

L.P. 32 - Microscopies optiques

Benjamin Marchetti

Niveau : 1er année CPGE

Pré-requis

- Optique géométrique
- Optique expérimentale
- Diffraction

Bibliographie

- Optique, José-Philippe Perez, *Dunod*
- H-prépa Optique 1er année, Brébec, *Hachette*
- Optique expérimentale, Sextant, *Hermann*
- Optique, Houard, *De Boeck*
- Exp. de physique (Optique), Bellier, *Dunod*
- BUP n.775 (1995)
- Composition physique agrég. opt. physique (2015)

Essayer de faire les manip pendant la présentation des chapitres en utilisant les valeurs obtenues !

Introduction

Dans son envie de comprendre le monde, l'homme a toujours voulu observer tout ce qui nous entoure. Des premiers microscopes simples de Van Leeuwenhoek au microscope à champ proche, des premières lunettes astronomiques de Galilée au télescope spatial Hubble, ces instruments ont connu des perfectionnements considérables. Ils sont tout à tour été le fruit où le moteur de découvertes fondamentales, comme il y a quelques semaines où des équipes de recherches des quatre coins du globe ont réussi à obtenir les premières images d'un trou noir en associant des télescopes du monde entier (de l'Europe au pôle Sud en passant par le continent américain) pour en créer un virtuellement de la taille de la Terre. Pour exemple, avec ce type d'instrument on pouvait de New-York savoir ce que lit sur le journal un habitant de Paris... quelle performance !

Dans cette leçon nous allons commencer par l'étude de la loupe puis nous focaliser sur le microscope : comment on caractérise ce système, quels sont les critères de performance de ce dernier et comment on peut reproduire son fonctionnement à l'aide de dispositif expérimental simplifié.

1. Le système (œil-loupe)

MANIP p.28 Sextant sur la loupe. Faire la manip en même temps que la présentation si possible.

1.1 Intérêt de la loupe

On le sait : pour mieux observer les détails d'un objet, celui-ci doit être placé au punctum proximum (PP) correspondant à la distance minimale de vision distincte $d_m = 25\text{cm}$. La conséquence est une fatigue importante de l'œil.

En regardant un objet à travers une lentille convergent ou une loupe, nous pouvons observer une image de diamètre angulaire plus grand nécessitant une accommodation moindre. Pour cela, il faut placer l'objet entre le foyer objet et la lentille. La loupe est utilisée le plus souvent avec un objet placé dans son plan focal objet. L'image est alors rejetée à l'infini. La position de l'œil est sans importance, mais plus l'œil est près de la loupe, plus les aberrations géométriques dues à la loupe sont négligeables (rayons proches de l'axe optique) car l'œil "sélectionne" les rayons peu inclinés par rapport à l'axe optique.

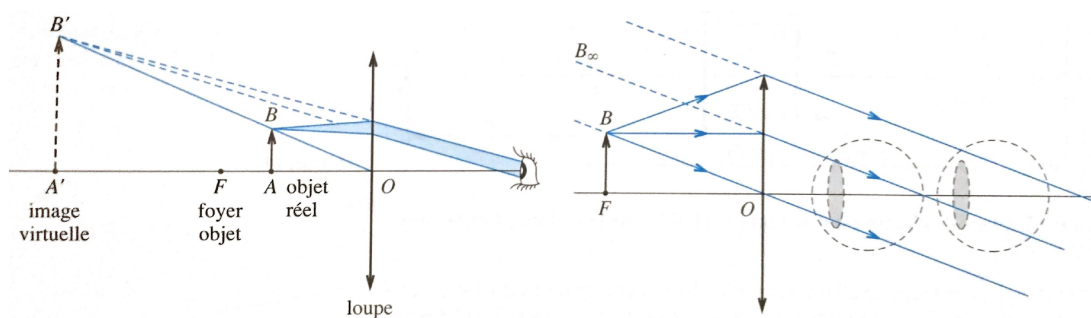


FIGURE 1 – (A gauche) Faisceau issu de B pénétrant dans l'œil. (A droite) Si l'objet est dans le plan focal objet de la lentille, la place de l'œil est indifférente. L'œil contre la lentille minimise les défauts d'aberration dus à la loupe (angles plus faibles).

Elle peut être aussi utilisée avec l'œil placé dans son plan focal image, car le diamètre angulaire de l'image est indépendant de la position de l'objet. En effet, l'angle θ' ne dépend que de la taille de l'objet AB ; il ne dépend donc pas de la position de cet objet.

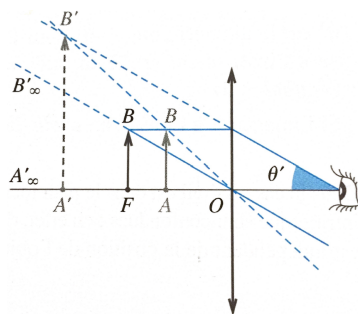


FIGURE 2 – Le diamètre angulaire de l'image ne dépend que de AB , quelque soit sa position si l'œil est dans le plan focal image de la loupe.

1.2 Profondeur de champ et performances

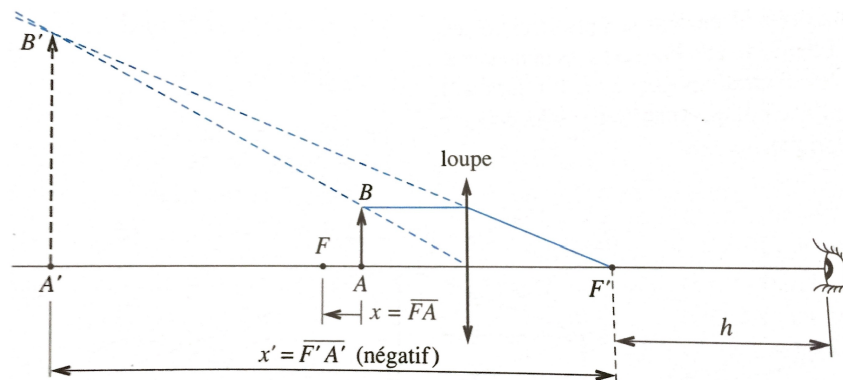
Profondeur de champ

Pour l'œil, l'image donnée par la loupe doit être entre le punctum proximum d_m de l'œil, et le punctum remotum (PR), situé à une distance D_m (distance infini pour un adulte).

La latitude de mise au point est l'intervalle des positions de l'objet tel que l'image soit

visible par l'œil.

La profondeur de champ, ou plus précisément profondeur d'accommodation, est la différence entre ces deux distances.



Soit f' la distance focale image de la loupe, h la distance œil-foyer image de la loupe et x la distance algébrique objet-foyer de la loupe.

La formule de conjugaison aux foyers des lentilles minces (formules de Newton) donne ($x = \overline{FA}$ et $x' = \overline{F'A'}$) $x = -\frac{f'^2}{x'}$, où x' est la distance algébrique image-foyer image de la loupe.

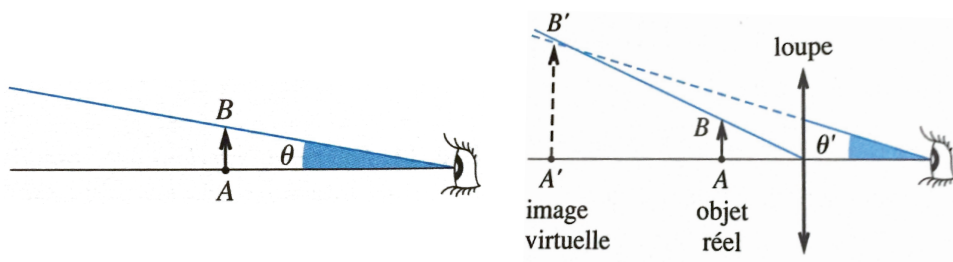
Donc x est compris dans le domaine $\left[\frac{f'^2}{D_m - h}, \frac{f'^2}{d_m - h} \right]$ à condition que h soit inférieur à d .

Pour $h = 0$ (œil au foyer image de la loupe), le domaine devient $\left[\frac{f'^2}{D_m}, \frac{f'^2}{d_m} \right]$. La profondeur de champ est alors :

$$\Delta p = f'^2 \left(\frac{1}{d_m} - \frac{1}{D_m} \right) \approx \frac{f'^2}{d_m} \quad (1)$$

La profondeur de champ est d'autant plus faible que la distance focale image est petite.

Performance



Grossissement

Le grossissement d'un instrument d'optique est défini par :

$$G = \left| \frac{\theta'}{\theta} \right| = \frac{AB/f'}{AB/d_m} = \frac{d_m}{f'} \quad (2)$$

où θ' est le diamètre angulaire sous lequel est vue l'image de l'objet à travers l'instrument et θ le diamètre angulaire sous lequel il est vu à l'œil nu.

Le grossissement commercial est défini pour une image vue au PR à travers l'instrument et un objet vu au PP à l'œil nu normal ($d_m = 25cm$).

Puissance

La puissance d'un instrument d'optique est définie par :

$$\mathcal{P} = \left| \frac{\theta'}{AB} \right| \quad (3)$$

où θ' est le diamètre angulaire sous lequel est vue l'image de l'objet à travers l'instrument et AB la taille de l'objet. Elle se mesure en dioptrie (δ). Si l'image est à l'infini, on parle de puissance intrinsèque \mathcal{P}_i .

Dans le cas où l'œil est dans le plan focal image de la loupe, puissance et puissance intrinsèque sont confondues ; en effet, dans ce cas, le diamètre angulaire de l'image est indépendant de la position de l'objet.

La puissance intrinsèque d'une loupe est égale à sa vergence :

$$\mathcal{P}_i = V = \frac{1}{f'} = \frac{1}{OF'} \quad (4)$$

Pouvoir séparateur du système

Soit un petit objet AB situé dans le plan focal objet de la loupe. Les images A' et B' , situées à l'infini de A et B , sont vues sous un écart angulaire $\theta' = AB/f' = \mathcal{P}_i AB$.

Appelons θ_m le pouvoir de résolution de l'œil ($\theta_m \approx 10^{-3}$ rad). Un objet est résolu par l'œil si $\theta' > \theta_m$. Le plus petit objet résolu avec la loupe a pour taille :

$$AB_{min} = \frac{\theta_m}{\mathcal{P}_i} \quad (5)$$

2. Le microscope

2.1 Historique

(facultatif)

Si le pouvoir grossissant des lentilles était connu depuis l'antiquité, l'idée de les utiliser de manière systématique pour observer la Nature ne s'est imposée qu'à la fin du XVI^e siècle. Ainsi, le premier microscope composé a été construit par les opticiens lunetiers hollandais Jansen père et fils vers 1590. Galilée lui-même en construisit un en 1610, mais son nom reste plutôt attaché à la lunette astronomique qu'il perfectionna en 1609.

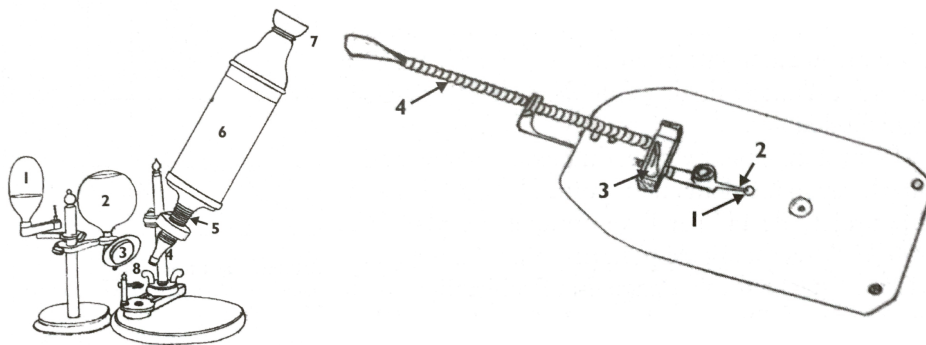
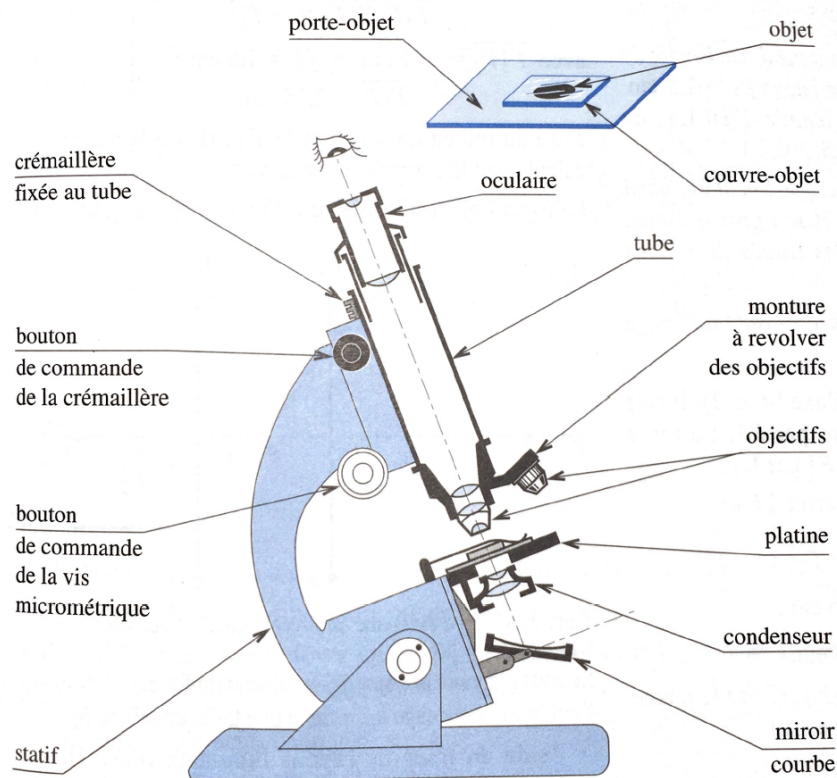


FIGURE 3 – (A gauche) Microscope composé de Hooke : 1. Lampe à huile, 2. Condenseur, 3. Lentille, 4. Objectif, 5. Vis de mise au point, 6. Tube, 7. Oculaire, 8. Spécimen. (A droite) Microscope simple de Van Leeuwenhoek : 1. Lentille sphérique sertie entre deux plaques, 2. Pointe échantillon, 3. Bouton de mise au point, 4. Vis de translation.

En 1665, l'anglais Robert Hooke publie *Micrographia*, dans lequel sont représentées des observations de poux, de cellules végétales, de champignons et de roches, réalisées avec un microscope composé à trois lentilles. Le système d'éclairage comportait une lampe à huile, un condenseur constitué d'un ballon d'eau et une lentille plan-convexe. La mise au point se faisait en déplaçant le tube du microscope par rapport à la platine porte-objet à l'aide d'une vis. L'optique comportait trois lentilles : une lentille objectif, une lentille oculaire et une lentille de champ disposée entre les précédentes. Les performances de son microscope étaient limitées par les aberrations chromatiques et géométriques cumulées à travers les différentes lentilles.

Un autre microscope fut inventé par Antonie Van Leeuwenhoek dont les meilleures grossissaient 500 fois et possédaient une résolution de l'ordre du micron ! Dans son microscope simple, la lentille unique était constituée d'une petite bille de verre sphérique possédant un rayon de l'ordre du millimètre, sertie dans une lame métallique. L'échantillon, placé sur une pointe, pouvait être déplacé devant la lentille, l'ensemble étant tenu très près de l'œil.

2.2 Description du microscope



Un microscope comprend deux systèmes optiques importants :

- L'objectif, placé près de l'objet à examiner, à une distance de l'ordre du millimètre, donne une image réelle renversée et agrandie de l'objet. Il est constitué d'un ensemble de lentilles. Ce système est construit de façon à être stigmatique¹ et aplanétique²

1. Un système optique est dit stigmatique pour deux points si l'ensemble des rayons lumineux issus d'un des points et traversant le système forment d'autres rayons lumineux dont les supports passent par le second point.

2. L'aplanétisme est une propriété des systèmes optiques dioptriques, catoptriques et catadioptriques capables, pour un objet étendu perpendiculaire à l'axe optique, de former une image perpendiculaire à l'axe optique.

pour cet objet, bien qu'il ne fonctionne pas dans l'approximation de Gauss. Pour cet objectif, les aberrations géométriques sont corrigées.

- L'oculaire, placé devant l'œil, donne une image virtuelle non renversée de l'image intermédiaire précédente. Cet oculaire est modélisable par une loupe. Les microscopes de qualité sont généralement constitués d'un oculaire de Huygens.

Ces deux systèmes sont maintenus à une distance pratiquement constante l'un de l'autre par un tube métallique.

L'ensemble objectif-oculaire peut se déplacer par rapport à l'objet examiné à l'aide d'une crémaillère commandée par un bouton de mise au point rapide et un bouton micrométrique.

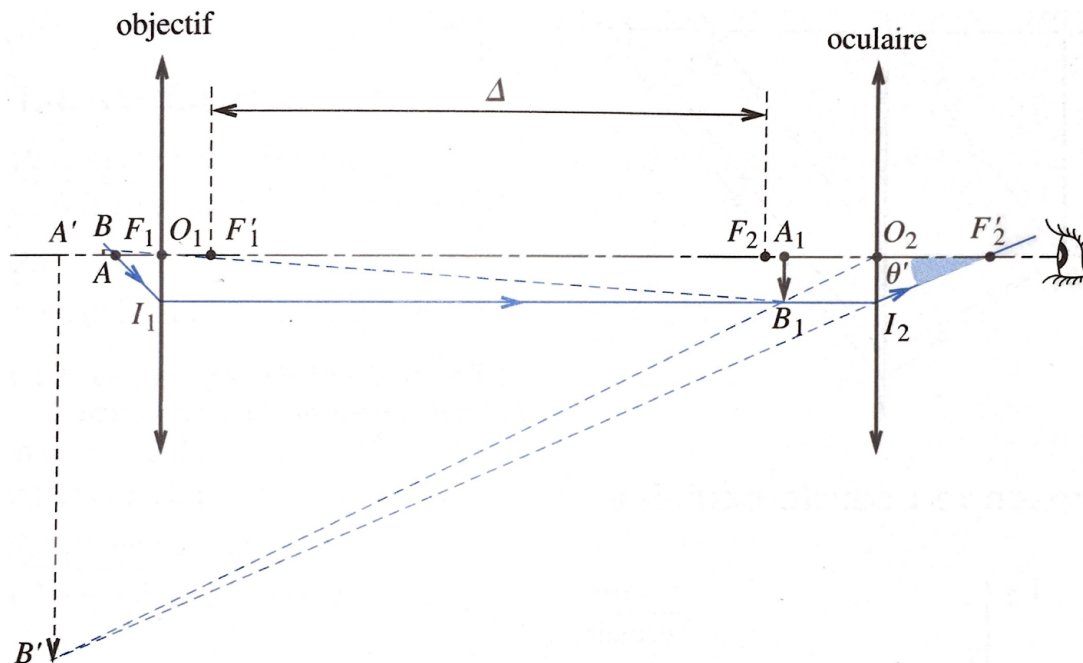
L'objet, placé entre une lame porte-objet et une lamelle couvre-objet, est posé sur la platine percée de façon à être éclairé.

Le microscope est l'association de deux systèmes convergents. Il donne une image virtuelle agrandie à l'infini d'un objet à distance finie.

2.3 Microscope simplifié

MANIP : Construire le microscope p.68 Bellier ou BUP n.775 ou Sextant p.30. Faire les calculs en même temps que les manip avec les grandeurs prises durant l'expérience.

Nous utilisons le schéma simplifié d'un microscope en assimilant l'objectif et l'oculaire à des lentilles minces convergentes.



Posons :

- f'_1 la distance focale image de l'objectif (de l'ordre du millimètre) ;
- f'_2 celle de l'oculaire (de l'ordre du centimètre) ;
- Δ la distance entre le foyer image F'_1 de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire (de l'ordre de 15cm)

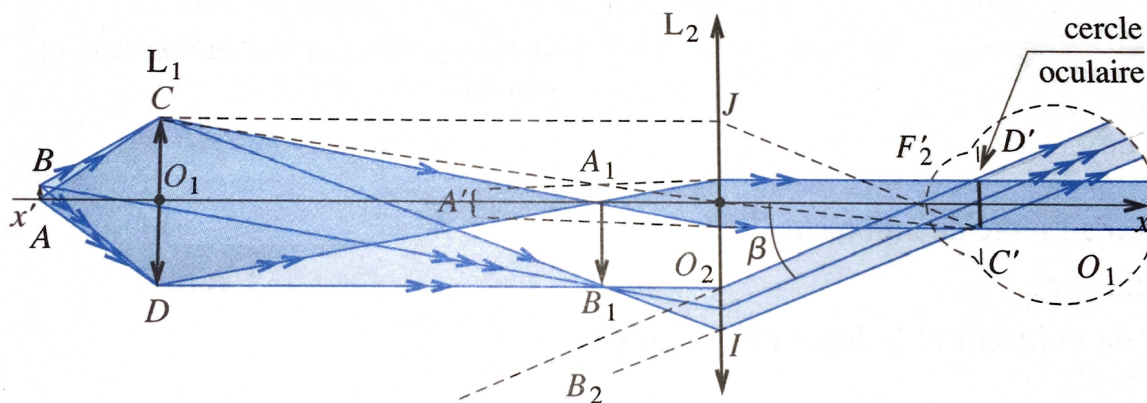
Nous avons les éléments conjugués suivants :

$$A \xrightarrow{L_1} A_1 \xrightarrow{L_2} A'$$

Examinons rapidement leurs places respectives :

- Place de A_1 : l'oculaire donne une image virtuelle A' de A_1 . A' doit être entre $d_m = 25\text{cm}$ et l'infini, devant l'œil placé au foyer image de l'oculaire. A_1 est donc à une distance inférieure à $\left| \frac{f_2'^2}{d_m} \right|$ (formule de Newton) : en prenant $f_2' = 1\text{cm}$, nous trouvons que A_1 doit être au maximum à environ 0.4mm de F_2 . A_1 est pratiquement en F_2 .
- Place de A : la distance $\overline{F_1'A_1}$ est égale à Δ (à 0.4mm près); Δ étant de l'ordre de 15cm, la distance $\overline{F_1'A}$ est donc $\frac{f_1'^2}{\Delta}$ qui est de l'ordre du micron. A est pratiquement en F_1 .
- Utilisation normale : A_1 doit coïncider avec F_2 pour que l'image finale soit rejetée (PR de l'œil normal). L'image finale est donc renversée en utilisation normale à l'infini.

2.4 Cercle oculaire



Les rayons lumineux issus des différents points de l'objet se concentrent après la traversée du microscope dans un cercle voisin du plan focal image de l'oculaire. Si la pupille de l'œil est placée au niveau de ce cercle, appelé cercle oculaire, elle reçoit un maximum de lumière et la largeur de champ est maximale.

La position C' du cercle oculaire peut être calculée par application de la formule de conjugaison :

$$-\frac{1}{O_2O_1} + \frac{1}{O_2C'} = \frac{1}{f_2'} \quad (6)$$

ou alors par la relation de Newton :

$$\overline{F_2'C'} = -\frac{f_2'^2}{\overline{F_2O_1}} \quad (7)$$

Cette dernière relation montre directement que la distance $\overline{F_2'C'}$ diminue quand la convergence de l'oculaire augmente. En bref, dans le cas d'un microscope réel, la position C' du cercle oculaire est très voisine du plan focal image de l'oculaire.

Rq : Calcul du rayon du cercle oculaire voir Bellier p.70.

2.5 Performance

On a déjà présenté dans la première partie les relations donnant le grossissement, le grossissement commercial et la puissance. On va les utiliser pour caractériser notre microscope simplifié.

Puissance

On sait que :

$$\mathcal{P} = \left| \frac{\theta'}{AB} \right| = \left| \frac{\overline{A_1B_1}}{AB} \right| \left| \frac{\overline{\theta'}}{\overline{A_1B_1}} \right| \quad (8)$$

où θ' est la taille angulaire de l'image vue par l'œil, \overline{AB} la taille de l'objet et $\overline{A_1B_1}$ la taille de l'image intermédiaire.

On en déduit alors :

$$\mathcal{P} = \gamma_1 \mathcal{P}_2 \quad (9)$$

où \mathcal{P}_2 est la puissance de l'oculaire et γ_1 le grandissement de l'objectif.

Or on sait que $\gamma_1 = -\overline{F_1F_2}/f_1' = -\Delta/f_1'$ et pour un œil observant à l'infini : $\mathcal{P}_2 = \mathcal{P}_{2i} = 1/f_2'$, donc pour l'œil accommodant à l'infini, la puissance intrinsèque est :

$$\mathcal{P}_i = \frac{\Delta}{f_1' f_2'} \quad (10)$$

Grossissement

Le grossissement commercial G_C est donné par :

$$G_C = \frac{\mathcal{P}_i}{4} \quad (11)$$

Remarquons que $G_C = |\gamma_1| G_{2C}$, avec $|\gamma_1| = \Delta/f_1'$ et $G_{2C} = 1/(4f_2')$.

Finalement le grossissement commercial G_C du microscope est le produit du grandissement $|\gamma_1|$ de l'objectif par le grossissement commercial G_{2C} de l'oculaire :

$$G_C = |\gamma_1| G_{2C} \text{ et } G_C = \frac{\mathcal{P}_i}{4}$$

Leurs valeurs $|\gamma_1|$ et G_{2C} sont gravées sur l'objectif et l'oculaire.

Pouvoir séparateur

Soit deux points A et B que nous désirons distinguer, ou séparer, à l'aide d'un microscope. La plus petite distance AB accessible est le pouvoir séparateur du microscope.

Deux phénomènes distincts limitent le pouvoir séparateur d'un microscope :

- **Le pouvoir de résolution de l'œil :**

Soit un microscope de grossissement commercial G_C . Le pouvoir de résolution de l'œil est de l'ordre de $\theta_m = 3.10^{-4}$ rad.

La dimension δ du plus petit objet observable est donnée par :

$$\delta = \frac{\theta_m}{\mathcal{P}_i} = \frac{\theta_m}{4G_C}, \text{ avec } \theta_m = 3.10^{-4} \text{ rad}$$

ex : Pour un grossissement de 100, nous avons une résolution de $0,75\mu\text{m}$.

– **Le caractère ondulatoire de la lumière :**

L'objectif du microscope se comporte comme un trou qui diffracte la lumière. L'image d'un point n'est pas un point mais une tache entourée d'anneaux (disques d'Airy). Il rend impossible la séparation de deux points A et B trop proches l'un de l'autre. Pour pouvoir séparer les deux points A et B , il faut que (critère de Rayleigh) :

$$AB \geq \frac{1,22\lambda}{2n \sin(u)} = \frac{0,64\lambda}{n \sin(u)}$$

où λ est la longueur d'onde dans le vide de la lumière utilisée, n l'indice du milieu dans lequel est l'objet et u l'angle d'ouverture de l'objectif, c.a.d l'angle entre l'axe optique et le rayon le plus incliné susceptible de traverser le système optique. Le produit $n \sin(u)$ est appelé ouverture numérique.

Rq : Un petit plus de détails dans Perez p.119

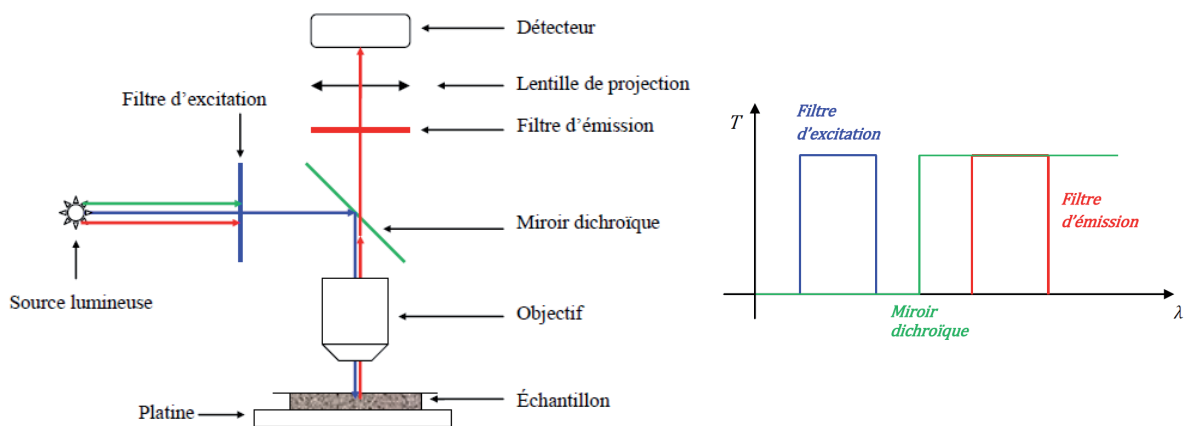
Rq : Soit N le nombre d'ouverture défini par $N = D/f'_1$, avec D le diamètre de l'objectif. L'angle d'ouverture u et le nombre N vérifient $\tan(u) = N/2$.

Pour un objectif courant, $n = 1$ et $N \approx 1$. Nous remarquerons que l'objectif ne travaille pas dans l'approximation de Gauss : $\tan(u) = 0,5$ donne $u \approx 27^\circ$. Dans ces conditions, le pouvoir de résolution vaut $0,7\mu\text{m}$ pour $\lambda = 0,5\mu\text{m}$. Il est donc inutile d'avoir un grossissement important avec un tel objectif. Le grandissement commercial $G_C = 100$ est suffisant pour voir les détails de l'objet.

Rq : Un fort grossissement n'apporte rien, il ne sert qu'au confort de l'œil.

3. Autres types de microscopes

3.1 Microscope optique de fluorescence

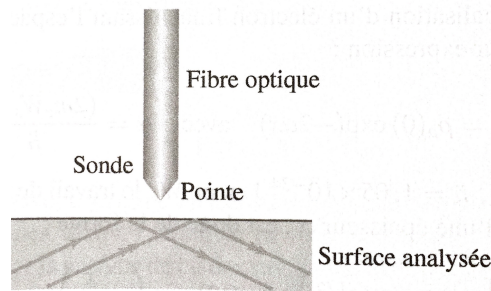


La fluorescence est l'émission de lumière par une molécule immédiatement après son excitation lumineuse, en général à une longueur d'onde plus grande. Les photons émis lors de l'émission de fluorescence n'ont pas de direction privilégiée. Ainsi pour détecter un maximum de lumière il faut choisir un objectif de grande ouverture numérique.

Dans un microscope de fluorescence, on trouve généralement, en plus des éléments d'optique conventionnels, un filtre d'excitation, un filtre d'émission et un miroir dichroïque filtrant. L'objectif joue le double rôle de focaliser la lumière incidente sur l'échantillon et de collecter la lumière que celui-ci renvoie. Ainsi chaque filtre a son propre rôle :

- Le filtre d’excitation sélectionne la longueur d’onde excitatrice des fluorophores de l’échantillon ;
- le filtre d’émission sélectionne la longueur d’onde de la lumière de fluorescence produite par l’échantillon ;
- le miroir dichroïque³ filtrant réfléchit très bien les radiations excitatrices (et très mal les radiations d’émission) tandis qu’elle transmet très bien les radiations d’émission (et très mal les radiations d’excitation).

3.2 Microscope en champ proche



L’idée du microscope en champ proche date de 1972, mais les premiers prototypes ont fonctionné dès 1984. Ils permettent d’atteindre des résolutions spatiales bien plus faibles que celles des microscopes optiques, tout en utilisant la lumière émise par un laser. Le mode de fonctionnement diffère fondamentalement du microscope optique : alors que dans ces derniers l’onde est faiblement diffractée par le diaphragme d’ouverture de l’instrument et se propage dans la direction moyenne incidente, dans le microscope en champ proche, l’onde, à la sortie du diaphragme diffractant, est évanescente, c’est à dire qu’elle ne se propage pas selon la direction moyenne incidente mais selon une direction orthogonale à celle-ci. Dans ces conditions, il est possible de dépasser nettement la limite de résolution classique due à la diffraction.

Rq : Quelques calculs sur la profondeur de pénétration et sur les résolutions longitudinale et transversale Perez p.123.

On réalise un microscope en champ proche en plaçant, à proximité de la surface matérielle transparente à analyser, une sonde effilée, c.a.d une pointe donc le diamètre est d’une dizaine de nanomètres.

On éclaire la surface analysée par l’arrière, avec un laser hélium-néon, en réalisant une réflexion totale frustrée par la présence de la sonde. On détecte alors l’intensité de l’onde évanescente au niveau de la sonde. En déplaçant latéralement cette dernière, à quelques nanomètres de la surface, grâce à un dispositif à balayage très précis, on peut obtenir une cartographie des détails de la surface, avec une résolution spatiale bien inférieure à la longueur d’onde.

Rq : Présentation d’autres microscope : microscope pour objet opaque, microscope en champ sombre, microscope à effet tunnel, microscope à force atomique... p.123 Perez.

3. Wiki. : Un filtre dichroïque est un filtre dont les propriétés de transmission et de réflexion dépendent fortement de la longueur d’onde. En pratique, on distingue trois plages de longueur d’onde principales : une première, reflétée lorsque la lumière est en incidence normale, une seconde lorsqu’elle est à 45°, et enfin une troisième transmise par le filtre

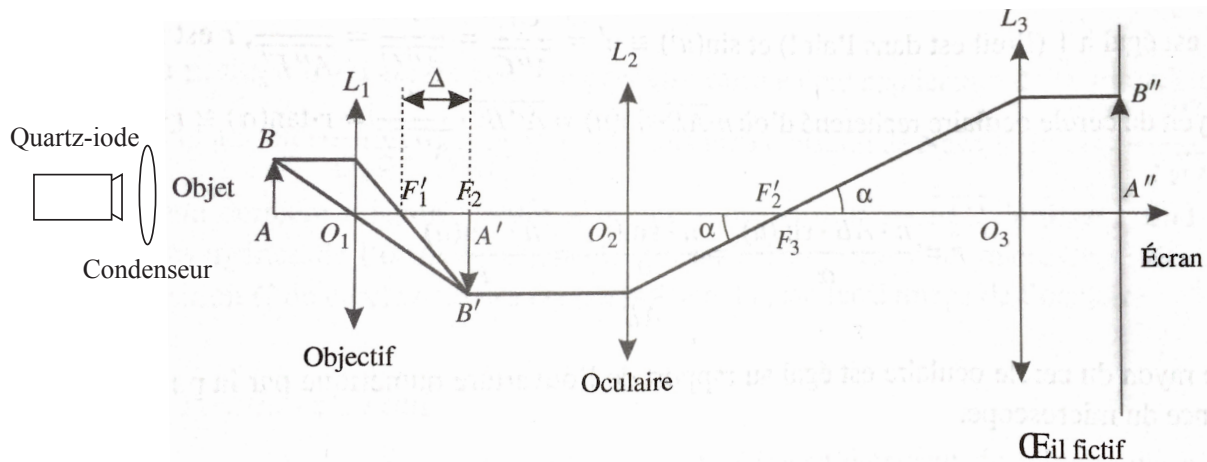
Conclusion

On a pu voir dans cette leçon comment, grâce à des outils relativement simple et à des connaissances théoriques, l'homme a pu voir plus grand le monde du très petit. On a ainsi pu voir le principe de fonctionnement d'une lentille simple à travers l'exemple de la loupe puis le résultat de la combinaison de plusieurs lentilles : le microscope optique. On a vu comment on peut caractériser un tel système à travers des grandeurs tel que la puissance ou le grossissement. Enfin nous avons pu prendre connaissance d'autre type de microscope optique bien plus performant.

De nos jours, de nouveaux microscopes sont utilisés : les microscopes électroniques pour lesquels on peut obtenir des images d'objets microscopiques grâce à l'analyse de leur interaction avec un faisceau d'électrons. Principe similaire du microscope optique mais utilise les propriétés ondulatoires des électrons. Le faisceau d'électron est diffracté en traversant l'échantillon, et des lentilles magnétiques permettent de reconstruire l'image comme en microscopie optique. Résolution bien meilleure car longueur d'onde de de Broglie inférieure aux longueurs d'onde optiques.

Manip microscope

Bellier p.70



Le but est de déterminer expérimentalement la puissance d'un microscope dans le cas d'une observation à l'infini. Ainsi l'image intermédiaire de l'objet par l'objectif de forme au foyer principal objet de l'oculaire. L'image finale est alors rejetée à l'infini.

L'objet source sera une grille millimétrique. Les lentilles sont :

- $L_1 = 100mm$ pour l'objectif ;
- $L_2 = 200mm$ pour l'oculaire ;
- $L_3 = 300mm$ pour l'œil fictif.

On fera varier la position de l'objectif par rapport à l'objet ainsi la position de l'image donnée par celui-ci sera variable. Pour une position donnée de l'objectif (toujours situé à une distance $\overline{AO_1} > f'_1$), on détermine la position de l'image intermédiaire $\overline{O_1A'}$ et sa taille $\overline{A'B'}$ à l'aide d'un écran escamotable (on prendra $\overline{AB} = 1cm$). De la mesure de $\overline{A'B'}$ on en déduira le grandissement γ_1 de l'objectif. On placera ensuite l'oculaire de façon que $A'B'$ soit dans son plan focal objet. Ainsi l'intervalle optique du microscope $\Delta = (\overline{O_1A'} - f'_1)$ sera variable.

Le microscope donne alors une image virtuelle inversée, à l'infini, vue du foyer image F'_2 de l'oculaire sous un angle α . On fera coïncider le foyer objet F_3 de la lentille avec le foyer image F'_2 de l'oculaire.

Placer l'écran au voisinage du plan focal image de L_3 pour obtenir une image $A''B''$ la plus nette possible. On verra par la suite que cette position éloignée de l'œil fictif n'est pas la plus judicieuse, toutefois cette position de L_3 permet ici d'accéder facilement à la valeur de α .

Il faut ensuite mesurer $\overline{A''B''}$ et en déduire $\alpha = \overline{A''B''}/f'_3$. On peut alors calculer la puissance du microscope $P = \alpha/\overline{AB}$.

On va effectuer plusieurs mesures différentes en modifiant la distance $\overline{AO_1}$ qui doit être mesurée avec précision.

Méthode d'auto-collimation : On prend un miroir qu'on place derrière L_1 et on regarde la réflexion du miroir sur le bord de L_1 : l'endroit où on est nette sera la position de L_1 . Puis on règle L_3 pour pouvoir voir net sur l'écran. Une fois que cette étape est faite on fixe L_3 et on peut de nouveau bouger L_1 : on a un objet à l'infini. (détails p.171 H-prépa ou p.37 Bellier).

Résultats

$\overline{AO_1}(m)$	0.12	0.13	0.14	0.15	0.18
$\overline{O_1A'}(m)$	0.465	0.515	0.375	0.264	0.225
$\Delta = \overline{O_1A'} - f'_1(m)$	0.365	0.415	0.275	0.164	0.125
$\overline{A'B'}(m)$	0.05	0.055	0.037	0.023	0.017
$\gamma_1 = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$	5.00	5.50	3.70	2.30	1.70
$\overline{A''B''}(m)$	0.1	0.12	0.065	0.04	0.022
$\alpha = \frac{\overline{A''B''}}{f'_3}$	0.33	0.4	0.22	0.13	0.07
$\mathcal{P} = \frac{\alpha}{\overline{AB}}(m^{-1})$	33.33	40	21.67	13.33	7.33
$\frac{\mathcal{P}}{\Delta}$	91.32	96.38	78.79	81.3	58.67

TABLE 1 – Résultats obtenus expérimentalement

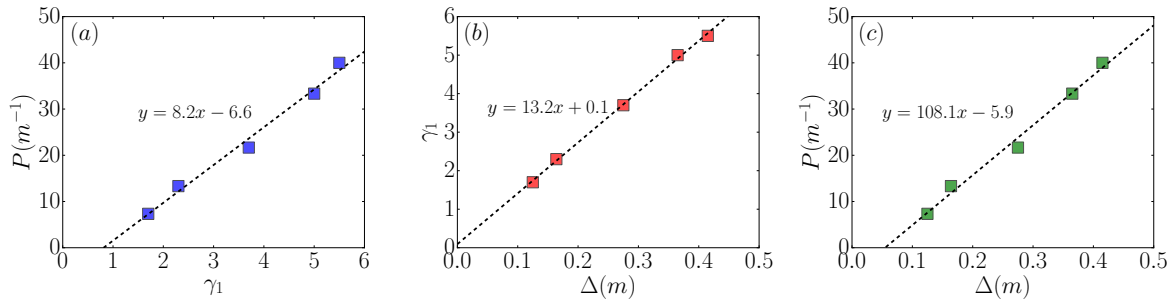


FIGURE 4 – (a) \mathcal{P} en fonction de γ_1 ; (b) γ_1 en fonction de Δ ; (c) \mathcal{P} en fonction de Δ .

On sait que théoriquement pour un microscope on a les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{P} &= \gamma_1 \mathcal{P}_\epsilon = \frac{\gamma_1}{f'_2} \\
 \gamma_1 &= -\frac{\Delta}{f'_1} \\
 \mathcal{P} &= \mathcal{P}_\gamma = \frac{\Delta}{f'_1 f'_2}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Expérimentalement on a en calculant la pente des trois graphiques présents sur la figure :

$$\begin{aligned}
 f'_2{}^{exp} &\approx 0,12m \text{ alors que théoriquement on a } f'_2 = 0,2m \\
 f'_1{}^{exp} &\approx 0,08m \text{ alors que théoriquement on a } f'_1 = 0,1m \\
 f'_1{}^{exp} &\approx f'_2{}^{exp} = 9,2 \cdot 10^{-3}m^2 \text{ alors que théoriquement on a } f'_1 \cdot f'_2 = 0,02m^2
 \end{aligned}$$

Les résultats sont différents mais dans le même ordre de grandeur. On peut estimer les erreurs :

$$\begin{aligned}\frac{d(f'_2)}{f_2} &= \sqrt{\left(\frac{d(\overline{A'B'})}{\overline{A'B'}}\right)^2 + \left(\frac{d(\overline{A''B''})}{\overline{A''B''}}\right)^2} \\ \frac{d(f'_1)}{f_1} &= \sqrt{\left(\frac{d(\overline{O_1A'})}{\overline{O_1A'}}\right)^2 + \left(\frac{d(\overline{A''B''})}{\overline{A''B''}}\right)^2 + \left(\frac{d(\overline{AB})}{\overline{AB}}\right)^2}\end{aligned}\tag{13}$$

Finalement on a réalisé l'étude de plusieurs microscopes car à chaque mesure on modifie Δ pour avoir une image à l'infini alors que dans un microscope réel l'intervalle optique est constant.

Cercle oculaire

On pourrait également mesurer le rayon du cercle oculaire. Pour cela il faut retirer l'œil fictif (L_3 et écran), atténuer la source lumineuse et placer notre œil juste derrière l'oculaire. Il faut constater que :

- Le champ est très restreint et n'est pas uniformément éclairé ;
- La partie visible de l'objet dépend de la position de l'œil par rapport à l'axe optique.

Il faut ensuite reculer l'œil jusqu'à ce que le champ soit optimal, à cette position correspond le cercle oculaire.

Le cercle oculaire correspond en fait à l'image de l'objectif donnée par l'oculaire. En déplaçant un écran derrière l'oculaire, constater que la section du faisceau émergent de l'oculaire passe par un diamètre minimal. Cette position est celle du cercle oculaire. Il faut mesurer son rayon et la distance $\overline{O_2C}$ par rapport à l'oculaire.

On peut ainsi déterminer théoriquement la position et la valeur du cercle oculaire et comparer avec les résultats expérimentaux.

Rq : Le rayon du cercle oculaire est d'autre part égal au rapport de l'ouverture numérique par la puissance du microscope.

Rq : Dans le cas d'un véritable microscope, le cercle oculaire est pratiquement dans le plan focal image de l'oculaire et sa taille inférieure à celle de la pupille de l'œil. L'observateur reçoit alors le maximum de lumière.