

MP 7 – INSTRUMENTS D’OPTIQUE

16 novembre 2017

Bastien Gili-Tos & Guillaume Jung

Niveau : L2

Commentaires du jury

2017, 2016, 2015 : Les candidats doivent connaître et comprendre les conditions d’obtention d’images de bonne qualité. L’étude des limitations et de défauts des instruments présentés est attendue. Les candidats doivent comprendre quelles sont les conditions pour que la mesure du grossissement puisse se ramener à la mesure d’un grandissement lorsqu’ils présentent des dispositifs afocaux. Enfin, dans certains cas, les candidats peuvent envisager l’utilisation de lunette de visée afin d’améliorer leurs mesures [2017 : de distance].

2014, 2013 : Les candidats doivent connaître et comprendre les conditions d’obtention d’images de bonne qualité. L’étude des limitations et de défauts des instruments présentés est attendue. De bons exposés ont été observés sur ce sujet.

Jusqu’en 2013, le titre était : Instrument(s) d’optique.

2012 : Les candidats doivent connaître et comprendre les conditions d’obtention d’images de bonne qualité. Il ne faut pas appliquer sans discernement un protocole trouvé dans un livre. Les conditions de stigmatisme (approché ou rigoureux), les conditions de Gauss, les aberrations géométriques et les aberrations chromatiques... doivent être connues. Les manipulations proposées doivent illustrer réellement le fonctionnement de l’instrument choisi.

Bibliographie

- ✦ *Physique expérimentale aux concours de l’enseignement*, —> Bien pour la manip sur le microscope (chap VI.2, p. 131)
Bellier
- ✦ *Expériences de Physique au CAPES*, **Duffait** —> Bien pour les deux systèmes (chap XIX, p. 184)
- ✦ *Optique*, **Houard** —> La bible en optique, à lire (chap VII, p. 153)
- ✦ *Optique expérimentale*, **Sextant** —> Compléments (tout est intéressant dedans...)

Prérequis

- Optique géométrique
- Décomposition en séries de Fourier
- Lois de Newton

Expériences

- ☞ Mesure du grossissement de la lunette astronomique
- ☞ Diaphragmes de champ et d’ouverture - Verre de champ (qualitative)
- ☞ Mesure de la puissance du microscope
- ☞ Limite de résolution en diffraction (qualitative)

Table des matières

1	La lunette astronomique	2
1.1	Principe de fonctionnement	2
1.2	Grossissement	2
1.3	Diaphragmes de champ et d’ouverture - Verre de champ	3
2	Microscope optique	3
2.1	Principe de fonctionnement	3
2.2	Puissance du microscope	4
2.3	Limite de résolution en diffraction	5

Introduction

Un objet n'est visible par nos yeux que si on l'observe sous un angle suffisant. Certains objets sont donc invisibles à l'œil nu, qu'ils soient très grands mais éloignés ou au contraire très petits. Dans ce montage, nous allons modéliser deux systèmes permettant de voir ces deux catégories d'objets : la lunette astronomique de Kepler et le microscope optique.

Nous nous intéresserons à leur principe ainsi qu'à des vérifications de certaines lois régissant leur comportement. Nous nous pencherons également sur quelques propriétés de ces systèmes et aborderons la notion de limite de résolution.

1 La lunette astronomique

1.1 Principe de fonctionnement

Système afocal, i.e. faisant une image à l'infini d'un objet à l'infini, composé de deux lentilles, la première étant l'objectif, et la deuxième l'oculaire. L'image intermédiaire (d'un objet à l'infini) se forme dans le plan focal objet de l'objectif, qui est confondu avec le plan focal image de l'oculaire, d'où une image à l'infini et donc l'œil de l'utilisateur qui n'a pas besoin d'accommoder (confort de vision).

1.2 Grossissement

L'astronome amateur regardant la surface de la Lune à travers sa lunette la voit plus grande : la lunette grossit les objets regardés (par rapport à une vision à l'œil nu). La caractéristique d'intérêt de la lunette est donc son grossissement (qui est aussi le grandissement ici car système afocal) défini par :

$$G_{th} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2} \quad (1)$$

On mesure les focales f_1 et f_2 grâce à la méthode de Bessel (le faire une fois en live ou pas, c'est votre choix). On en déduit G_{th} .

Montage de la lunette

🔧 Bellier ou autre

⌚ X minutes

On monte la lunette (en live ou en préparation, au choix suivant les autres choix indiqués, son aisance etc... de toute manière il faut monter soit la lunette soit le microscope devant le jury). Donc sur le banc :

- Objet à l'infini : QI (avec alim' réglable c'est top car pas besoin de mettre un dépoli contre l'objet (on peut vite se retrouver avec des images très lumineuses)) + AC + achromat $f_1 = 300$ mm, on met l'objet au foyer par autocollimation.
- Oeil : avec un achromat $f_{oeil} = 300$ mm et un écran (le tout sur banc) : on fait l'image nette sur l'écran (celui ci est alors au foyer de L_{oeil}).
- Lunette : on place l'objectif, achromat $f_{obj} = 300$ mm et l'oculaire, achromat $f_{oc} = 100$ mm de manière à retrouver une image nette sur l'écran (mais agrandie)

Mesure grossissement

🔧 Bellier ou autre

⌚ X minutes

On mesure la taille de l'objet sur l'écran avec et sans lunette, puis on fait le rapport, on trouve : $G = \quad \pm$
tout en justifiant les incertitudes et on compare à la valeur "théorique".

Remarque : on peut aussi faire varier f_2 mesurer le G associé, on trace alors $G = f(f_2)$ et on vérifie que c'est une droite de pente f_1 .

1.3 Diaphragmes de champ et d'ouverture - Verre de champ

On montre le cercle oculaire et on explique pourquoi il faut y placer son oeil (tous les rayons entrant dans l'objectif y passent). Ce cercle oculaire est en fait l'image de la monture de l'objectif par l'oculaire. Donc il faut prendre en compte les diamètres des lentilles lorsqu'on veut construire une lunette car leur rôle est très loin d'être secondaire.

Diaphragmes de champ et d'ouverture

🔧 Bellier ou autre

⌚ X minutes

On place un diaphragme juste après l'objectif : c'est le diaphragme d'ouverture car en le fermant, la luminosité de l'image diminue mais pas sa taille.

On place un diaphragme juste avant l'oculaire, c'est le diaphragme de champ car en le fermant on diminue la portion d'objet que l'on peut voir sans toutefois changer la luminosité de l'image. On observe un brouillage sur les bords, c'est le champ de contour. En positionnant le diaphragme dans le plan de l'image intermédiaire, on ne brouille plus les bords.

Verre de champ

🔧 Bellier ou autre

⌚ X minutes

On replace le diaphragme de champ contre l'oculaire et on met une lentille convergente au niveau de l'image intermédiaire : le champ observable augmente !

2 Microscope optique

Maintenant que nous avons vu comment fonctionne la lunette astronomique, penchons-nous maintenant sur la vision d'objets trop petits pour être vus à l'œil nu.

2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du microscope est semblable à celui de la lunette, à quelques différences près tout de même. Nous modélisons un microscope à nouveau à l'aide de deux lentilles convergentes comme sur le schéma suivant (à vous de le faire!) :

Le microscope n'est pas un système afocal : la distance entre les deux foyers *internes* F'_1 et F'_2 est appelée *longueur optique* et sera notée Δ .

L'objet n'est plus observé depuis l'infini mais d'une position proche du foyer objet F_1 . La lentille L_1 donne une image intermédiaire A_1B_1 de l'objet AB . La lentille L_2 est placée de telle sorte à envoyer l'image de A_1B_1 à l'infini afin que l'œil n'accorde pas en regardant dans le microscope. Ainsi, le point A_1 est confondu avec F_2 . L'image finale A_2B_2 à travers L_2 est donc à l'infini, elle se retrouve donc en fin de compte sur l'écran de l'œil.

2.2 Puissance du microscope

Une des caractéristiques principales du microscope est sa puissance P . Elle est définie comme le rapport de l'angle sous lequel on voit l'objet en sortie de microscope et de la taille de l'objet lui-même.

$$P = \frac{\alpha}{AB} = \frac{\alpha}{A_1B_1} \cdot \frac{\overline{A_1B_1}}{AB} = P_{oc} \gamma_{obj} \quad (2)$$

Avec P_{oc} la puissance de l'oculaire et γ_{obj} le grandissement de l'objectif. Ou encore :

$$P = \frac{\Delta}{f'_1 \cdot f'_2}$$

Les autres relations sont :

$$\gamma_{obj} = \frac{\Delta}{f'_1} \quad \text{et} \quad P = \frac{\gamma_{obj}}{f'_2} \quad (3)$$

Mesure de la puissance

↗ Physique exp aux concours de l'enseignement - Bellier ☹ X minutes

Matériel :

- Un banc d'optique (on va faire des mesures)
- QI + AC
- Un objet F modifié avec du papier noir afin de ne pas avoir une image énorme
- Lentille magique $f' = 100$ mm (P111.1/3) l'achromat très épaisse (elle est vraiment cool)
- Deux autres lentilles de focales de 200 et 300 mm avec des diamètres assez gros (et achromats si possible)
- Une tige, deux noix, une lentille de focale 300 mm avec un écran
- Des pieds pour banc

Le but est ici de vérifier expérimentalement ces trois relations.

Eclairer l'objet et placer la lentille magique de focale $f'_1 = 300$ mm de telle sorte à ce que l'objet soit dans le plan focal objet de la lentille (par autocollimation). Placer la lentille/œil de focale $f'_3 = 300$ mm de telle sorte à prendre toute la lumière et placer l'écran afin d'avoir une image nette. Fixer avec une tige et deux noix la lentille/œil et l'écran afin de ne plus pouvoir les bouger. Ainsi, l'œil est réglé à l'infini.

Reculer un petit peu la lentille magique sur le banc (l'éloigner de l'objet) afin de se placer dans les conditions d'un microscope, elle devient alors l'objectif du microscope. Placer alors la lentille/oculaire de focale $f'_2 = 200$ mm entre L_3 et L_1 et chercher la position qui donne une image nette à travers l'œil sur l'écran.

On peut mesurer la taille de l'image de l'écran $\overline{A_2B_2}$.

Placer un écran sur le banc et chercher la position de l'image intermédiaire et mesurer sa taille $\overline{A_1B_1}$ et relever sa position $\overline{O_1A_1}$.

Mesurer également $\overline{O_1A}$ et grâce aux relations précédemment citées et à des mesures en préparation pour différentes longueurs $\overline{O_1A}$, tracer $P = f(\Delta)$ et $\gamma_{obj} = g(\Delta)$ et vérifier qu'on obtient bien des droites de pente $p = \frac{1}{f'_1 f'_2}$ et $p' = \frac{1}{f'_1}$.

Ici on mesure :

$$\begin{aligned} \overline{O_1A} &= (\quad \pm \quad) \text{ cm} \\ \overline{O_1A_1} &= (\quad \pm \quad) \text{ cm} \\ \overline{A_1B_1} &= (\quad \pm \quad) \text{ cm} \\ \overline{A_2B_2} &= (\quad \pm \quad) \text{ cm} \end{aligned}$$

2.3 Limite de résolution en diffraction

Nous proposons ici de visualiser la limite de résolution d’une lentille due à la diffraction. On peut qualitativement comprendre qu’un point a pour image à travers une lentille convergente une petite tâche. Si deux objets sont trop *proches* l’un de l’autre, leurs images respectives risquent de se chevaucher. Si elles se chevauchent trop, on ne voit qu’une seule image et non deux : on n’arrive plus à résoudre les deux objets.

Rappelons-nous le critère de Rayleigh : deux points sont discernables s’ils sont vus sous une différence d’angle supérieure à $1.22 \frac{\lambda}{D}$ avec λ la longueur d’onde du faisceau lumineux (monochromatique) et D le diamètre de l’ouverture circulaire du système optique.

Afin de mettre en lumière (oui oui, vous constaterez ce magnifique jeu de mots digne de Kenny :D) la limite de résolution en diffraction d’une lentille mince, nous allons observer l’image de bifentes à travers une lentille convergente. Pour faire cela, nous utilisons le montage suivant (à vous de le faire encore une fois) :

Nous montrons ensuite à l’aide d’un diaphragme, que nous fermons petit à petit, que la résolution des bifentes est de moins en moins bien marquée. Il arrive un moment où les bifentes ne sont plus discernables : nous avons atteint la limite de résolution en diffraction de la lentille pour ce jeu de fentes.



Limite de résolution en diffraction d’une lentille convergente (qualitative)

✍ M. Farizon (merci!) et notre tête

⌚ X minutes

Matériel :

- Un banc d’optique
- QI avec une alimentation à **intensité variable** (P6.9) + AC
- Trois bifentes (B46) avec leur porte-diapo
- Diaphragme à bords propres (P114/7)
- Lentille magique $f' = 100$ mm (P111.1/3) l’achromat très épaisse (elle est vraiment cool)
- Caliens avec ses deux filtres (P17.10/1)
- Oscilloscope 4 voies avec deux câbles BNC pour Caliens
- Des pieds pour banc, avec un pied réglable sur deux dimensions pour Caliens

Le but de la manipulation est ici d’arriver à résoudre les fentes sur l’ordre d’un pixel de Caliens afin de montrer ensuite la limite de résolution en diffraction de la lentille mince. Pour cela, on réalise le montage précédent. Quelques remarques d’ordre pratique pour mettre en œuvre cette expérience...

Tout d’abord, il faut une grande distance entre les bifentes et la lentille : environ 10 fois la distance entre la lentille et Caliens. Ainsi, nous aurons un grandissement de l’ordre de 0.1, ce qui donnera un écart entre les fentes de l’ordre de quelques pixels! *Astucieux non ?*

Pourquoi avoir choisi cette diapo particulièrement ? Parce qu’elle est composée de trois bifentes particulières. Celles du milieu et d’un côté sont de même écartement mais de largeurs différentes, alors que celles du milieu et de l’autre côté sont de même largeur mais d’écartement différent ! Cela permet de montrer par la suite la différence d’intensité sur Caliens et la limite de résolution plus fine pour les fentes avec le plus grand écartement.

Autre point important : ne pas brancher Caliens à un ordinateur mais directement sur un oscilloscope. Il faut alors mettre le trigger sur celui de Caliens. Là encore petite subtilité, il faut que le trigger fonctionne une fois sur deux... Il faut pour cela utiliser l’option de trigger *Neme front rafale* et mettre une inaction d’au moins 8 ms (supérieur au temps d’acquisition d’une image). Cette option n’est pas présente sur les vieux oscillo, d’où l’utilisation d’un 4 voies. Autre avantage : vous pouvez projeter l’oscilloscope ! Comme ça tout le monde peut voir ce qu’il se passe sans être collé à l’oscillo ! :D

Voilà pour les subtilités de l’expérience. Passons maintenant à l’exploitation.

Une fois que le montage est bien réglé, on peut montrer que l'on arrive à voir les pixels de Caliens. Les fentes ne sont larges que de quelques pixels, voire d'un seul. Retrouvons au passage l'ordre de grandeur de la taille p d'un pixel. On compte le nombre N de pixels séparant deux fentes et en lisant sur la diapo l'écartement d des fentes, on en déduit : $N \cdot p = d \cdot \gamma$ avec γ le grossissement ici considéré (de l'ordre de 0.1). Ainsi, en connaissant d on retrouve l'ordre de grandeur p d'un pixel!

Ici on obtient $p \simeq$ et on compare à la valeur donnée dans la doc de Caliens : $p = 15 \mu m$.

On introduit maintenant un diaphragme entièrement ouvert avant la lentille. On le ferme peu à peu ce qui diminue forcément l'intensité lumineuse. Pour quand même avoir un signal avec Caliens, on augmente en même temps l'intensité de la lampe (d'où l'alimentation à intensité variable). On joue à ce petit jeu jusqu'à ce que le contraste de résolution des bifentes commence à diminuer.

A partir d'une certaine taille d'ouverture du diaphragme, les deux premiers couples de fentes ne sont plus résolus alors que le troisième l'est toujours. C'est le critère de Rayleigh au niveau des pixels. Le troisième couple étant d'un écartement plus large que les deux premiers, il faut continuer à fermer le diaphragme pour ne plus le résoudre.

Conclusion

Nous avons ici étudié la modélisation de deux systèmes optiques visant à voir l'infiniment petit et l'infiniment grand invisible à l'œil nu. Bien évidemment, ce n'était que des modélisations avec deux lentilles convergentes. En pratique, l'objectif et l'oculaire sont constitués de plusieurs lentilles afin de corriger les aberrations et d'améliorer les observations. Les grossissements ici exposés sont également beaucoup plus petits que les systèmes réels, mais le fonctionnement reste grossièrement le même.

Remarques et questions