

Chap.5 – Instruments d’optique (Cours - TD)

1. Modèle optique de l’œil

- 1.1. Quelques éléments d’anatomie de l’œil
- 1.2. Phénomène d’accommodation
- 1.3. Défauts de l’œil
- 1.4. Taille apparente d’un objet vu par l’œil
- 1.5. Pouvoir séparateur de l’œil

2. La loupe

- 2.1. Définition et intérêt
- 2.2. Comment utiliser une loupe ?
- 2.3. Latitude de mise au point
- 2.4. Performances
- 2.5. Pouvoir séparateur

3. La lunette

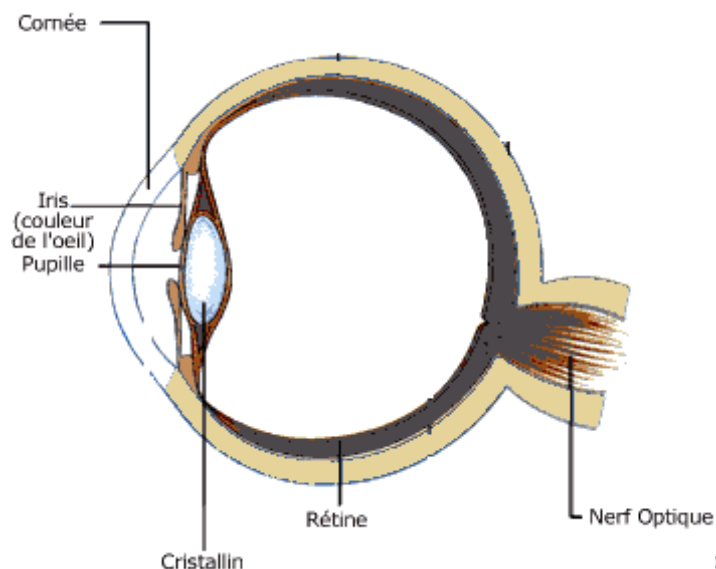
- 3.1. Eléments constitutifs
- 3.2. Lunette de visée à l’infini
- 3.3. Lunette (ou viseur) à frontale fixe

4. Le microscope

Intro :

Aucune des notions de ce chapitre n’est exigible. Cela signifie que les résultats ne sont pas à retenir par cœur, mais les raisonnements doivent être compris. Ce chapitre est une application des notions vues dans les chapitres précédents. L’étude d’un instrument d’optique peut faire partie d’une épreuve de concours.

Dans un premier temps, on va modéliser simplement le fonctionnement optique de l’œil. On abordera ensuite le plus simple des instruments d’optique : la loupe. On introduit alors les paramètres qui caractérisent les performances d’un instrument d’optique. Étudiés dans le cas de la loupe, ces résultats sont généralisables, et seront appliqués à l’étude des lunettes de visée et du microscope.



1. Modèle optique de l'œil

1.1. Quelques éléments d'anatomie de l'œil

L'œil est un système optique centré. On retiendra le rôle en optique des trois éléments suivants :

- *l'iris*, qui permet de contrôler la quantité de lumière incidente
- *le cristallin*, qui peut être assimilé à une lentille convergente de distance focale réglable
- *la rétine*, sur laquelle se forme l'image, et recouverte de cellules photosensibles

On modélisera l'œil comme l'association d'une lentille convergente (le cristallin) et d'un écran (la rétine). La distance entre les deux est fixe, c'est la vergence du cristallin qui peut être modifiée.

1.2. Phénomène d'accommodation

La vergence du cristallin peut varier : en se bombant, il devient plus convergent. *Cela nous permet (heureusement) de voir nets des objets situés à des distances différentes.* C'est ce que l'on appelle le phénomène d'accommodation.

Il est intéressant de connaître la distance minimale au-delà de laquelle on peut voir net, ainsi que la distance maximale en deçà de laquelle on peut voir net.

- **Punctum remotum** (*point éloigné*) : c'est le point (distance) le plus éloigné que l'on peut voir net. Pour voir net au PR, l'œil est *au repos*, il n'a pas besoin d'accommoder. Pour un « œil normal », le PR se trouve à *l'infini*. Au repos, l'œil voit net à l'infini : le plan focal image du cristallin se trouve alors sur la rétine.
- **Punctum proximum** (*point proche*) : c'est le point (la distance) le plus proche que l'on peut voir net. Pour voir net au PP, l'œil accommode au maximum. Pour un œil « normal », le PP est de l'ordre de *25 cm*.

Accommoder est fatiguant. C'est pourquoi les instruments d'optique qui aident l'œil « à mieux voir » (lunette astronomique, télescope, microscope) fournissent de l'objet initial une image à l'infini. Cette image est un objet pour l'œil, situé au PR de l'œil normal, et peut donc être observé sans accommoder, sans fatigue.

1.3. Défauts de l'œil

- **Myopie** : le cristallin est *trop convergent*. Son PR n'est pas à l'infini, mais à distance finie. Son PP est aussi plus proche. Un myope voit mal de loin. On corrige ce défaut grâce à une lentille divergente.
- **Hypermétropie** : le cristallin *n'est pas assez convergent*. L'œil doit accommoder pour voir à l'infini. Son PP est plus éloigné que celui d'un œil normal. Un hypermétrope voit mal de près. On corrige ce défaut à l'aide d'une lentille convergente.
- **Presbytie** : correspond au vieillissement du cristallin, qui se raidit et perd en partie sa faculté d'accommoder. Pas de conséquences pour la vision de loin, mais un presbyte ne voit plus de près.
- **Astigmatisme** : correspond à un défaut de symétrie de l'œil. L'œil n'est alors pas un système centré, et n'est pas un système stigmatique (l'image d'un point est une tâche).

1.4. Taille apparente d'un objet vu par l'oeil

Un stylo tenu à bout de bras apparaît plus grand qu'un stylo qui se trouve à une dizaine de mètres de l'œil. Il est clair que la *taille apparente* d'un objet vu par l'œil dépend de la taille réelle AB de l'objet et de la distance à laquelle il se trouve. Par construction graphique, on remarque que c'est l'*angle* formé par le rayon issu de B et passant par le centre optique du cristallin qui détermine la taille de l'image $A'B'$ formée sur la rétine (la taille apparente).

1.5. Pouvoir séparateur de l'oeil

Le pouvoir séparateur caractérise la capacité d'un système optique à *distinguer les détails* d'un objet, i.e. sa capacité à séparer deux points différents d'un objet. Un microscope est un instrument qui permet d'augmenter le pouvoir séparateur de l'œil : on peut alors voir de plus petits détails. De la même façon, une lunette astronomique ou un télescope permettent de distinguer deux étoiles très proches l'une de l'autre, là où l'œil ne voit qu'un seul point brillant.

Ce sont les caractéristiques de la surface photosensible qui déterminent le pouvoir séparateur d'un instrument d'optique :

- les pixels pour les appareils photo et les caméras numériques
- les grains de l'émulsion photographique sur une pellicule
- les cellules de la rétine pour l'œil

Le pouvoir séparateur est *un angle*, de l'ordre de $3 \cdot 10^{-4}$ rad pour l'œil. Pour un objet situé au PP d'un œil normal, cela correspond à des détails de l'ordre de $0,1$ mm.

2. La loupe

2.1. Définition et intérêt

Pour observer les détails d'un objet à l'œil nu, il faut placer l'objet le plus près possible de l'œil (au PP). L'œil doit alors accommoder au maximum, entraînant une certaine fatigue.

L'utilisation d'une loupe *augmente le pouvoir séparateur* de l'œil tout en permettant à l'œil, éventuellement, d'observer *sans accommoder*.

La loupe n'est rien d'autre qu'une lentille convergente que l'on place proche de l'objet, entre O et F , de manière à former une *image virtuelle droite agrandie*, qui est plus éloignée de l'œil que l'objet initial. Cette image est un objet pour l'œil.

2.2. Comment utiliser une loupe ?

Pour pouvoir utiliser une loupe, la première contrainte est d'obtenir une image à travers la loupe qui se trouve à une distance supérieure au PP. Sinon l'œil ne voit pas net.

Il existe deux façons un peu plus subtiles d'utiliser une loupe, selon l'usage que l'on souhaite en faire :

- *positionner l'objet AB dans le plan focal objet de la loupe* : l'image se trouve alors à l'infini, donc au PR de l'œil, qui n'a plus besoin d'accommoder. Cela convient aux utilisations prolongées, pour un objet fixe.
- *positionner l'œil dans le plan focal image de la loupe* : alors l'angle sous lequel est vue l'image est indépendant de la position de l'objet. Si l'on souhaite examiner un objet en le manipulant à la main, il n'est alors pas nécessaire d'essayer de le maintenir à distance constante.

2.3. Latitude de mise au point

La mise au point consiste à amener l'image $A'B'$ formée par la loupe entre le PP et le PR de l'œil, *en modifiant la distance entre l'objet et la loupe.*

Soit A_1 la position de l'objet telle que l'image se trouve au PP de l'œil.

Soit A_2 la position de l'objet telle que l'image se trouve au PR de l'œil.

La latitude de mise au point est par définition la distance A_1A_2 .

- Calculer dans le cas d'une loupe de focale 10 cm la latitude de mise au point, en supposant l'œil situé en F' .

2.4. Performances

○ Grossissement

Par définition, le grossissement G est le rapport entre l'angle θ' sous lequel est vu par l'œil l'image $A'B'$ formée par la loupe, et l'angle θ sous lequel est vu l'objet AB sans la loupe :

$$G = \frac{\theta'}{\theta}$$

Les angles sont comptés de l'axe optique vers le rayon lumineux considéré, et orientés selon le sens trigo. Un grossissement négatif signifie que l'objet vu par l'œil à travers un système optique (ici la loupe) est inversé par rapport à une vision à l'œil nu.

L'inconvénient de cette définition du grossissement est de dépendre des positions de l'objet AB , de la loupe et de l'œil. Ce n'est pas une grandeur intrinsèque à la loupe ; elle ne peut pas indiquer de manière fiable la performance d'une loupe.

○ Grossissement commercial

C'est par définition le grossissement considéré dans des conditions particulières :

- (pour θ') l'image $A'B'$ formée par la loupe se situe à l'infini (PR de l'œil)
- (pour θ) à l'œil nu, l'objet AB se situe à 25 cm (PP de l'œil)

Les conditions pour évaluer le grossissement commercial (noté G_c) étant fixées, c'est une caractéristique intrinsèque de la loupe.

○ Puissance

Par définition, la puissance P est le rapport entre l'angle θ' sous lequel est vu par l'œil l'image $A'B'$ formée par la loupe, et la taille de l'objet AB :

$$P = \left| \frac{\theta'}{AB} \right|$$

Comme le grossissement, c'est une grandeur qui dépend des positions de l'objet, de l'œil et de la loupe. Ce n'est pas une grandeur intrinsèque à la loupe.

○ Puissance intrinsèque

C'est par définition la puissance considérée dans des conditions particulières :

- l'image $A'B'$ formée par la loupe se situe à l'infini (PR de l'œil)

Les conditions pour évaluer la puissance intrinsèque (notée P_i) étant fixées, c'est une caractéristique intrinsèque de la loupe.

- Déterminer la puissance intrinsèque d'une loupe, ainsi que son grossissement commercial. Conclure. Qu'en est-il de la latitude de mise au point ?

2.5. Pouvoir séparateur

Exprimer le pouvoir séparateur de l'ensemble {loupe, œil} en fonction de la puissance intrinsèque de la loupe, puis en fonction de la distance focale de la loupe.

En conclusion, la loupe est d'autant plus puissante que sa distance focale est courte. On ne peut cependant utiliser des loupes de focale arbitrairement petite, à cause des aberrations chromatiques qui deviennent trop importantes. On utilise alors des associations de lentilles. Le microscope et la lunette astronomique en sont des exemples.

3. La lunette

3.1. Éléments constitutifs

Une lunette est constituée :

- d'un **objectif** situé du côté de l'objet ; c'est une lentille convergente L_1 qui donne de l'objet initial AB une image intermédiaire A_1B_1
- d'un **oculaire** situé du côté de l'œil ; c'est une lentille convergente L_2 qui donne de A_1B_1 une image finale $A'B'$
- d'un **réticule** (optionnel, 2 fils formant une croix) situé dans le plan focal de l'oculaire L_2 .

On souhaite observer l'image finale $A'B'$ à l'œil au repos : *on cherche donc à placer l'image intermédiaire A_1B_1 dans le plan focal objet de l'oculaire.*

Généralement, l'objectif est de grande distance focale, et l'oculaire de petite distance focale. L'oculaire sert alors de loupe pour grossir l'image intermédiaire.

On peut distinguer deux types de lunettes, selon que l'on cherche à observer un objet à distance finie ou infinie.

3.2. Lunette de visée à l'infini

Le principe d'une lunette de visée à l'infini est de former d'un objet à l'infini une image à l'infini. Exemple d'application : lunette astronomique.

Soit une lunette constituée d'un objectif (focale $f_1' = 10 \text{ cm}$) et d'un oculaire (focale $f_2' = 2 \text{ cm}$), la distance $D = O_1O_2$ entre les deux lentilles étant réglable.

- Déterminer D pour que le système soit afocal.
- Représenter la marche d'un rayon lumineux venant d'un point à l'infini dans une direction faisant un angle α avec l'axe optique.
- Calculer le grossissement de la lunette. L'image vue par l'œil est-elle droite ou inversée ?

NB : Afin de réduire l'encombrement (i.e. la longueur de la lunette, distance D), on peut utiliser comme oculaire une lentille divergente (lunette de Galilée), qui permet en outre d'obtenir une image vue par l'œil droite.

3.3. Lunette (ou viseur) à frontale fixe

Le principe d'un viseur à frontale fixe est de former d'un objet à distance finie une image à l'infini. Le système n'est donc pas afocal, il possède un foyer objet F . En pratique la distance entre l'objectif et l'objet est fixée, d'où le nom de « frontale fixe ». On cherche alors à modifier la distance $D = O_1O_2$ pour disposer le plan focal objet du système au niveau de l'objet à observer.

Soit un viseur à frontale fixe dont l'objectif et l'oculaire ont les mêmes caractéristiques que précédemment. On considère un objet situé à 20 cm devant l'objectif.

- Faire un schéma du dispositif
- Déterminer la valeur de D
- Calculer la puissance de la lunette.
- En effectuant un tracé des rayons lumineux, déterminer si l'image finale vue par l'œil est droite ou inversée.

4. Le microscope

Le principe d'un microscope est proche de celui d'un viseur à frontale fixe : *il donne d'un objet à distance finie une image à l'infini*. La seule différence est que la distance $F_1'F_2$, notée Δ et nommée *intervalle optique*, est fixée.

On considère un microscope dont l'objectif est de focale 1 mm et l'oculaire de focale 1 cm . L'intervalle optique est de 16 cm .

L'objet étant immobile, on effectue le réglage en déplaçant tout le microscope.

- L'objet étant immobile, et l'intervalle optique étant fixe, comment procéder pour obtenir une image intermédiaire située dans le plan focal objet de l'oculaire ?
- Donner alors la position de l'objet AB . Faire l'application numérique. Conclusion ?
- Déterminer la puissance intrinsèque en fonction de Δ , f_1' et f_2' .
- Déterminer le grossissement commercial du microscope en fonction du grandissement γ_1 de l'objectif et du grossissement commercial G_{c2} de l'oculaire.

NB : Le grandissement γ_1 de l'objectif et le grossissement commercial G_{c2} de l'oculaire sont les deux grandeurs qui sont inscrites sur les éléments d'un microscope.