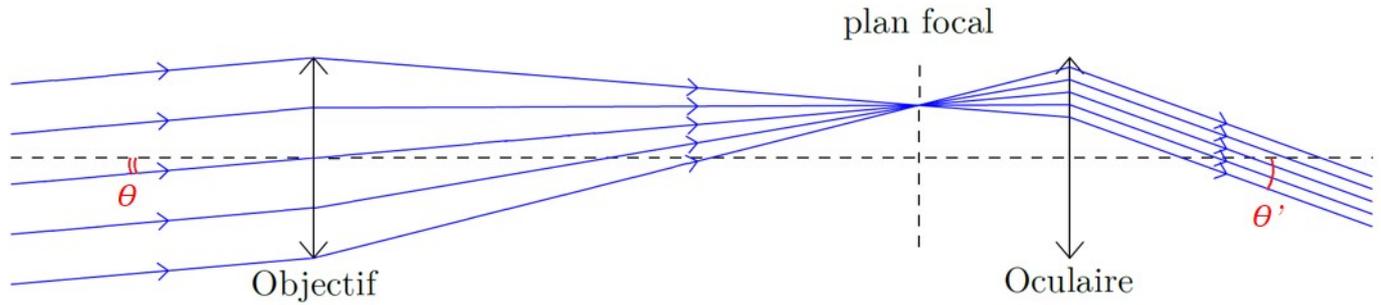


FIGURE 5 –

10.3 Diaphragmes et pupilles

La pupille d'entrée d'un instrument est la surface à travers laquelle la lumière pénètre dans le système optique. Dans le cas de la lunette astronomique, c'est l'objectif qui joue le rôle de pupille d'entrée. Le diaphragme désigne le contour de la pupille, en l'occurrence ici la monture de l'objectif. De même, l'oculaire constitue la pupille de sortie.

- L'image de l'objectif par l'oculaire est appelé cercle oculaire. C'est le lieu de luminosité maximale en sortie de lunette, c'est pourquoi il est judicieux d'y placer son œil même si l'image peut être observée nettement à n'importe quelle position.
- La monture de l'objectif est celle qui limite la quantité de lumière qui pénètre dans la lunette : on parle de diaphragme d'ouverture.
- La monture de l'oculaire limite le champ visible de l'objet : on parle de diaphragme de champ.
- Pour augmenter le champ visible de l'objet, il est possible d'intercaler une lentille au plan focal entre l'objectif et l'oculaire afin de faire davantage converger les rayons, pour qu'ils ne se heurtent plus au diaphragme de sortie et parviennent jusqu'à l'œil. On parle alors de verre de champ.

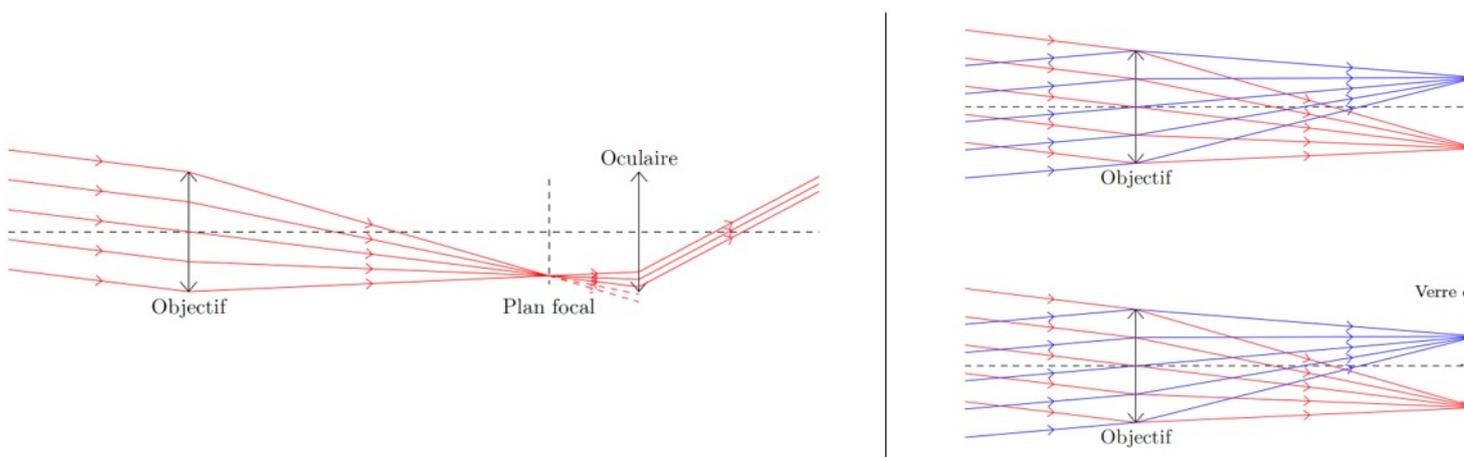


FIGURE 6 –

Expériences qualitatives :

- * Accoler deux diaphragmes contre l'objectif et l'oculaire et faire varier leurs diamètres afin
- * Placer une lentille au niveau du plan focal de la lunette afin de réaliser un verre de champ.



11 L'appareil photo (important)

11.1 Principe

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 dans le cas de l'appareil photo) est l'équivalent du cristallin (dont la focale varie lors de l'accommodation) ; 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 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. Après avoir rappelé la définition de la profondeur de champ, nous allons étudier le compromis dont résulte le choix d'une ouverture (voir Sextant section I.7.3, p. 35).

11.2 Profondeur de champ et ouverture

Lorsque l'on fait l'image d'un objet sur un capteur optique (écran, barrette CCD, pellicule d'appareil photo, rétine humaine...), 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 d'un millième de la taille de l'image totale. Ce choix - arbitraire au premier abord - est motivé par le fait que la limite de résolution de l'œil est de quelques minutes d'angle ($\sim 0,001$ rad) et que les photos sont censées être observées, après agrandissement, à une distance de l'ordre de la taille de la photo.

On appelle profondeur d'un champ d'un instrument optique la distance qui sépare les deux points extrêmes de l'axe optique dont les images sont vues nettes selon le critère précédent. La profondeur de champ varie d'un instrument à l'autre et résulte d'un effet géométrique simple, illustré sur le schéma ci-dessous dans le cas de l'appareil photo : la mise au point étant faite sur A , son image A' sur la pellicule est ponctuelle. En revanche l'image 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 vaut donc BC . Il est aisé de se rendre compte que la distance BC augmente à mesure que l'on rétrécit le diaphragme d'entrée : la profondeur de champ augmente au détriment de l'ouverture et donc de la luminosité de l'image.

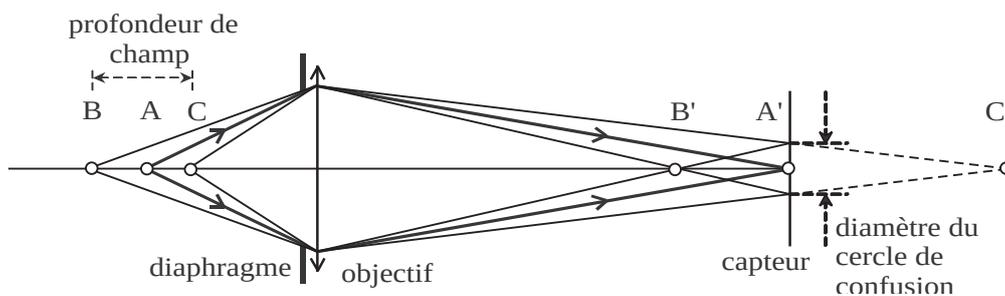


FIGURE 7 –

Expérience qualitative : Prendre pour objet une grille contrastée de pas environ 1 mm accolée à

Question : Comment doit-on régler l'ouverture si l'on cherche à former un portrait net avec un second plan flou ?

12 Le microscope (en seconde lecture)

12.1 Principe

Le microscope permet l'observation de petits objets situés très proches de l'instrument, contrairement à la lunette astronomique qui vise les objets infiniment éloignés. De même que celle-ci, il est constitué d'un objectif et d'un



oculaire, mais la distance entre eux n'est pas réglable comme c'est le cas pour la lunette. Pour mettre au point un microscope, il faut amener l'image intermédiaire par l'objectif dans le plan focal de l'oculaire en déplaçant l'ensemble objectif + oculaire par rapport à l'objet. On obtient alors une image à l'infini, pour un meilleur confort visuel (nul besoin d'accommoder). La collection dispose d'un microscope doté de plusieurs objectifs. Ce paragraphe propose d'en étudier les caractéristiques.

De même que pour la lunette, on définit le grossissement G du microscope comme le rapport des angles sous lesquels est vu l'objet avec et sans l'instrument :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} \quad (9)$$

L'image rétinienne de l'objet est donc G fois plus grande que dans la vision à l'œil nu. Par conséquent, il est clair que G dépend de la position de l'objet par rapport à l'œil. C'est pourquoi on définit le grossissement commercial comme le grossissement pour lequel on a fixé la distance œil-objet au punctum proximum ($d=25\text{cm}$) dans la définition précédente. On définit

$$G_c = \frac{\theta'}{\theta_{p.p.}} \quad (10)$$

où $\theta_{p.p.}$ et θ' sont définis sur la figure ci-dessous. Dans les conditions de Gauss, on peut réécrire G_c en fonction des caractéristiques de l'objectif et de l'oculaire :

$$G_c = |\gamma_{obj}| G_{c,oc} \quad (11)$$

où γ_{obj} désigne le grandissement de l'objectif, inscrit sur le cylindre (x4, x10, x60). γ_{obj} est négatif car l'image intermédiaire est renversée. $G_{c,oc}$ désigne le grossissement commercial de l'oculaire, également inscrit sur celui-ci (x6, x10, x15).

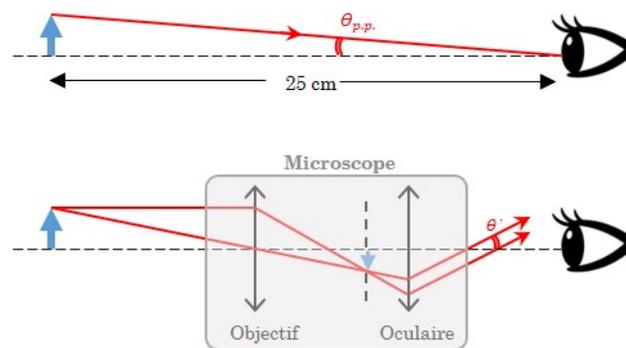


FIGURE 8 –

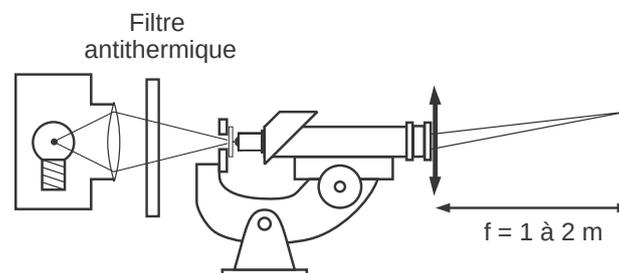


FIGURE 9 –

12.2 Mesure du grossissement

Expérience quantitative : Disposer le microscope horizontalement comme indiqué sur la figure ci 4 et $G_{c,oc} = 10$. Focaliser sur l'objet le faisceau d'une lampe quartz-iode (sans oublier d'interc...



$|\gamma_{obj}|_{G_{c,oc}}$. Ici aussi, cette expérience peut être rendue plus précise en traçant $G_c = f(\gamma_{obj})$ (resp. $G_c = f(G_{c,oc})$) pour différents objectifs (resp. oculaires) pour remonter à $G_{c,oc}$ (resp.

13 Appendice (à lire)

Bien qu'il n'en soit pas fait mention dans le corps du sujet, il faut impérativement garder à l'esprit que des aberrations optiques sont toujours susceptibles d'affecter la qualité d'un montage, même le plus simple. Cet appendice présente de manière succincte les différents types d'aberrations et suggère des méthodes élémentaires afin de les minimiser, ainsi que d'autres conseils pratiques indispensables à la réalisation d'un montage de qualité. Bien que les expériences qui vont suivre soient qualitatives et non directement utilisables en leçon, il est important d'en maîtriser le principe afin de s'habituer dès le début de l'année à former de belles images - i.e. grandes, nettes, lumineuses et non déformées - car il s'agit-là d'un atout très valorisé au concours et ce quel que soit le degré de complexité de l'expérience présentée.

14 Les aberrations optiques

L'étude expérimentale détaillée des aberrations optiques figure dans Sextant [1, p.37] et Duffait [10, p.25]. Pour des illustrations des différents types d'aberrations, on pourra se référer à l'excellent Houard [15, ch.6]. Les aberrations présentes dans un montage réel peuvent avoir deux causes : la géométrie des éléments optiques et la polychromaticité de la lumière incidente.

14.1 Les aberrations géométriques

Dans les conditions de Gauss, tous les systèmes centrés sont approximativement stigmatiques, i.e. les rayons issus d'un point A passent "proches" de son image A' , c'est-à-dire à l'intérieur de son cercle de confusion (qui dépend de la résolution du capteur utilisé). Dès lors qu'on ne considère plus des rayons paraxiaux, un capteur de suffisamment bonne résolution permet d'observer de nets écarts au stigmatisme approché : ces écarts sont appelés aberrations géométriques.

- Aberration sphérique

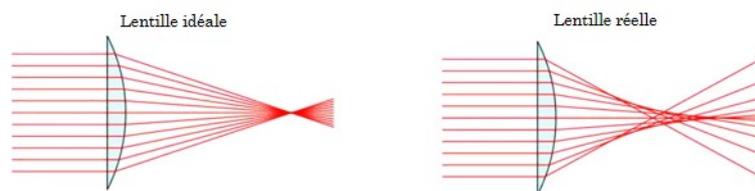


FIGURE 10 –

Les rayons lumineux traversant une lentille idéale éclairée sous incidence normale se croisent en un point unique, le foyer image. Dans le cas d'une lentille réelle, ils se croisent sur un ensemble de points contenus dans un volume fini. La lumière se concentre sur l'axe et sur la surface extérieure de ce volume, formant une figure géométrique qui entoure le foyer appelée *caustique*. Cette aberration peut être limitée en occultant les rayons périphériques qui ne respectent pas l'approximation paraxiale ou bien en orientant la lentille de manière à ce que sa face la plus plate soit du côté du focus : c'est la règle des 4P ("plus plat plus près"). Pour la mettre en évidence, on utilise le dispositif multi-faisceaux présent dans la collection.

Expérience qualitative : Fixer une source lumineuse sur le support aimanté du dispositif multi-

- Aberration de coma



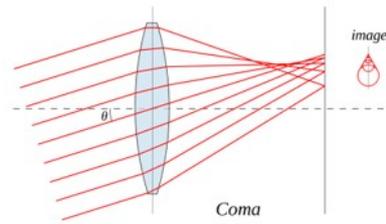


FIGURE 11 –

Elle se produit lorsque l'objet est en dehors de l'axe optique, ou bien lorsque la lentille fait un angle avec celui-ci. 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").

- Astigmatisme

L'astigmatisme est dû aux dissymétries de révolution des systèmes optiques. Une lentille dont les rayons de courbures ne sont pas parfaitement homogènes autour de l'axe optique fait apparaître deux points de focalisation distincts : le foyer sagittal et le foyer tangential (qui est le plus proche de l'élément optique).

- Distorsions

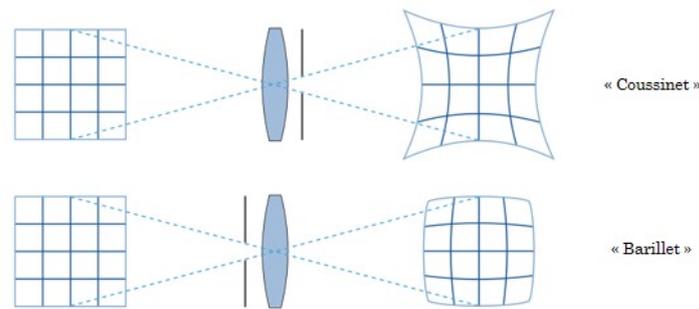


FIGURE 12 –

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 placé avant la lentille, on obtient une distorsion en "barillet". S'il est placé après la lentille, on obtient une distorsion en "coussinet". S'il est parfaitement accolé à la lentille, la distorsion disparaît.

Expérience qualitative : Eclairer le plus uniformément possible une grille de pas 1 cm précédée

14.2 Les aberrations chromatiques

Les lentilles possédant un indice optique variable avec la longueur d'onde, il est clair que les différentes composantes d'une lumière polychromatique ne subissent pas exactement la même réfraction à l'intérieur du verre. Il en résulte une légère dispersion qui irise l'image des objets. On parle d'aberrations chromatiques. Pour les corriger, on utilise des doublets achromatiques ou achromats, qui sont des assemblages de lentilles dont les propriétés dispersives sont telles qu'elles compensent les aberrations.

Expérience qualitative :

- * Faire converger le faisceau d'une lampe sur un trou de 1 ou 2 mm de diamètre. En faire l'image
- * Placer différents filtres colorés en amont de la lentille et déplacer l'écran. Les images pon
- * Remplacer la lentille de projection par un doublet achromatique et observer la disparition de



15 Obtenir une image de bonne qualité (important)

Ce paragraphe ne propose pas d'expériences à proprement parler mais dispense d'importants conseils à appliquer systématiquement afin de réaliser un montage de qualité, savoir-faire indispensable en optique expérimentale dans le cadre de l'agrégation.

15.1 Choisir une lentille de projection

Lorsqu'on veut imager un objet sur un écran, on utilise une lentille de projection. Sachant que la qualité d'une image est assurée par sa luminosité, sa taille, sa netteté et sa fidélité (pas de déformation de l'objet initial), la lentille de projection doit être choisie en conséquence. Attention, les recommandations ci-dessous ne concernent pas tous les types de lentille : il s'agit ici de projeter une image mais le choix d'un condenseur ou d'un collimateur peut reposer sur des critères différents.

a. Choisir la distance focale

Nous avons montré plus haut (voir "Méthode de Bessel") qu'une lentille ne peut former l'image d'un objet sur un écran situé à une distance D de l'objet que si sa focale f' est telle que

$$D > 4f' \quad (12)$$

Ce critère est extrêmement utile en pratique, et il faut toujours l'avoir à l'esprit au moment de choisir une lentille.

En supposant cette contrainte respectée, deux positions symétriques par rapport au milieu du segment objet – écran permettent d'assurer la conjugaison :

$$x_{\pm} = \frac{D \pm \sqrt{D(D - 4f')}}{2} \quad (13)$$

La lentille renversant l'image, le grandissement à chacune de ces positions est négatif et vaut

$$\gamma_{\pm} = -\frac{D - x_{\pm}}{x_{\pm}} = 1 - \frac{2}{1 \mp \sqrt{1 - 4f'/D}} \quad (14)$$

Ainsi, à distance D et focale f' données, le grandissement est maximal en $x = x_{-}$, c'est-à-dire pour la position de la lentille la plus proche de l'objet. En outre, le grandissement est d'autant plus important que le rapport f'/D est faible, ce qui invite à maximiser D et minimiser f' .

Par conséquent, pour obtenir une image de grandissement maximal, il faut placer l'écran le plus loin possible de l'objet, choisir une lentille de focale aussi petite que possible et la placer à la position permettant d'assurer la conjugaison la plus proche de l'objet. Néanmoins, l'usage d'une lentille de focale trop courte a des conséquences en termes d'aberrations et de luminosité, ce qui nécessite de modérer la course aux petites focales. En général, choisir une lentille de focale 10 cm à 15 cm est un bon choix. Des lentilles de plus courte focale, jusqu'à 5 cm, peuvent être utilisées dans des cas où augmenter le grandissement est essentiel.

b. Minimiser les aberrations

Pour limiter l'influence des aberrations chromatiques, on privilégiera l'emploi de doublets achromatiques. Les aberrations géométriques sont quant à elles dues aux écarts aux conditions de Gauss, c'est-à-dire aux angles d'incidence des rayons sur les dioptries air – verre : plus les angles d'incidence sont grands, plus il y a d'aberrations. Pour les limiter, on peut donc simplement diaphragmer le faisceau en amont de la lentille afin d'éliminer les rayons les plus inclinés et les moins paraxiaux. On veillera également à appliquer la règle des 4P ("plus plat plus près") afin que les rayons les plus inclinés frappent la face la plus plane de la lentille.

c. Synthèse : choisir une lentille de projection en pratique

- Choisir une grande distance objet-écran de manière à respecter le critère $D > 4f'$, tout en veillant à l'encombrement de la paillasse.



- Choisir une lentille de projection de faible distance focale mais pas trop, 10-15 cm est souvent un bon choix.
- Privilégier l'usage de doublets achromatiques.
- Respecter la règle des 4P.
- Diaphragmer éventuellement la lentille de projection.

15.2 Aligner le montage

Un montage dont l'alignement horizontal et vertical a été soigneusement fait assure une transmission optimale de la lumière à travers les optiques d'une part, mais cela permet également que l'ajout, le retrait ou le déplacement d'une optique sur le trajet du faisceau ne modifie pas la position de l'image. On prendra pour cela l'habitude de procéder comme suit :

- La lampe source et l'écran doivent être placés en premier, et la lampe orientée de manière à ce que le faisceau soit parallèle à la paillasse et fasse une tache lumineuse au centre de l'écran.
- Ajouter un à un chaque élément du montage à leur position axiale approximative, en commençant par le plus proche de la lampe et en terminant par le plus proche de l'écran. Régler l'alignement transversal de tous les éléments en vérifiant chaque fois que l'ajout/le déplacement d'un élément ne modifie pas la position de l'image sur l'écran.
- Ajuster enfin la position axiale de chaque élément. Si le positionnement des optiques dans la direction axiale est critique pour le montage en question, on pourra utiliser un banc optique. Il ne faut cependant pas y avoir recours systématiquement car cela peut parfois imposer des contraintes d'alignement transversal inutiles.

15.3 Optimiser la luminosité

Une fois l'alignement du montage réalisé, il reste à régler l'éclairage pour obtenir une image lumineuse et uniformément éclairée. Cela consiste essentiellement à choisir la position du condenseur par rapport à la lampe, afin de faire plus ou moins converger le faisceau sur l'objet.

- Le faisceau doit être suffisamment convergent pour qu'un maximum de lumière traverse l'objet, mais pas trop convergent afin d'éclairer l'objet de façon uniforme.
- Le condenseur étant une lentille comme une autre, il forme quelque part dans le montage l'image de l'ampoule ou du filament de la lampe. Il faut s'arranger pour que cette image ne se forme ni dans le plan de l'objet, ni dans le plan de l'image. Lorsque cela est possible, un bon choix peut être de faire l'image du filament au niveau de la lentille de projection, de manière à ce qu'elle disparaisse de la suite du montage (le centre d'une lentille est conjugué à lui-même).

15.4 Conclusion : préparer un montage optique

- 1) Choisir une lentille de projection adaptée.
- 2) Régler l'alignement transversal des différentes optiques.
- 3) Régler la position axiale des différents éléments afin de former une image nette sur l'écran.
- 4) Régler (itérativement si besoin) les positions du condenseur et de la lampe afin d'avoir une image de luminosité suffisante et uniforme.

