

Montage n°06

Instrument(s) d'optique

Helmy CHEKIR – Antoine BOYRON

Références

- Sylvain Houard : « Optique : une approche expérimentale et pratique ».
- Sextant

Prérequis

- Optique géométrique
- Diffraction

Niveau

- Classe préparatoire

Rapport de jury

- [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.
- [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.
- [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.

Plan

PARTIE I – Etude de la lunette astronomique

- A – Schéma de principe
- B – Grossissement
- C – Diaphragmes d'ouverture et de champ
- D – Clarté

PARTIE II – Illustration du critère de résolution

Introduction

L'œil est limité dans ses capacités d'observation :

- *résolution* : deux objets distants de 1cm peuvent être distingués au maximum à une distance de 30m, angle limite de 3.10^{-4} radians.
- *sensibilité* : intensité lumineuse limite en dessous de laquelle on ne verra plus rien !

Pour observer des objets astronomiques très éloignés, on imagine un dispositif optique permettant d'améliorer notre observation. Nous souhaiterions :

- *grossir* les objets observés tout en les *séparant*.
- avoir un *maximum* de lumière.

La lunette c'est cool. Elle permet d'illustrer dans un montage simple les notions mises en jeu pour l'observation. On dégagera dans cette étude quatre paramètres permettant de caractériser un instrument d'optique :

- grossissement
- champ (zone de l'espace visible)
- clarté
- pouvoir de résolution

PARTIE I – Etude de la lunette astronomique

A – Schéma de principe

Que veut-on observer ? Des objets à l'infini (soleil, étoiles...).

Contraintes :

- *Observation à l'œil* → former l'image d'un objet à l'infini à l'infini car l'œil n'a alors pas besoin d'accommoder. On parlera alors de système *afocal*. Une première lentille appelée *objectif* crée une image intermédiaire, placée au foyer d'une deuxième lentille appelée *oculaire*, qui formera ainsi une image à l'infini. On parlera de *système afocal*.

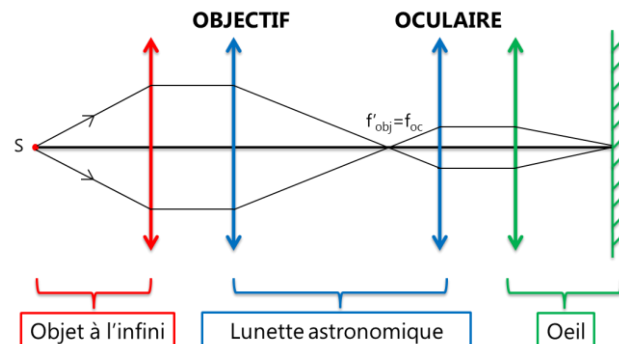


Schéma de la lunette astronomique présentée

Valeurs utilisées

- $L_{\text{objectif}} = 400 \text{ mm}$
- $L_{\text{oculaire}} = 160 \text{ mm}$

B – Grossissement

Il existe une différence entre

- grossissement (rapport de deux *angles*)
- grandissement (rapport de deux *longueurs*)

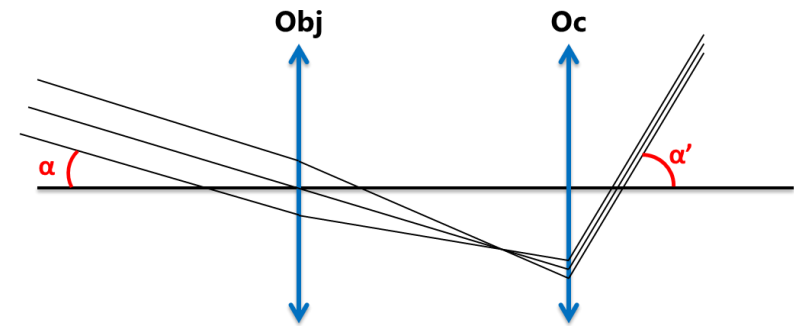


Schéma du grossissement

Ici, nous nous intéressons à des objets à l'infini, ainsi la notion de grandissement n'a pas de sens. Cependant, les objets considérés sont peu étendus, on peut donc approximer les angles par leur tangente. On retrouve alors pour le grossissement la formule :

$$G_{\text{théorique}} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f'_{\text{objectif}}}{f'_{\text{oculaire}}}$$

On mesure pour différents jeux d'objectifs et d'oculaires, la taille de l'image *avec* et *sans* la lunette.

Mesures :

Pour notre lunette actuelle,

- $f'_{\text{objectif}} = 40\text{cm}$
- $f'_{\text{oculaire}} = 16\text{cm}$

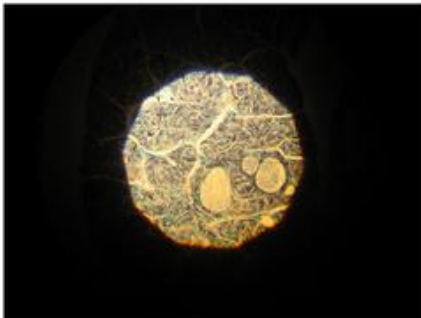
(comment évaluer les incertitudes : méthode de Bessel)

On trace $G_{\text{expérimental}}$ en fonction de $G_{\text{théorique}}$. On s'attend à obtenir une droite de pente 1. Discussion sur les incertitudes.

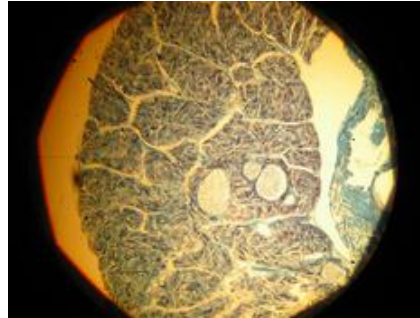
EXPERIENCE : Mesures de grandissement.

C – Diaphragmes d’ouverture et de champ

On veut contrôler la portion d’espace-objet observable : c’est ce qu’on appelle « le *champ* »



Petit champ



Grand champ

Pourquoi jouer sur le champ ?

- Une *augmentation du champ* nous permettra de voir un domaine de l’espace-objet plus vaste (si l’on veut photographier une partie du ciel par exemple).
- Une *diminution du champ* peut permettre de gagner en *profondeur de champ* (par exemple si nous utilisons un appareil pour photographier un objet à distance donnée, la profondeur de champ est définie comme la plage de distance « objet – objectif » sur laquelle une image nette est obtenue sur la pellicule). Bien sûr, nous ne pourrions pas mettre en évidence cette notion sachant que nos objets sont à distance infinie, l’image est nette pour n’importe quel distance « objet – objectif » !

Comment jouer sur le champ ?

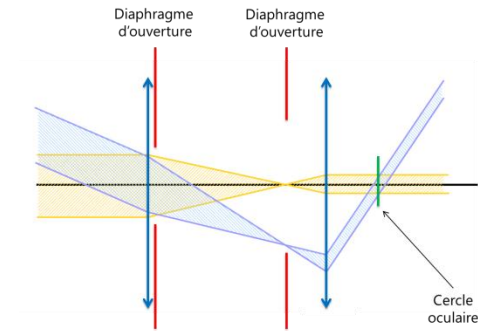
- en mettant un diaphragme de taille réglable dans le plan focal image de l’objectif (*diaphragme de champ*)
- en mettant une lentille de faible focale dans le plan focal image de l’objectif (*verre de champ*)

Comment jouer sur l’ouverture?

- en mettant un diaphragme de taille réglable devant l’objectif (*diaphragme d’ouverture*).

Notion de *cercle oculaire* : c’est l’image par le système optique du diaphragme d’ouverture. Le faisceau lumineux a une section minimale au cercle oculaire, c’est donc là que l’on placera son œil (l’œil est représenté dans le montage par une lentille de projection).

EXPERIENCE : Diaphragme d’ouverture, de champ, verre de champ et cercle oculaire.



Diaphragmes de champ et d’ouverture

D – Clarté

La *clarté* est une caractéristique essentielle d’un instrument d’optique. On la définit comme le rapport de l’intensité reçue par le capteur avec et sans l’instrument.

$$C = \frac{\varphi'}{\varphi}$$

On peut montrer que dans le cas d’une image étendue, et lorsque le diamètre de la pupille de l’œil (ici la monture de la lentille de projection) est plus grand que le cercle oculaire :

$$C = T \left(\frac{D}{d_0 G} \right)^2$$

T le *facteur de transmission* de l’instrument,

D le diamètre du diaphragme d’ouverture

d_0 le diamètre de la pupille de l’œil.

G le grandissement de la lunette

On aura toujours $C < 1$ pour un objet *étendu*. On cherche à maximiser C en augmentant au maximum le diamètre du diaphragme d’ouverture (diamètre de l’objectif en pratique).

Cette notion est bien difficile à comprendre, voir le livre de Sylvain Houard pour plus de détails, notamment concernant la différence entre la clarté pour un objet étendu ($C < 1$) et pour un objet ponctuel ($C > 1$).

EXPERIENCE : Mesure de clarté.

Mesurer le flux lumineux avec un luxmètre placé au cercle oculaire, pour différentes valeurs de D (on utilise un diaphragme de diamètre réglable), puis tracer $C=f(D^2)$. On obtient une droite. Cette mesure est très imprécise (luxmètre + mesure du diamètre du diaphragme) et on obtient vite des erreurs de l’ordre de 50% donc prendre les résultats avec des pincettes.

PARTIE II – Illustration du critère de résolution

La résolution d'un instrument d'optique comme la lunette astronomique est limitée par plusieurs phénomènes :

- le capteur a des cellules photosensibles de *taille finie*
- les perturbations de l'atmosphère *déforment* les images des astres
- la *diffraction* par les composants de la lentille *étale* les images

Grâce au montage proposé, on pourrait

- mettre en évidence la *limite de résolution due à la diffraction* (images étalées au niveau du capteur)
- mettre en évidence la *limite de résolution du capteur* (taille finie des cellules photosensibles).
- illustrer la notion de *profondeur de champ*.

Nous nous concentrerons sur une analyse qualitative du premier point (par manque de temps).
Le capteur est placé dans un plan conjugué avec les deux fentes, par la lentille.

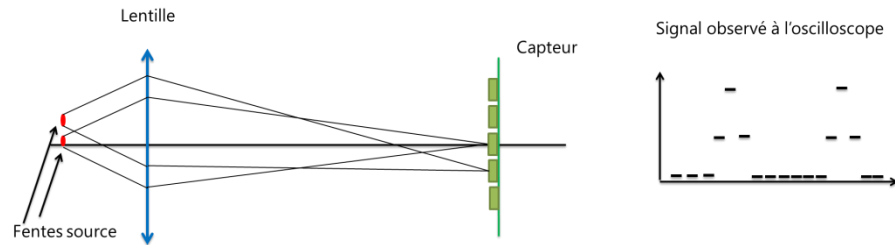
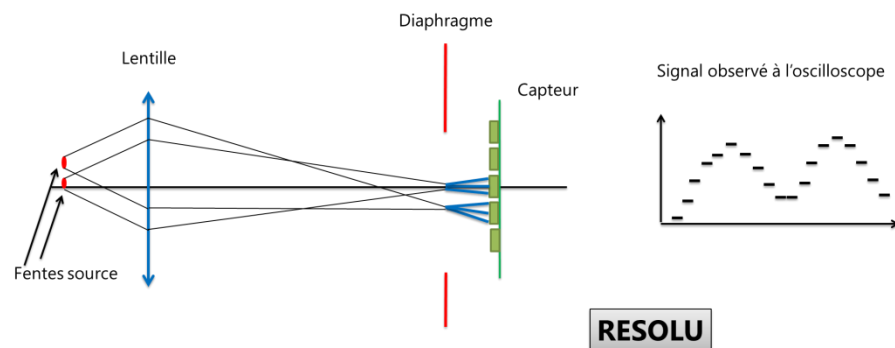


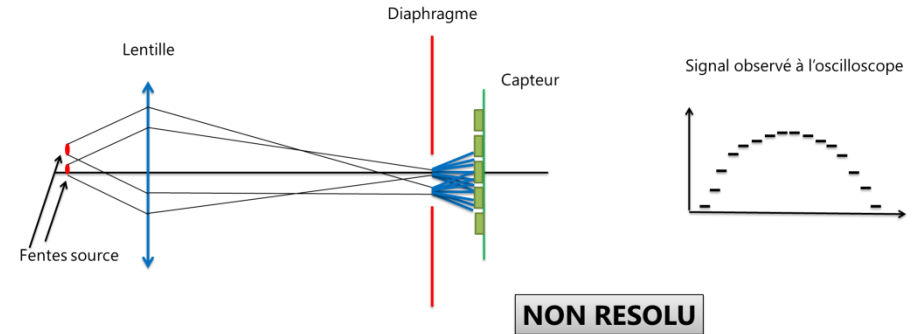
Schéma de principe du montage

A présent, plaçons un diaphragme suffisamment ouvert pour que la diffraction due à sa présence n'induisse pas une limitation de la résolution des deux images.



Diaphragme ouvert

Fermions petit à petit le diaphragme... A partir d'une certaine ouverture, les deux images ne sont plus résolues au niveau du capteur !



Diaphragme un peu plus fermé

EXPERIENCE : Influence de la diffraction sur la résolution.

On conjugue deux bifentes d'espacements différents ($2+2=4$ fentes), avec le capteur de Caliens, par une lentille de focale 50cm. On observe alors deux images bien séparées sur l'oscilloscope (relié à Caliens) pour chacune des bifentes. Lorsque l'on place un diaphragme juste avant le capteur, et que l'on ferme celui-ci progressivement, on observe

- tout d'abord une perte de résolution des images des bifentes les *moins espacées*.
- puis dans un second temps vient le tour des deux autres fentes, *plus espacées*.

CONCLUSION

Nous avons exposé dans ce montage les principaux paramètres qui définissent un instrument d'optique en les illustrant dans l'exemple de la lunette astronomique de Kepler. La construction d'un tel instrument consiste en l'optimisation des différents paramètres (dont certains comme le grossissement et la clarté peuvent évoluer de manière opposée) présentés afin d'obtenir les meilleures caractéristiques recherchées. Ainsi, on ne va pas construire une lunette astronomique de la même manière si l'on cherche à résoudre un doublet d'étoiles lointaines ou si l'on veut observer des cratères sur la Lune.

Nous n'avons que peu évoqué dans cette leçon un aspect des plus importants dans un instrument d'optique: le capteur. Ce dernier entrera en compte dans la discussion sur l'optimisation de l'appareil de manière fondamentale et il sera illusoire par exemple de vouloir augmenter la résolution en augmentant le diamètre des lentilles si le capteur est lui-même limitant...

De plus le fait que le capteur ne possède pas de photorécepteurs de taille infiniment petite amène une discussion sur une nouvelle caractéristique de l'instrument, à savoir la profondeur de champ.