

Fiche guide – Instruments d'optique

Cette fiche guide « Instruments d'optique » vous sera utile pour le TP O2. Elle contient l'essentiel de ce que vous devez savoir **et** savoir-faire. Vous n'y aurez pas le droit lors de l'examen de TP final. Les TP et les TP-cours de présentation sont destinés à vous permettre d'assimiler par l'expérience cette fiche.

Le glossaire à la fin récapitule quelques définitions importantes en relation avec les instrument d'optique.

QUELQUES RÉFÉRENCES :

- ⊗ « Optique expérimentale », Sextant. Excellent ouvrage concis, clair et précis sur toute l'optique par l'expérience.
- ⊗ « Optique géométrique », Bernard Balland (2007). Très bon ouvrage récent pour ceux qui cherche des détails exhaustifs sur l'imagerie et l'instrumentation optique classique.

1 L'œil

1.1 Description physiologique sommaire

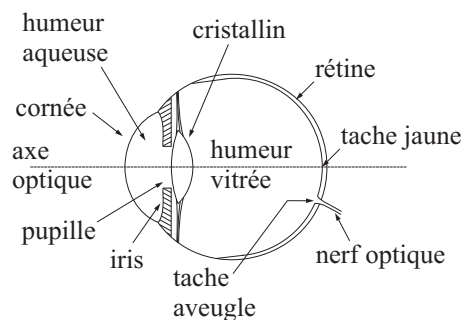


FIG. 1: Schéma physiologique de l'œil.

L'œil a sensiblement la forme d'un globe sphérique indéformable d'environ 25 mm de diamètre. Ce globe oculaire est complété de sa partie antérieure à sa partie postérieure par les éléments suivants :

- ⊗ La cornée, un dioptre transparent en forme de calotte sphérique dont le rayon est d'environ 8 mm et d'indice 1,33. La cornée absorbe les UV et les IR.
- ⊗ La chambre antérieure de l'œil dans laquelle se situe l'humeur aqueuse, un liquide transparent d'indice 1,336.
- ⊗ L'iris, qui est un diaphragme d'ouverture variable (entre 2 et 8 mm de diamètre environ). Le trou dans l'iris s'appelle aussi la pupille.
- ⊗ Le cristallin, un organe transparent et élastique ayant la forme d'une lentille biconvexe dont la convergence variable est commandée par les contractions de muscles ciliaires. La souplesse de déformation diminue avec l'âge (apparition d'hypermétropie). Le milieu constituant le cristallin est non homogène, avec un indice qui décroît de 1,437 au centre à 1,337 à sa périphérie, ce qui permet de diminuer les effets d'aberrations de sphéricité.
- ⊗ L'humeur vitrée remplit la seconde chambre, située à l'arrière du cristallin. Elle occupe 60% du volume du globe oculaire et a un indice de 1,336. La pression qui y règne est de l'ordre de 2 à 3 kPa.
- ⊗ Et enfin la rétine qui récolte la lumière et joue le rôle d'écran. La rétine est tapissée des photorécepteurs que sont les cônes (environ 7 millions) et les bâtonnets (environ 130 millions). Les bâtonnets sont surtout sensibles à de faibles éclaircissements (vision nocturne) et de faibles variations d'éclaircissements (perception du mouvement). Les cônes sont 200 fois moins sensibles à la lumière

que les bâtonnets, mais sont responsables de la vision des détails et sont sensibles aux couleurs (il existe trois variétés de cônes, chacune sensible à une gamme de couleurs). On distingue dans la rétine deux zones particulières : la *tache jaune* (de diamètre 2,5 mm) qui présente le maximum de sensibilité grâce à une densité de cône accrue (pour percevoir les détails, l'œil se tourne pour amener l'image dans cette zone ; la deuxième zone particulière est la *tache aveugle*, qui correspond au départ du nerf optique, et dans laquelle il n'y a donc pas de photorécepteurs.

1.2 Modèle simplifié de l'œil

On pourra modéliser en première approximation l'œil comme un système optique centré équivalent à une lentille mince convergente de distance focale variable (cristallin) et d'un écran (rétine) située à une distance constante de la lentille.

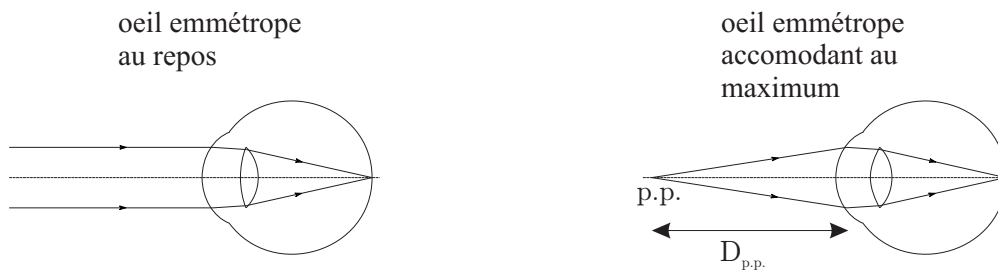


FIG. 2: Œil emmétrope au repos et en accommodation maximale.

Lorsque l'œil normal est au repos, l'image d'un objet à l'infini se forme sur la rétine. On dit que le *punctum remotum* (noté p.r.) est à l'infini. Lorsque l'objet se rapproche, l'image s'éloigne et l'œil doit accommoder pour voir net. La convergence du cristallin permet de ramener l'image sur la rétine. Cette accommodation physiologique n'est possible que jusqu'à une certaine distance minimale de l'œil (notée $D_{p.p.}$) dont la position est appelée *punctum proximum* (noté p.p.).

1.3 Défauts de l'œil

Un œil sans défaut est appelé emmétrope. Il voit net sans accommoder (donc sans fatigue) des objets à l'infini. Un œil non emmétrope est qualifié d'amétrope.

1.3.1 Défauts de convergence

- ⊗ **MYOPIE** : l'œil est myope lorsque le foyer image est en avant de la rétine. Il présente donc un excès de convergence. Le p.r. est ramené à distance finie tandis que le p.p. est un peu plus petit que pour un œil emmétrope.
- ⊗ **HYPERMÉTROPIE** : l'œil hypermétrope ne converge pas assez. Le p.p. est éloigné (on ne voit pas de près). Un œil hypermétrope accommode toujours, même pour un objet à l'infini.



FIG. 3: Œil myope et hypermétrope au repos.

La myopie comme l'hypermétropie se corrige à l'aide de lentille auxiliaire à rajouter devant l'œil. Dans le cas de l'œil myope, il faut rajouter une lentille divergente et dans le cas de l'œil hypermétrope, il faut rajouter une lentille convergente.

1.3.2 Autres défauts

- ⊗ PRESBYTIE : l'amplitude d'accommodation est sensiblement la même pour tous les individus de même âge, qu'ils soient emmétrope ou amétrope. Cependant, cette amplitude diminue avec l'âge du fait de la perte d'élasticité du cristallin. Qualitativement, la presbytie est déclarée lorsqu'on ne peut plus lire son journal. Elle se corrige avec des lunettes à verre progressif.
- ⊗ ASTIGMATISME : c'est un défaut de courbure de la cornée et du cristallin (il n'y a plus de symétrie de révolution autour de l'axe optique). L'image d'un point n'est plus un point, même dans les conditions de Gauss. Ce défaut se corrige à l'aide de lentilles plan-cylindriques ou torique présentant le même défaut que l'œil mais en sens inverse.
- ⊗ CATARACTE : c'est une opacité ou une lésion du cristallin, qui mène à une cécité partielle ou totale. Ce défaut ne se corrige pas, mais on peut enlever totalement le cristallin. L'œil perd alors toute son accommodation et devient très hypermétrope.

1.3.3 Pouvoir de résolution

La limite de résolution angulaire ε est la plus petite distance angulaire qui doit exister entre deux objets placés au punctum proximum pour qu'ils soient vus séparés par l'œil (leur image rétinienne étant séparée). Cette limite de résolution dépend de l'ouverture de la pupille et est au minimum de l'ordre de 1 minute d'arc (environ 10^{-4} radian). Les différents phénomènes physiques limitant cette résolution sont représentés sur la figure COURBE 10.26. en fonction de la taille de la pupille.

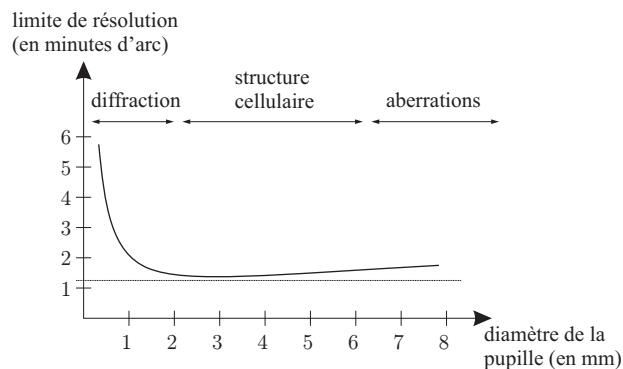


FIG. 4: Pouvoir de résolution en fonction de l'ouverture de la pupille. Les phénomènes physiques limitant sont notés en fonction de l'ouverture. À faible ouverture, c'est la diffraction par la pupille qui domine, à plus haute ouverture c'est la taille des détecteurs, alors qu'à plus haute ouverture encore, ce sont les défauts géométriques.

2 Loupe

La loupe est une lentille convergente de courte focale qui donne d'un petit objet réel AB une image virtuelle A'B' (ou à l'infini) plus grande que l'objet. C'est l'instrument optique le plus simple pour augmenter le pouvoir séparateur de l'œil.

2.1 Utilisation de la loupe en image à l'infini

Lorsque l'objet est situé au point focal objet de la loupe, tous les rayons ressortent parallèles. Cette situation présente deux avantages :

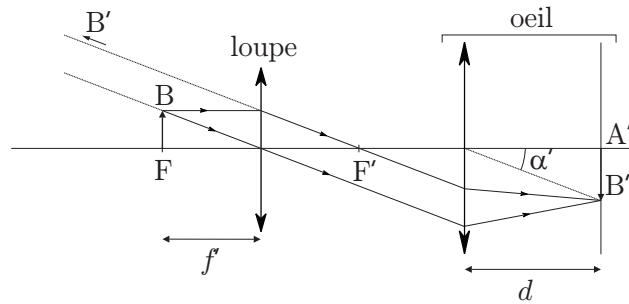


FIG. 5: Principe de la loupe réglé en image à l'infini.

1. L'image se situe au p.r., donc l'œil n'accommode pas et peut ainsi observer longtemps sans se fatiguer.
2. Lorsque l'œil se déplace le long de l'axe optique, l'angle α' sous lequel il voit l'objet ne varie pas, ainsi le diamètre apparent de l'objet ne dépend pas de la position de l'observateur et vaut

$$\alpha' \simeq \frac{AB}{f'_{\text{loupe}}} = \frac{A''B''}{f'_{\text{œil}}}$$

où $A''B''$ est l'image se formant sur la rétine de l'œil.

2.2 Puissance et grossissement

Dans le cas d'un image à l'infini, on voit que la puissance se réduit à la puissance intrinsèque $P_i = 1/f'_{\text{loupe}}$. De plus, d'après la relation puissance/grossissement rappelé dans le formulaire à la fin,

on voit que le grossissement conventionnel s'écrit $G_c = \frac{D_{\text{p.p.}}}{f'_{\text{loupe}}}$

Ainsi, une loupe est d'autant plus puissante que sa distance focale est petite. En pratique, les loupes ont une puissance intrinsèque qui se situe entre 10 et 50 dioptries, ce qui donne un grossissement commercial ($D_{\text{p.p.}} = 25 \text{ cm}$) situé entre 2,5 et 12,5. Pour des puissances plus grandes, la mise au point est trop difficile et les aberrations deviennent trop importantes, il vaut mieux construire un microscope.

2.3 Latitude de mise au point

Pour être vu nettement, l'image doit être entre le p.r. et le p.p. de l'œil. Ces deux positions limites de l'image définissent la profondeur de champ. Les positions de l'objet correspondant définissent la latitude de mise au point.

On voit sur la figure 6, en utilisant les relations de conjugaison de Newton, que la latitude de mise au point ℓ vérifie

$$\ell(f'_{\text{loupe}} + D_{\text{p.p.}} - D_0) = f'_{\text{loupe}}{}^2$$

Donc pour un œil au foyer image, $D_0 = f'_{\text{loupe}}$, et ainsi

$$\ell = \frac{f'_{\text{loupe}}{}^2}{D_{\text{p.p.}}} = \frac{1}{P_i^2 D_{\text{p.p.}}}$$

On voit que plus une loupe est puissante, plus la latitude de mise au point rétrécit. Si la loupe est peu puissante, on peut la tenir à la main, sinon il faut la fixer sur un support rigide.

3 Microscope

L'association de deux lentilles permet de limiter les aberrations par rapport à une seule loupe de même puissance (en tout cas au delà de 30 dioptries de puissance).

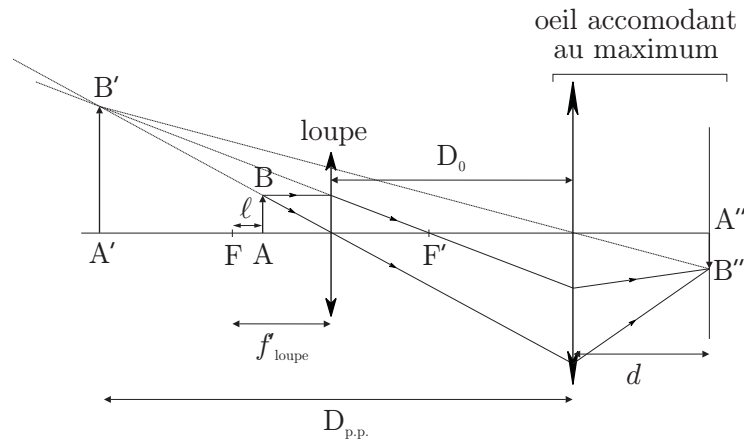


FIG. 6: Latitude de mise au point.

3.1 Mise en place du microscope

3.1.1 Construction de l'image définitive

L'objectif permet de faire d'un petit objet réel une image intermédiaire réelle et agrandie, puis cette image intermédiaire est vue par l'oculaire qui se comporte comme une loupe et envoie l'image finale à l'infini pour une vision sans accommodation par un œil emmétrope.

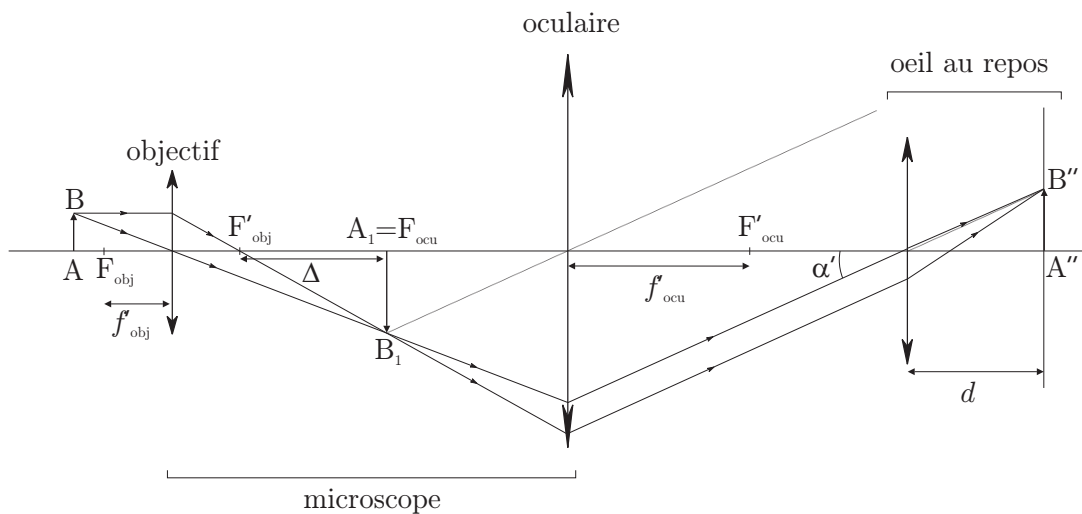


FIG. 7: Microscope.

L'objectif et l'oculaire sont solidaire, la mise au point consistant à déplacer l'objet AB par rapport à l'objectif de façon à envoyer l'image à l'infini. On impose généralement la distance $\Delta \equiv F'_{obj}F'_{ocu}$, qu'on appelle intervalle optique (ou encore longueur optique) du microscope.

3.1.2 Lentille équivalente

En utilisant les relations de conjugaisons, on montre que l'association de ces deux lentilles (non accolées) se ramène à une lentille équivalente de focale

$$f'_{eq} = -\frac{f'_{obj}f'_{ocu}}{\Delta} < 0$$

Le microscope est donc un système optique divergent ($f' < 0$). Le foyer objet équivalent F'_{eq} peut être obtenu en appliquant les relations de conjugaison de Newton

$$\overline{F_{\text{obj}}F_{\text{eq}}}\overline{F'_{\text{obj}}F'_{\text{eq}}} = -f'_{\text{obj}}{}^2 \quad \text{donc} \quad \overline{F_{\text{obj}}F_{\text{eq}}} = -\frac{f'_{\text{obj}}{}^2}{\Delta} < 0$$

Le foyer objet est donc situé avant le foyer de l'objectif. Dans la pratique, $f'_{\text{obj}} \ll \Delta$, donc le foyer objet est quasiment confondu avec le foyer objet de l'objectif.

On montre de même que le foyer image F'_{eq} est situé après le foyer image de l'oculaire et est tel que

$$\overline{F'_{\text{obj}}F'_{\text{eq}}} = \frac{f'_{\text{obj}}{}^2}{\Delta} > 0$$

3.1.3 Le cercle oculaire

Le cercle oculaire est l'image de l'objectif (ou du diaphragme d'ouverture si un diaphragme est disposé devant l'objectif) par l'oculaire. Tous les rayons émergents passent par ce cercle oculaire, il définit l'endroit où mettre son œil pour recevoir le plus de lumière possible.

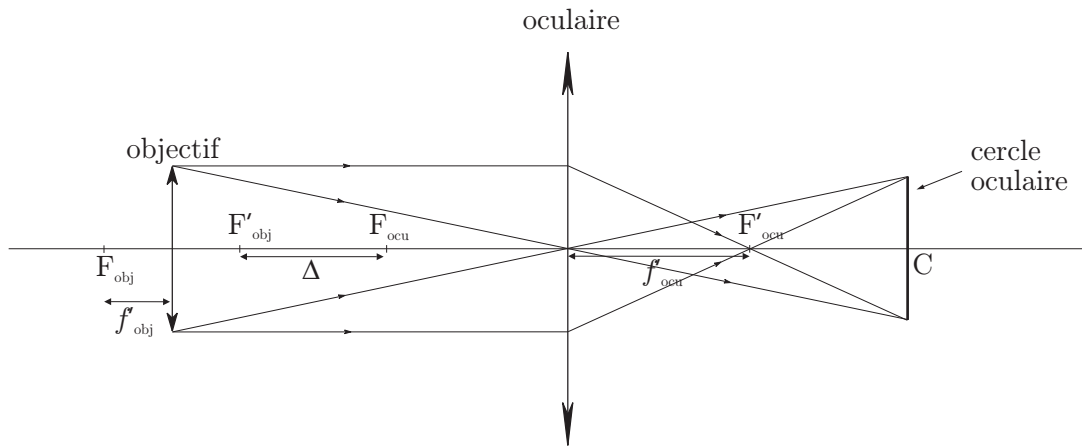


FIG. 8: Position du cercle oculaire.

- ⊗ Position du cercle oculaire : on note C le point d'intersection entre le cercle oculaire et l'axe optique. Les relations de conjugaison de Newton permettent de trouver $\overline{F'_{\text{ocu}}C}$, donc la position du cercle oculaire :

$$\overline{F'_{\text{ocu}}C} = \frac{f'_{\text{ocu}}{}^2}{f'_{\text{obj}} + \Delta}$$

- ⊗ Diamètre du cercle oculaire : sur le schéma, on voit que le diamètre d_{co} du cercle oculaire est donné par

$$d_{\text{co}} = d_{\text{obj}} \frac{\overline{F'_{\text{ocu}}C}}{f'_{\text{ocu}}} = d_{\text{obj}} \frac{f'_{\text{ocu}}}{f'_{\text{obj}} + \Delta}$$

3.2 Grandissement, puissance et grossissement commercial

- ⊗ Grandissement de l'objectif γ_{obj} : on a $\gamma_{\text{obj}} = p'/p$, donc en utilisant les résultats de la partie 3.1.2, on a

$$\gamma_{\text{obj}} = -\frac{\Delta}{f'_{\text{obj}}}$$

- ⊗ Puissance du microscope : la puissance du microscope s'écrit comme la puissance de l'oculaire que multiplie le grandissement de l'objectif,

$$P = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{\alpha'}{A_1B_1} \frac{A_1B_1}{AB} = \gamma_{\text{obj}} P_{\text{ocu}}$$

Le rôle de l'objectif est donc d'augmenter la puissance du simple oculaire.

- ⊗ Le grossissement commercial est relié à la puissance par l'expression redémontrée dans le formulaire ci-dessous

$$G_c = P D_{p.p.}$$

Glossaire : quelques rappels et définitions

- ⊗ ASSOCIATION DE DEUX LENTILLES MINCES : l'association de deux lentilles L_1 et L_2 accolées est équivalente à une lentille équivalente de distance focale f'_{eq} telle que

$$f'_{eq} = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2}$$

- ⊗ RELATIONS DE CONJUGAISONS DE NEWTON. On peut ré-écrire les relations de conjugaison habituelle à l'aide des quantités \overline{FA} et $\overline{F'A'}$ plutôt que p et p' . On montre facilement que

$$\overline{FA} \overline{F'A'} = -f'^2$$

- ⊗ VERGENCE D'UNE LENTILLE MINCE : c'est l'inverse de la distance focale f' ,

$$V = \frac{1}{f'}$$

- ⊗ GRANDISSEMENT LINÉAIRE : c'est le rapport algébrique entre la dimension de l'image et de son objet :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

Cette quantité n'a d'intérêt que si l'objet et l'image sont tous les deux réels (objectif d'appareil photo ou objectif de microscope).

- ⊗ DIAMÈTRE APPARENT : c'est le plus grand angle α entre les droites joignant l'œil d'un observateur à un objet. Pour un objet à l'infini, le diamètre apparent est la seule notion ayant un sens.



FIG. 9: Diamètre apparent sous lequel un observateur O voit un objet AB.

- ⊗ GROSSISSEMENT : c'est le rapport G du diamètre apparent α' d'un objet vu à travers un instrument d'optique par le diamètre apparent de ce même objet vu à l'œil nu

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

Cette quantité dépend de la distance de l'objet à l'observateur. Pour cette raison, on définira dans ce TP un grossissement conventionnel pour lequel l'angle α est défini dans les conditions les plus favorables, c'est-à-dire en mettant l'objet au p.p. de l'œil de l'observateur :

$$G_c = \frac{\alpha'}{\alpha_{max}}$$

Noter qu'il existe également une définition du grossissement commercial correspond à un œil standard dont le p.p. est situé à 25 cm de l'œil. C'est ce grossissement qui apparaît sur les objectifs de microscope par exemple ($\times 10$, $\times 50$ etc...).

- ⊗ PUISSANCE : c'est le rapport P entre l'angle α' sous lequel un objet est vu à travers un instrument optique, et la dimension linéaire AB de l'objet :

$$P = \frac{\alpha'}{AB}$$

La puissance s'exprime en dioptrie, comme la vergence ($1 \text{ d} = 1 \text{ m}^{-1}$). La relation entre la puissance et le grossissement est la suivante :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \simeq \frac{\alpha'}{AB/D} = PD \quad \text{donc} \quad G_c = PD_{p.p.}$$

Enfin, notons que la puissance dépend de la position de l'observateur, et n'est donc pas une quantité intrinsèque à l'instrument. Cependant, dans le cas où l'image est à l'infini, $\alpha' \simeq \frac{AB}{|f'|}$ et donc la puissance devient une quantité intrinsèque P_i valant la valeur absolue de la vergence

$$P_i = \frac{1}{|f'|}$$