
MP07, INSTRUMENTS D'OPTIQUE

RÉMY DASSONNEVILLE - AURÉLIEN ELOY
24 octobre 2013

Bibliographie

- Les instruments d'optique, L.Dettwiller
- Optique, Houard
- Sextant
- Optique Duffait

Table des matières

I Changements d'échelle	3
I.1 lunette astronomique	3
II Notion de champ	4
II.1 Lunette astronomique	4
II.2 Objectif photographique	4
III Luminosité	5
III.1 Objectif photographique	5
III.2 Lunette astronomique	5
IV Limite de résolution	7

Rapports du jury

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

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.

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.

2011, 2010 : Les candidats doivent connaître et comprendre les conditions d'obtention d'images de bonne qualité. Il n'est pas suffisant d'appliquer aveuglément un protocole trouvé dans un livre. L'intitulé devient Instrument(s) d'optique en 2011.

Jusqu'en 2010, le titre était : Instruments d'optique.

2009 : Les candidats doivent connaître et comprendre les conditions d'obtention d'images de bonne qualité. Il n'est pas suffisant d'appliquer aveuglément un protocole trouvé dans un livre.

Jusqu'en 2008, le titre était : Formation des images en optiques.

2008 : Il ne faut pas se limiter à une énumération des aberrations des lentilles. Les objets et leurs images peuvent aussi être étendus. Le jury apprécierait l'étude d'un instrument d'optique. C'est pourquoi, dans la liste 2009, le titre de ce montage est changé.

2007 : Ce montage ne se résume pas à un catalogue exhaustif des aberrations des lentilles.

2005 : Ce montage ne doit pas se résumer à l'étude des défauts !

2004 : Il s'agit ici de savoir former des images et pas seulement d'en étudier tous les défauts !

Jusqu'en 1999, le titre était : Formation des images par les instruments d'optique, champs, aberrations et résolution spatiale.

1999 : Le montage ne doit pas être limité à la présentation d'images avec aberrations il faut également montrer de « bonnes » images. Le jury apprécierait que les candidats se penchent de temps à autre sur un instrument d'optique réel.

1997 : Il est intéressant d'illustrer l'effet du verre de champ d'un instrument d'optique en expliquant son intérêt. On peut aussi souligner comment les qualités du récepteur jouent sur la résolution spatiale d'un instrument objectif.

Introduction

Le but des instruments d'optique est de former et d'utiliser une image. On distingue deux catégories :

- I.O. objectif = ceux destinés à projeter une image réelle sur un "écran" diffusant ou une surface réceptrice (pellicule, CCD, etc...). Exemple : objectifs photo, projecteurs de diapositives, épiscopos, etc...
- I.O. visuel ou subjectif = ceux destinés à former une image observée par oeil uniquement. Exemple : jumelles, télescopes, microscopes, périscopes, lunettes astronomiques, etc...

Note : On peut montrer un exemple réel des deux. Dans la collection, il y a des objectifs photo, aussi une paire de jumelles.

Leurs caractéristiques sont le **champ** (portion de l'image utilisable), le **pouvoir séparateur** (précision de l'image obtenue). Plus,

- IOO : tolérance de mise au point (**profondeur de champ**) + distance hyperfocale
- IOV : **les changements d'échelles** (grossissement-grandissement-puissance), la **clarté** (l'apport de luminosité de l'instrument par rapport à une vision directe) et la plage vue nette par l'oeil, compte tenu de l'accommodation (**lattitude de mise au point**)

A quoi ça sert ?

L'utilité des IOV est surtout de dépasser les limites de sensibilité et de résolution de l'oeil (résolution angulaire max : $5 \cdot 10^{-4}$ rad (d'où, si on regarde des objets à 10 km, s'ils sont distants de moins de 5 mètres, on ne les distinguera pas)). On pourra ainsi observer des cellules biologiques avec un microscope ou des étoiles, planètes, Lune etc... avec une lunette astronomique ou télescope.

Ce qu'on va faire :

On va dans ce montage, illustrer expérimentalement les différentes qualités des instruments d'optique (qualités et limitations) au travers d'une lunette astronomique (de Kepler) montée sur banc optique et d'un objectif photographique.

Note historique :

L'histoire des instruments d'optique commence vers le XVI-XVIIème siècle (époque de Galilée), avec l'apparition de la lunette de Galilée et microscope optique (même si on ne connaît pas vraiment leurs inventeurs). Les IO

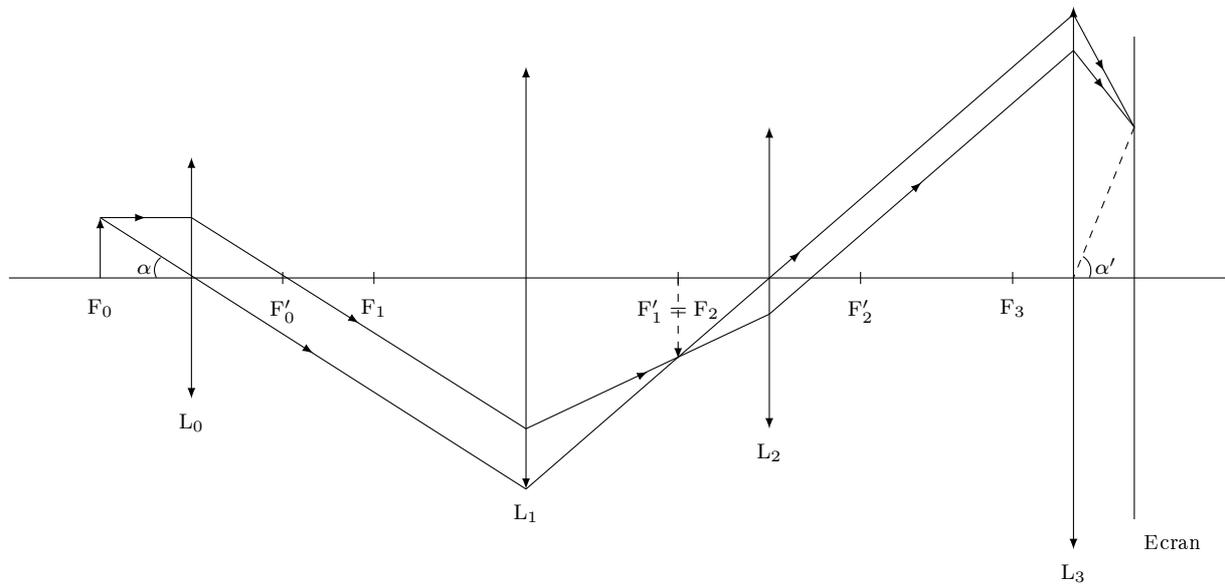


FIGURE I.1 – Schéma de la lunette astronomique. La lentille L_0 sert à créer un objet à l'infini. La lunette est constituée des lentilles L_1 et L_2 . Finalement, la lentille L_3 sert à modéliser un œil.

ont connu des perfectionnements considérables au cours du temps : de la lunette de Galilée au télescope spatial *Hubble* ; des premiers microscopes simples de Van Leeuwenhoek au microscope à champ proche.

Citation :

G.Roblin, Microscopie optique

"C'est [le microscope] un instrument de rêve qui met l'infiniment petit à la portée de l'homme, qui lui fait découvrir un monde échappant à sa vision ordinaire, à l'opposé du télescope qui lui rapproche l'infiniment loin qu'il n'atteindra jamais."

I Changements d'échelle

I.1 lunette astronomique

exemple du grossissement sur la lunette astro :

La lunette astro est modélisée par un système afocale de deux lentilles convergentes. (voir schéma). On a utilisé des achromats pour limiter les aberrations. On modélise une étoile par un objet lumineux dans le plan focale objet d'une lentille ($L_0=20\text{cm}$) et l'œil avec un écran dans le plan focale image d'une autre lentille ($L_3=25\text{cm}$). On a des pour l'objectif des focales allant de 30 à 50 cm et on prend pour l'oculaire une focale de 10cm.

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{-f'_{ob}}{f'_{oc}} \quad (\text{I.1})$$

Incertitude :

On a une incertitude relative sur la mesure de G de :

$$\frac{\Delta G}{G} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \alpha'}{\alpha'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2} \quad (\text{I.2})$$

avec une incertitude relative sur les angles d'environ 1 %. On a une incertitude sur la mesure de f'_{ob} d'environ 0.5 cm (dû au fait qu'on les a mesuré par autocollimation et que une mesure de distance sur banc d'optique a une erreur d'environ 0.5 cm).

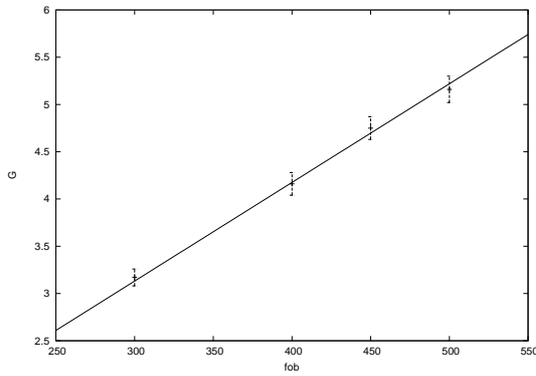
Quelques ordres de grandeurs : $G = 10 - 3000$, pour les meilleures lunettes.

Manip' 1 :

tracer G (f'_{ob}) et faire un calcul d'incertitude. G se mesure à la règle sur l'écran. L'objet est une grille et on passe son temps à compter des carreaux.

En préparation, faire plusieurs points et on en fait un seul en live. Au tableau, on écrit :

$$G = \dots \pm \dots \quad (\text{I.3})$$



Tansion Les changements d'échelles ne résument pas à eux seuls les qualités d'un IO. Il y a également d'autres caractéristiques, comme par exemple, le champ, ie, la portion de l'objet visible.

II Notion de champ

II.1 Lunette astronomique

Montrer sur le rétro des schémas genre Duffait page 103-et suite **Définitions :**

Le diaphragme qui contrôle la luminosité est appelée diaphragme d'ouverture (quand il est réel) ou pupille (quand c'est une image ou un antécédent). C'est celui de cercle apparent le plus grand.

Le diaphragme qui contrôle le champ est le diaphragme de champ (si c'est réel) ou lucarne (si c'est une image ou un antécédent)

On appelle cercle oculaire la tâche de diamètre minimal à partir de la face d'oeil (=oculaire) (cf Dettwiller).

Position du cercle oculaire :

$$\overline{O_{oc}O_{Coc}} = f'_{oc} \left(1 - \frac{1}{G}\right) \quad (\text{II.1})$$

Le champ de pleine lumière (ou plein éclairement) est la zone où l'éclairement reste quasi-uniforme (en fait, ça bouge en cosinus à la puissance 4)

Le champ de contour (ou vignetté) est la zone où l'éclairement chute de manière visible.

Parler de champ, de cercle oculaire et de diaphragme d'ouverture (qui joue sur la luminosité et se place sur l'objectif).

Manip' 2 :

Montrer que le grossissement est aussi donner par $G = \frac{D_{\text{diaphragme ouverture}}}{D_{\text{cercle oculaire}}}$. On mesure le diamètre du cercle oculaire avec un écran avec du papier millimétré, d'où une erreur de 0.5mm et le diamètre de l'objectif (erreur 1 mm). D'où une erreur relative sur G. On peut comparer ces deux méthodes, normalement, ça revient à peu près au même puisque qu'on fait des rapports de longueurs (mais il y a surement plus d'imprécision sur la mesure du cercle oculaire)

Parler de diaphragme de champ (joue sur le champ et se place dans le plan image intermédiaire). On parle ainsi aussi de champ de contour et pleine lumière. Finalement, parler et montrer l'effet d'un verre de champ (augmente le champ, se place dans le plan image intermédiaire (En réalité, on le place juste à côté pour ne pas voir les défauts du verre de champ)).

Attention

Il faut essayer de choisir un objectif de gros diamètre et un oculaire de petit diamètre pour bien séparer l'effet de diaphragme d'ouverture et de champ.

II.2 Objectif photographique

voir Duffait + plus projeté schéma page 116

Profondeur de champ C'est la distance entre les plans extrêmes dans l'espace objet dont les images sont perçues comme nette par le récepteur. Du coup, ça dépend du récepteur.

$$PdC = A_1 A_2 \simeq 2\epsilon N \frac{d^2}{f^2} \quad (\text{II.2})$$

avec d la distance objet-objectif.

Manip' 3 :

matériels : lentille, diaphragme à iris, objet lumineux incohérent (ie : avec un calque). Expérience qualitative. Montrer la profondeur de champ en tournant une grille autour de l'axe z. Les carreaux du milieu sont nettes, ceux de côtés ne le sont pas. Montrer qu'en réduisant le diaphragme, on améliore la netteté mais on perd en luminosité.

Remarque jury :

Montrer aussi l'influence du diaphragme sur la profondeur de champ en plaçant la caméra sur une platine de translation parallèle à l'axe optique

On constate qu'en fermant le diaphragme, on a augmenté la profondeur de champ, mais perdu en luminosité; ce qui nous donne l'occasion de faire une très belle transition.

Tansition

On vient de voir le champ (et ses notions dérivés) et on vient juste de voir qu'il peut y avoir un compromis à faire entre netteté et luminosité. On va s'intéresser un peu plus aux caractéristiques lumineuses des IO.

III Luminosité

III.1 Objectif photographique

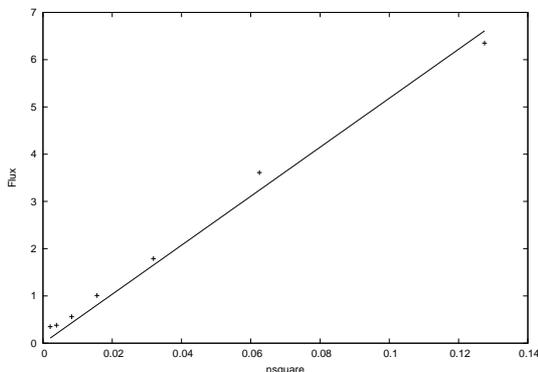
petite définition

Nombre d'ouverture :

$$n = \frac{f'}{D} \quad (\text{III.1})$$

Manip' 4 :

Mesure de $I = f(\frac{1}{n^2})$ avec un objectif photo réel. On mesure une intensité au luxmètre (thorlab, c'est un peu mieux) en fonction de n qu'on peut régler sur l'objectif photo. On peut vérifier le nombre d'ouverture en mettant un petit trou + dépoli à distance focale de l'objectif photo retourné. Le faisceau émergent est un faisceau parallèle de diamètre constant $d_N=f/N$



remarque pour apprenti photographe Si on veut augmenter la profondeur de champ, on ferme le diaphragme (n augmente), mais ainsi on perd en luminosité. Pour avoir la même lamination (=éclairage*temps de pose) qu'avant, on est obligé de faire un temps de pose plus long. Du coup, le risque de "bougé" augmente (photo floue car le sujet ou l'appareil photo a bougé pendant le temps de prise de photo). Sur un appareil photo commercial, n évolue en $\sqrt{2}$, donc chaque cran fait diminuer l'éclairément par deux donc il faut multiplier le temps de pose par deux.

III.2 Lunette astronomique

La clarté est le bénéfice, du point de vue de la luminosité, tiré de l'utilisation d'un IO. Comme le dit Houard qui cite Dettwiller, c'est le rapport des flux lumineux Φ' et Φ reçus par **une même cellule**, où se forme l'image d'un même point de l'objet, avec et sans instrument.

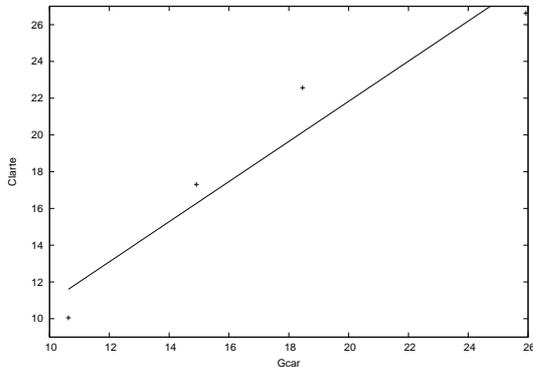
$$C = \frac{\Phi'}{\Phi} \quad (\text{III.2})$$

C'est une notion obscure car l'expression des flux change si la source est étendue (planètes, Soleil) ou ponctuelle (étoile).

Manip' 5 :

Mesurer la clarté avec un luxmètre $C = f(G^2)$. On place le luxmètre à un endroit (vers le cercle oculaire, et on ne le bouge pas).

Autre idée de manip par manque de temps et quand on veut passer vite fait sur la clarté : Calcul d'un C théorique pour le cas étendu qu'on a sur la paillasse. On s'est mis à $G > G_e$. $C_{th} = 0.8 * (G_e = 4.1 / G = 5)^2 = 0.54$. Pour un diaphragme d'ouverture ouvert à 2.5cm). Faire une mesure et comparer à la valeur théorique. Les raisons de ne pas faire une courbe sont les suivantes : 1) T peut changer quand on change les lentilles. (De plus, il faut faire gaffe de bien garder le même diamètre du diaphragme d'ouverture pour les différents grossissement, sinon, on change plusieurs paramètres en même temps) (c'est la raison officielle) 2) Le jour J, on n'y arrivera pas

**Grossissement équipupillaire G_e :**

C'est le grossissement pour lequel le diamètre d du cercle oculaire est égal au diamètre d_0 de la pupille de l'oeil. De nuit (pupille dilatée), comme c'est souvent le cas pour une observation avec une lunette astronomique, on a $d_0 = 6$ mm. D'où :

$$G_e = \frac{D_{\text{objectif}}}{6 \text{ mm}} \quad (\text{III.3})$$

En salle de TP, D_{objectif} est d'environ 6 cm, d'où un grossissement équipupillaire de 10. On ne fait pas le poids avec notre petit grossissement de 4-5, pour y arriver, il faut mettre un diaphragme sur l'objectif, à 2 ou 3 cm de diamètre, on peut arriver à $G > G_e$. Les lunettes commerciales y arrivent sans trop de problèmes.

Objet ponctuel

$$C = TG^2 \quad \text{si } G < G_e \quad \text{sinon } TG_e^2 \quad (\text{III.4})$$

T de l'ordre de 0.8. D'où, $C \gg 1$. La lunette agit comme un collecteur de lumière. Pour $G > G_e$, tout se passe comme si la pupille de l'oeil possédait une surface effective égale à celle de l'objectif. Au bout d'un moment, ça ne sert plus à rien d'augmenter le grossissement car toute la lumière va déjà dans l'oeil.

Objet étendu

$$C = T \frac{G_e^2}{G^2} \quad \text{si } G > G_e \quad \text{sinon } T \quad (\text{III.5})$$

Quand c'est T, c'est quasiment 1, la luminosité de l'image est presque identique à celle de l'objet. Sinon, c'est toujours inférieur à l'unité. On a un compromis clarté/grossissement.

Note :

Pour l'observation planétaire, Danjon et Couder préconisent des clartés comprises entre 0.11 T ($G = 3G_e$) et 0.007 T ($G = 12G_e$).

On a dans tous les cas :

$$C_{\text{étendu}} = \frac{C_{\text{ponctuel}}}{G^2} \quad (\text{III.6})$$

On voit avec cette formule qu'avec une lunette de gros grossissement, on peut observer les étoiles (ponctuelles) en plein jour car la clarté des objets étendus est G^2 inférieur à celle des étoiles. On améliore le contraste des étoiles.

Remarques :

Si on exprime tout ça en fonction du diamètre D de l'objectif, on constate que :

à G égal, D grand donne C grand.

à C égal, D grand donne G grand.

Donc, on est content avec un grand diamètre (en fait, pas vraiment à cause des aberrations et puis ça coûte cher à faire polir les deux faces de grandes lentilles et les porter, ce n'est pas pratiques, etc... tout ça pour dire qu'on préférera les télescopes qui sont moins chiant quand ils sont grands).

Transition On vient de voir que la luminosité pouvait être un facteur limitant dans l'observation avec un IO. Regardons maintenant le facteur limitant le plus connu, ie la résolution. De plus, actuellement, on (les astrophysiciens) ne passe plus trop son temps à mettre son oeil derrière sa lunette, on enregistre tout ça sur ordinateur grâce par exemple à une barette CCD. Du coup, on va aussi regarder la limite de résolution introduite par la barette CCD.

IV Limite de résolution

Il y a deux phénomènes qui font qu'on perd en précision :

- Perte de résolution par diffraction (plutôt fondamental)
- Limite de résolution due à la taille des pixels ou grains de pellicule photo ou encore cellules de l'oeil (plutôt expérimental : dépend du capteur)

Manip' 6 :

Faire l'image d'une bifente qu'on diffracte par une fente parallèle. On mesure l'image avec une barette CCD (Caliens) et l'oscilloscope. On zoom sur l'oscillo pour voir les pixels (échantillonnage). On montre le critère de Rayleigh : passage de deux bosses à une bosse. Si possible, faire une mesure pour remonter au critère de Rayleigh.

Note sur CCD

CCD = Coupled charge device C'est la juxtaposition d'un ensemble de micro photodiodes. Chaque photodiode (pixel) charge un condensateur, avec une tension de charge proportionnelle à l'éclairement. Le signal donné par la barette reproduit cycliquement l'éclairement reçu.

Conclusion

On a vu dans ce montage les qualités des instruments d'optiques (objectif et subjectif) : les changements d'échelle, le champ, la luminosité et le pouvoir de résolution, avec des limitations portant sur la luminosité et la résolution et on peut aussi ajouter les aberrations des lentilles. Il faut parfois faire des compromis et suivant ce que l'on veut faire, on va utiliser tel ou tel IO.

On n'a pas parlé dans ce montage d'une autre catégorie d'IO ; ceux qui ont pour but unique de transporter de la lumière (phare côtier, catadioptré (miroirs en coin de cube qu'on a mis sur la Lune pour mesurer la distance Terre-Lune avec un LASER (380 000 km) et qu'on met sur les panneaux routiers pour pouvoir les voir la nuit grâce aux phares des voitures)