

Chapitre 03 : Instruments d'optique

Plan du cours

I. L'œil	2
I. 1 - Description et modélisation	2
I. 2 - Fonctionnement de l'œil	2
I. 3 - Limite de résolution angulaire/pouvoir séparateur	3
I. 4 - Hauteur apparente/diamètre apparent	4
I. 5 - Défauts de l'œil	5
II. L'appareil photographique	5
II. 1 - Description et modélisation	5
II. 2 - Profondeur de champ d'un appareil photo	6
II. 3 - Influence de paramètres sur la formation des images dans un appareil photo	7
III. Lunette astronomique	8
III. 1 - Intérêt pratique	8
III. 2 - Modélisation	8
III. 3 - L'exercice-type classique à maîtriser sur le bout des doigts	9

Introduction

Un instrument d'optique est un dispositif qui utilise les propriétés de la lumière afin de former, analyser ou enregistrer une image ou un signal lumineux. Ces instruments peuvent avoir pour but d'améliorer (au sens large) la vision humaine, d'analyser des phénomènes physiques, ou encore de mesurer des grandeurs liées aux systèmes observés. Ce cours se restreint aux instruments d'optique utilisant des lentilles dans le cadre de l'optique géométrique.

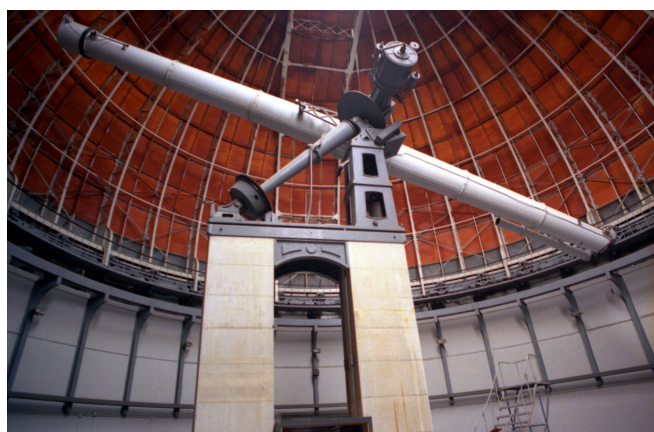


FIGURE 1 – Grande lunette de l'Observatoire de Nice.



Problématique :

Comment agencer des lentilles minces de telle manière à en faire des outils d'optique plus complexes dont l'utilisation permet d'explorer plus de champs d'application ?

I. L'œil

I. 1 - Description et modélisation

► L'œil est l'organe de la vision de l'être humain. Il lui permet de capter la lumière afin de distinguer les formes et les couleurs de l'environnement qui l'entoure. Sur le schéma anatomique de l'œil humain représenté ci-dessous, différentes parties sont identifiables ainsi que la modélisation effectuée.

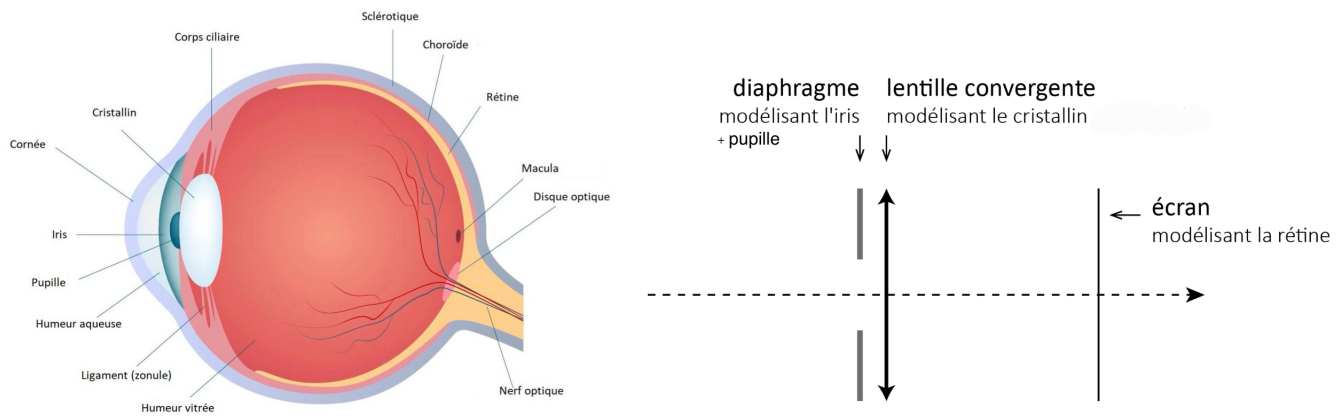


FIGURE 2 – Schéma anatomique et modélisation de l'œil

- l'**iris** et la **pupille**, qui jouent un rôle analogue à un diaphragme et permettent de contrôler la quantité de lumière entrant dans l'œil ;
- le **cristallin** dont les déformations servent à former l'image de l'objet sur la rétine : c'est l'**accommodation** ♥ ;
- la **rétine**, qui joue le rôle de capteur et envoie des signaux nerveux vers le cerveau, qui analyse l'image.

La lumière pénètre dans l'œil par la **cornée**, une pellicule protectrice transparente. Elle traverse ensuite l'**humeur aqueuse**, liquide peu visqueux servant à fixer la pression mécanique s'exerçant sur la face avant du cristallin. La pupille diaphragme cette lumière avant qu'elle n'arrive sur le **cristallin**, petit disque fibreux, transparent et flexible qui permet de focaliser ensuite l'image sur la **rétine**. La rétine est la partie photosensible de l'œil. Elle est formée de cellules sensorielles : les cônes et les bâtonnets. Les informations captées par ces cellules sensorielles sont transmises au cerveau via le nerf optique.

I. 2 - Fonctionnement de l'œil

► L'œil ne peut voir une image nette que si elle se forme sur la rétine. Lorsqu'il est au repos (=cristallin non contracté), il voit à sa distance maximum. Pour voir les objets plus proches, la distance cristallin-rétine étant fixe (à cause de l'anatomie), le cristallin doit se contracter pour augmenter sa vergence (=diminuer sa distance focale) : l'œil accomode.



Définition n°1 : Punctum remotum (P.R.)

► Le *punctum remotum* (P.R.) est le point le plus éloigné qu'un œil puisse voir (lorsqu'il est au repos). Pour un œil emmétrope (=qui ne présente pas de problème de défauts comme la myopie ou l'hypermétropie par exemple), le P.R. se situe à l'infini.

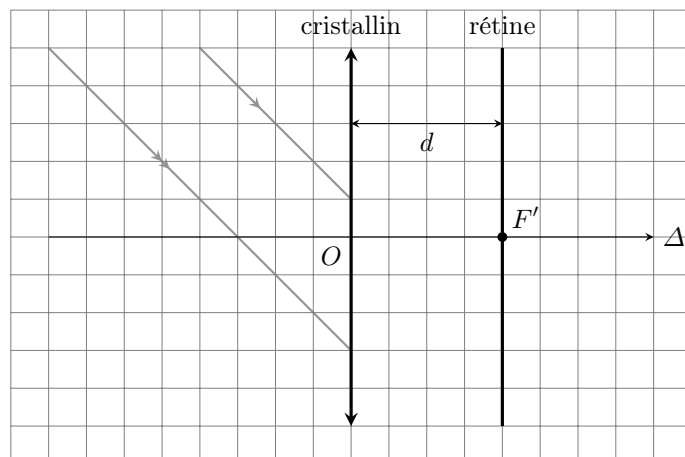


Définition n°2 : Punctum proximum (P.P.)

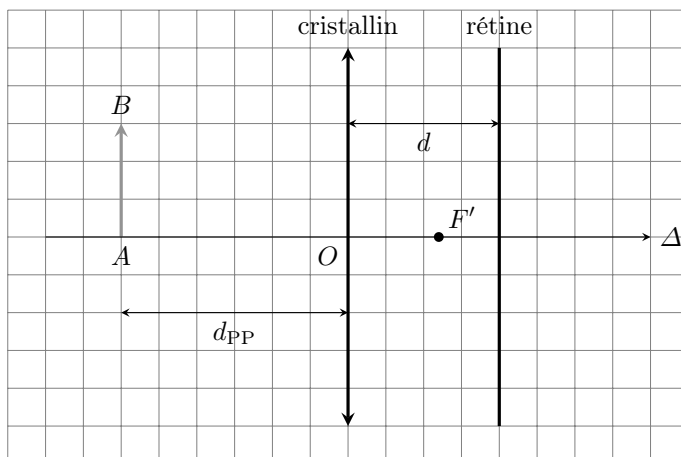
► Le *punctum proximum* (P.P.) est le point le plus proche qu'un œil puisse voir (lorsqu'il accomode au maximum). Pour un œil emmétrope, le P.P. se situe à une distance $d_{PP} \simeq 25 \text{ cm}$.

**Application n°1 : Plage d'accommodation de l'œil**

▷ On considère un œil emmétrope qui perçoit des rayons lumineux provenant d'un objet situé au *punctum remotum*, puis d'un objet situé au *punctum proximum*. Le but de cette application est de déterminer la plage d'accommodation de l'œil définie par $\Delta V = V_{\max} - V_{\min}$ où $V_{\max}$ désigne la vergence du cristallin lorsque celui-ci est au maximum de son accommodation et $V_{\min}$ la vergence du cristallin lorsque celui-ci est au repos.



Cas n°1 : Objet situé au P.R.



Cas n°2 : Objet situé au P.P.

- Q 1.** Indiquer en quoi les schémas optiques des cas n°1 et n°2 permettent-ils d'affirmer que l'œil a accommodé.
- Q 2.** Tracer la marche des rayons lumineux pour un objet situé au P.R. puis pour un objet situé au P.P. Que se passerait-il si le cristallin n'avait pas accommodé entre le cas n°1 et le cas n°2 ?
- Q 3.** Déterminer l'expression de ΔV en fonction des données du problème. Faire l'application numérique.

Données :

- $d = 17 \text{ mm}$ (distance cristallin-rétine d'un œil emmétrope) ;
- $d_{PP} = 25 \text{ cm}$ (P.P. d'un œil emmétrope) ;
- Relation de conjugaison de DESCARTES : $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$.

I. 3 - Limite de résolution angulaire/pouvoir séparateur

▷ Pour que l'œil distingue deux points différents d'un objet, il faut que leurs images se forment sur deux cellules différentes de la rétine.

**Définition n°3 : Pouvoir séparateur**

Il est assez intuitif que le pouvoir de résolution soit défini par un angle plutôt que par une longueur : on ne voit pas avec la même précision les objets éloignés et les objets proches.

Ordre de grandeur pour l'œil : environ 1 d'arc (= $1/60^\circ$ dans des conditions d'éclairage optimales).

**Application n°2 : Résolution de l'œil**

▷ Déterminer la hauteur h du plus petit objet que l'œil puisse distinguer à une distance $d = 25 \text{ cm}$, 5 m et 100 m .

I. 4 - Hauteur apparente/diamètre apparent

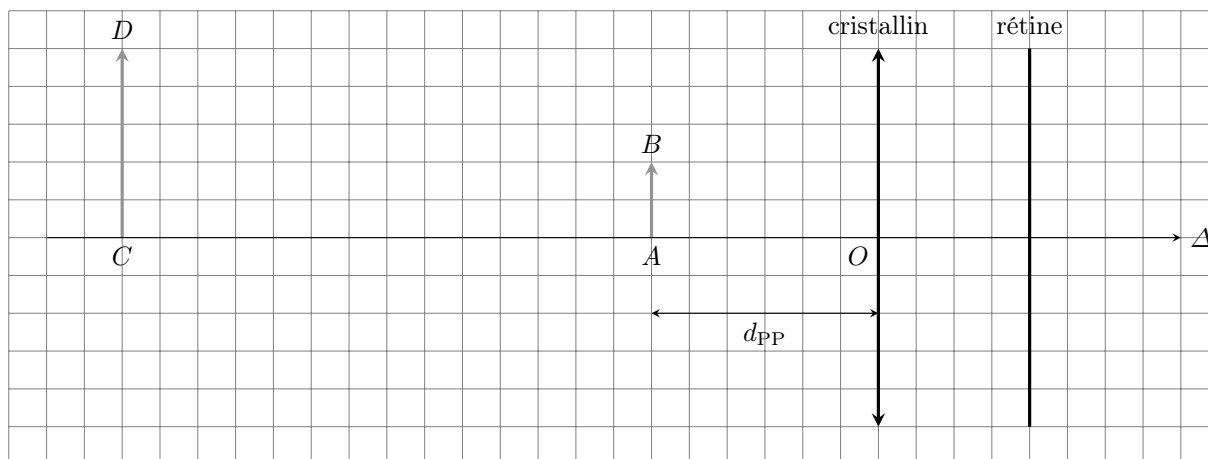
▷ La taille d'un objet observé à l'œil n'est pas directement reliée à sa taille réelle : vous pouvez recouvrir le visage de votre voisin simplement en regardant votre pouce.

**Application n°3 : Illustration de la notion de hauteur apparente**

▷ Fermez l'un de vos deux yeux et mettez votre pouce à l'endroit de votre P.P., ensuite, prenez un stylo avec l'autre main et éloignez-le en tendant le bras.

Q 1. Indiquer quel objet vous paraît être le plus grand.

Q 2. Compléter la marche des rayons lumineux provenant du pouce modélisé par l'objet AB ainsi que ceux du stylo modélisé par CD lorsque l'image de chacun de ces deux objets se forme sur le cristallin.



Q 3. Le tracé des images de AB et CD par l'œil confirme-t-il votre perception ? Indiquer alors un paramètre pertinent pour décrire la hauteur d'un objet.

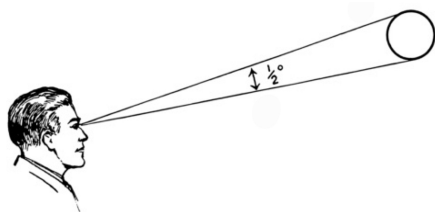
**Définition n°4 : Hauteur apparente/diamètre apparent****Remarque**

FIGURE 3 – Diamètre apparent de la Lune

Ordre de grandeur : le diamètre apparent de la Lune ou du Soleil observés à l'œil nu est de l'ordre de $0,5^\circ$. Pour des astres plus lointains/et ou plus petits, l'unité usuelle est la minute d'arc : $1' = 1^\circ/60$, donc $0,5^\circ = 30'$.

I. 5 - Défauts de l'œil

▷ On avait déjà vu dans le chapitre O2 le défaut d'astigmatisme de l'œil. Il en existe d'autres.

- Le défaut le plus commun est celui de l'œil myope, le cristallin est trop convergent (ou bien l'œil est trop grand ($d > 17$ mm)), l'image d'un objet à l'infini observé sans accommodation se fait alors avant la rétine. Le P.P d'un œil myope est plus proche de l'œil que celui d'un œil normal. Le P.R d'un œil myope n'est pas à l'infini mais à une distance finie. La correction de ce défaut se fait par l'ajout devant l'œil d'une lentille divergente afin de déplacer l'image sur la rétine pour qu'elle soit nette.
- Un œil hypermétrope possède un cristallin qui n'est pas assez convergent. L'œil doit donc accommoder pour voir à l'infini sinon l'image se forme derrière la rétine. Le P.P. est plus éloigné que pour l'œil normal. Il faut rendre l'œil plus convergent donc la correction se fait par l'utilisation d'une lentille convergente.

II. L'appareil photographique

II. 1 - Description et modélisation

▷ L'appareil photo est constitué :

- d'un objectif : association d'un diaphragme circulaire ($\mathcal{D}$) de diamètre D et d'une lentille convergente ($\mathcal{L}$) de distance focale image $f' = \overline{OF'}$ (en réalité il y en a plusieurs mais on en considère une seule) ;
- d'un capteur ($\mathcal{C}$), composé de cellules photosensibles, appelés pixels de grain g . Dans un appareil photo numérique, le capteur est un capteur CCD ou CMOS qui transforme le signal lumineux en signal électrique. Un convertisseur analogique/numérique convertit ce signal en données binaires qui sont alors conservées sur le support de stockage de l'appareil (carte mémoire amovible) ;



Remarque

▷ Quand un objectif fait la mise au point sur un point précis de la scène, ce point est reproduit sur le capteur (ou la pellicule) comme un point net, infiniment petit. Mais tous les autres points de la scène, situés devant ou derrière le plan de mise au point, ne convergent pas exactement sur le capteur : ils forment à la place un petit disque flou. Ce disque, c'est le **cercle de confusion** : il doit être de diamètre **inférieur ou égal** au grain g du capteur. ❤

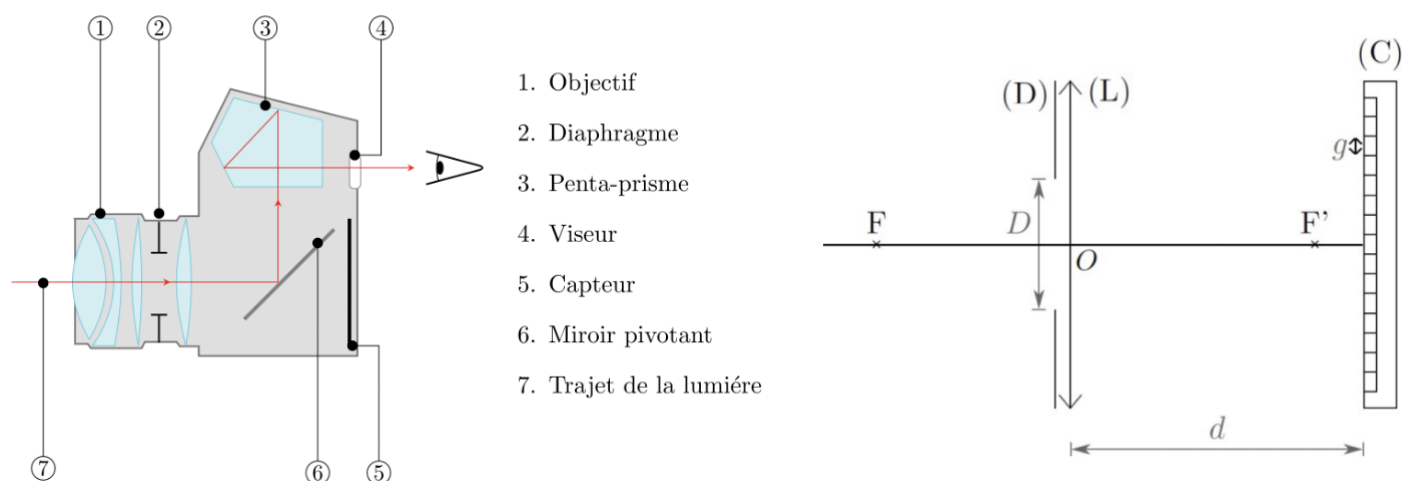


FIGURE 4 – Appareil photographique + modèle simplifié

▷ Pour un appareil photo, il est possible de modifier à volonté la distance entre le capteur et l'objectif : c'est ce que l'on appelle **mise au point**. La mise au point consiste alors à régler d la distance objectif-capteur, qui varie entre f' et $f' + \delta$ afin que l'image de l'objet soit nette.

Pour faire une photo convenable, il faut régler la distance de mise au point (=distance d entre la lentille et le capteur

pour qu'un point objet A forme son image sur un pixel), le diamètre du diaphragme, la focale de la lentille de l'objectif et le temps d'exposition : cela fait beaucoup de paramètres. Ils influencent notamment la profondeur de champ.

II. 2 - Profondeur de champ d'un appareil photo



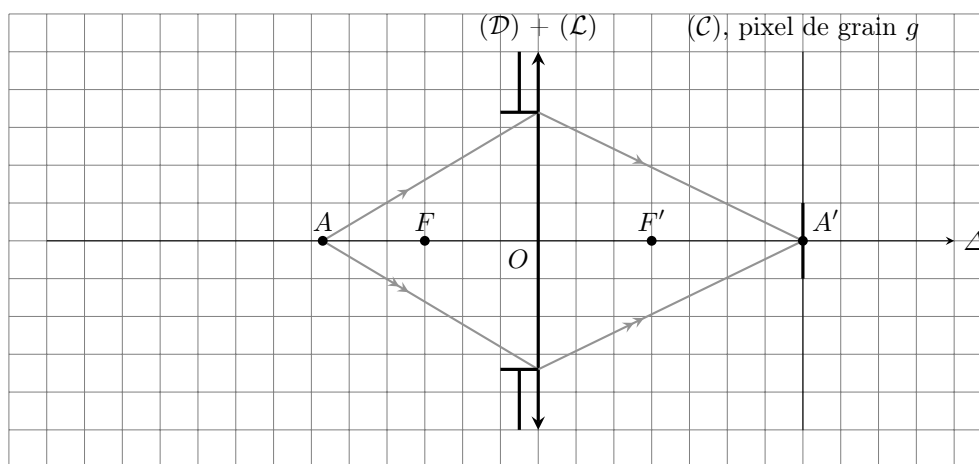
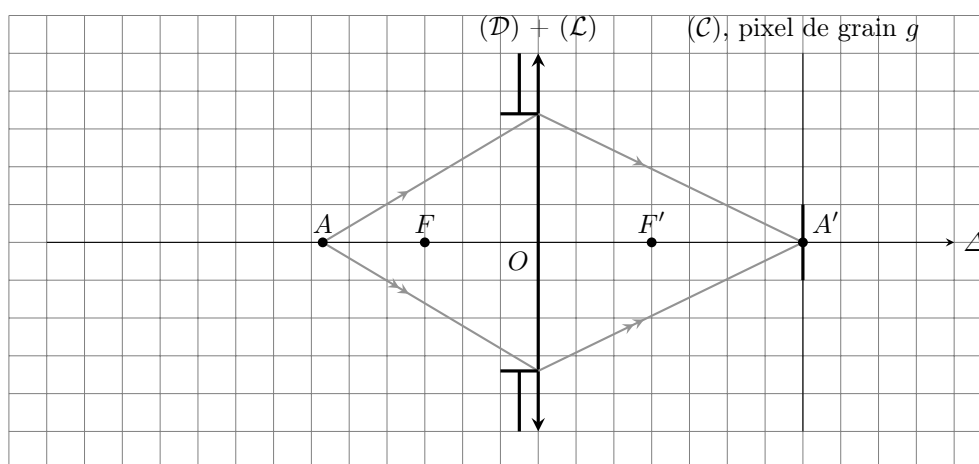
Définition n°5 : Profondeur de champ

▷ Il faut respecter une condition de stigmatisme approché : le diamètre d'un point image doit être inférieur au diamètre du cercle de confusion qui est inscrit dans une cellule optique élémentaire (pixel).



Application n°4 : Construction graphique de la profondeur de champ d'un appareil photo

▷ On considère un appareil photo modélisé par un système optique tel qu'explicité ci-avant. Après avoir effectué la mise au point, le point objet A a pour image le point A' au centre d'un pixel de grain g situé sur l'axe optique.



- Q 1. Notons A_1 le point de l'axe optique dont l'image A'_1 est située la plus loin derrière le capteur tout en apparaissant nette. Sur le schéma du haut, placer A'_1 puis construire son antécédent A_1 par l'objectif. ♥
- Q 2. Notons A_2 le point de l'axe optique dont l'image A'_2 est située la plus loin devant le capteur tout en apparaissant nette. Sur le schéma du bas, Placer A'_2 , puis construire son antécédent A_2 par l'objectif. ♥
- Q 3. En déduire la profondeur de champ de l'appareil photo en combinant les deux schémas. ♥

II. 3 - Influence de paramètres sur la formation des images dans un appareil photo

Nous observons, à l'aide de photographies, l'influence de divers paramètres sur la formation d'images.

II. 3. a) Influence de la distance focale

La distance focale agit sur :

- Le champ angulaire (=le champ de vision de la photo) **qui est d'autant plus large que la distance focale est petite** ;
- La profondeur de champ qui est d'autant plus grande que la focale est petite.



FIGURE 5 – Photographie du même objet avec un objectif de distance focale f variant entre 17 mm et 400 mm.

II. 3. b) Influence de la durée d'exposition/temps de pose

La **durée d'exposition** (ou temps de pose) est la durée pendant laquelle la lumière arrive sur le capteur. La durée d'exposition influe sur la luminosité de l'image.

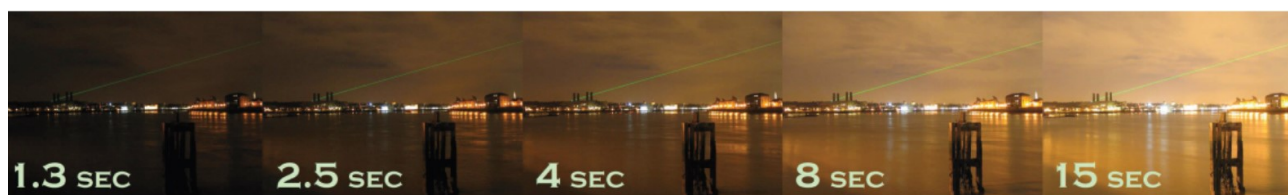


FIGURE 6 – Photographie de Greenwich de nuit pour différents temps de pose entre 1,3 s et 15 s



Remarque

Il faut faire attention à ne pas décaler l'appareil photo lorsque la durée d'exposition est grande : un "flou de bougé" peut alors intervenir et détériorer l'image.

II. 3. c) Ouverture du diaphragme

- La profondeur de champ est d'autant plus importante que le diamètre du diaphragme D est petit (ou nombre d'ouverture faible) ;
- La luminosité est d'autant plus importante que la diamètre du diaphragme D est grand (ou nombre d'ouverture faible).

**Remarque**

La durée d'exposition et l'ouverture du diaphragme doivent être réglées simultanément pour que le capteur reçoive une quantité de lumière convenable. Il faut trouver un **compromis** entre luminosité et profondeur de champ.

III. Lunette astronomique

**Un peu d'histoire...**

La lunette astronomique fut inventée au début du XVII^e siècle, rapidement perfectionnée par Galilée en 1609. Cet instrument permit des découvertes majeures : les satellites de Jupiter, les phases de Vénus, les reliefs de la Lune et une vision plus précise de la Voie lactée. Ces observations remettaient en cause le système géocentrique et confirmaient l'héliocentrisme copernicien. Toutefois, la lunette présente des limites techniques, notamment les aberrations chromatiques et la difficulté d'agrandir les lentilles. De nos jours, les télescopes à miroirs dominent la recherche scientifique, tandis que la lunette reste prisée des astronomes amateurs pour sa simplicité.

III. 1 - Intérêt pratique

► Pour observer des objets lointains comme des astres par exemple, il faut créer un système capable de faire une image à l'infini d'un objet à l'infini. Le but de créer une image à l'infini permet à l'œil de ne pas accommoder (voir application n°1 du chapitre O3).

**Définition n°6 : Système optique afocal**

► Le but d'une lunette astronomique est d'augmenter la valeur du diamètre apparent : elle grossit la valeur de l'angle duquel on perçoit l'objet observé comme représenté ci-dessous. On note α l'angle formé entre les rayons provenant de A_∞ et de B_∞ . On remarque que $\alpha' \gg \alpha$. L'œil perçoit alors une image grossie par rapport à l'objet lorsqu'il le visualise à travers la lunette astronomique.

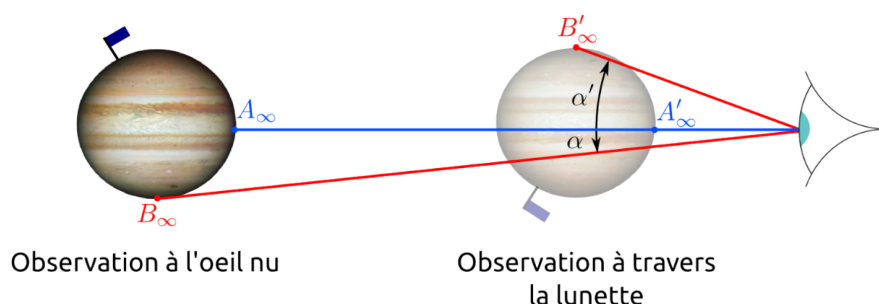


FIGURE 7 – Observation de Jupiter avec et sans lunette astronomique

III. 2 - Modélisation



FIGURE 8 – Lunette astronomique

Une lunette astronomique est composée de deux entités distinctes :

- **un objectif** (côté objet), par lequel entre la lumière : c'est un dispositif à plusieurs lentilles, modélisable par une unique lentille convergente ($\mathcal{L}_1$) de grande focale f'_1 de l'ordre de 1 m pour une lunette amateur ;
- **un oculaire** (côté œil), par lequel sort la lumière : dispositif modélisable par une unique lentille convergente ($\mathcal{L}_2$) de petite focale f'_2 de l'ordre de 1 cm.

Il va falloir connaître par cœur l'application qui va suivre : tracés des rayons lumineux à travers la lunette astronomique et calcul du grossissement.

III. 3 - L'exercice-type classique à maîtriser sur le bout des doigts

Application n°5 : Observation de la grande tache rouge de Jupiter à travers une lunette astronomique

▷ La grande tache rouge de Jupiter est une gigantesque tempête située dans l'atmosphère de la planète Jupiter. Observée depuis plus de 300 ans, elle apparaît comme une vaste zone ovale rougeâtre plus grande que la Terre. Cette tempête correspond à un immense anticyclone où les vents peuvent dépasser 400 km/h. Les astronomes l'étudient afin de mieux comprendre la dynamique de l'atmosphère des planètes géantes. Malgré sa distance de plus de 600 millions de kilomètres de la Terre, la grande tache rouge peut être observée avec des instruments astronomiques adaptés.



FIGURE 9 – Grande tache rouge de Jupiter

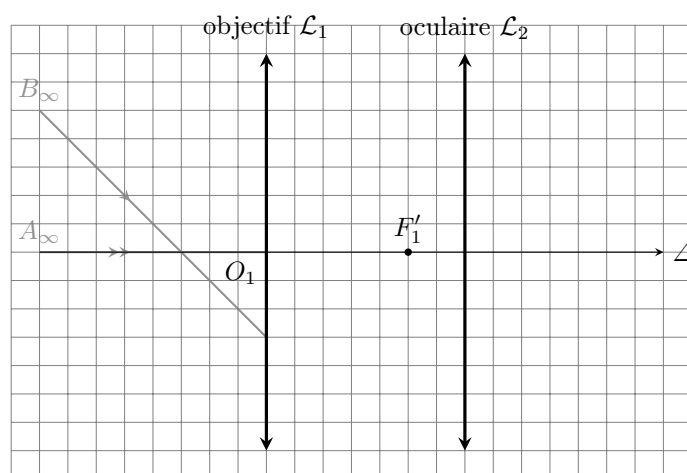
Un astronome souhaite observer la grande tache rouge de Jupiter depuis la Terre. Tout d'abord, l'astronome tente d'observer Jupiter dans le ciel à l'œil nu lors d'une belle nuit d'été. On se placera dans les conditions de GAUSS.

Q 1. Indiquer, en justifiant la réponse si l'astronome amateur est en mesure d'observer la grande tache rouge de Jupiter à l'œil nu.

Q 2. L'astronome décide maintenant observer la grande tache de Jupiter à l'aide d'une lunette astronomique composée de deux lentilles minces convergentes $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{L}_2$ de distances focales images que l'on notera f'_1 et f'_2 . Déterminer l'encombrement e de la lunette astronomique afin que celle-ci forme un système optique afocal. Placer le foyer objet de l'oculaire F_2 .

Indication : L'encombrement désigne la taille du système optique, ici on prendra en compte la distance séparant l'objectif de l'oculaire.

Q 3. Compléter la marche des rayons lumineux A_∞ et B_∞ issus de la tache centrale de Jupiter à travers la lunette astronomique représentée ci-dessous, puis faire apparaître les angles α et α' qui sont respectivement les angles que font les rayons lumineux en entrée et en sortie de la lunette astronomique avec l'axe optique. ♥



Q 4. Déterminer l'expression littérale du grossissement G de la lunette astronomique défini par $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ en fonction de f'_1 et f'_2 . ♥

Q 5. En déduire la valeur minimale de f'_2 pour observer convenablement la grande tache rouge de Jupiter à travers la lunette astronomique.

Données :

— Pouvoir séparateur de l'œil humain emmétrope : $\alpha = 3 \times 10^{-4}$ rad ;

- Distance Terre-Jupiter : $L = 6,3 \times 10^8$ km ;
- Diamètre de la grande tache rouge de Jupiter : $D = 1,5 \times 10^4$ km ;
- Distance focale de l'objectif : $f'_1 = 70$ cm.



À retenir :