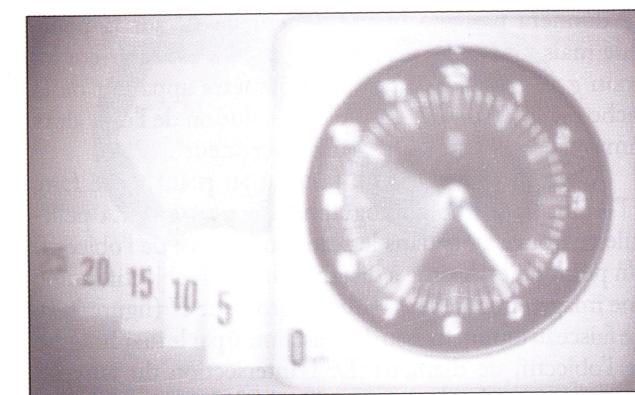
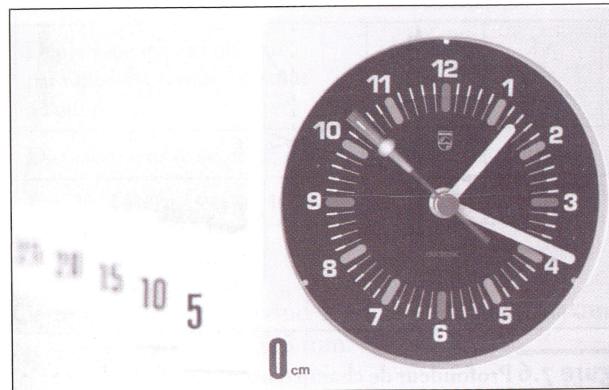
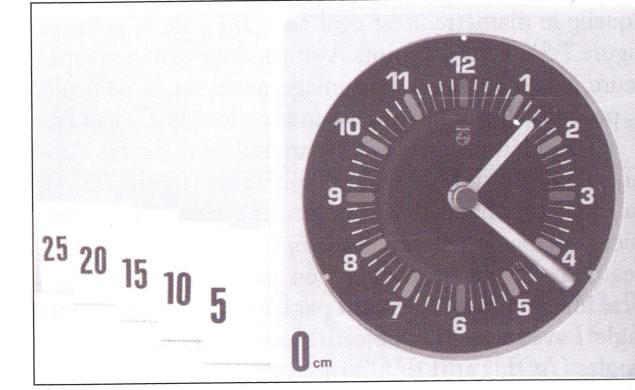


a) Dispositif utilisé pour mesurer la profondeur de champ.

b) Avec un simple trou : diamètre $\Phi = 0,5$ mm, temps de pose $T = 15$ mn.c) Avec un objectif (mise au point sur la pendule) : temps de pose $T = 1$ s ; $N = 2.8$.d) Avec un objectif (mise au point sur la pendule) : temps de pose $T = 32$ s ; $N = 16$.**Figure 7.7** Mise en évidence expérimentale de la profondeur de champ © Béatrice Sandré.

tesse du trou conduit à un temps de pose très long ($T = 15$ mn)⁸, mais permet d'obtenir une grande profondeur de champ. La photographie manque cependant de clarté. Sur les photographies 7.6.c et 7.6.d, l'objectif de l'appareil photographique a été remis en place et la quantité de lumière reçue est la même dans les deux cas. La profondeur de champ est plus grande pour $N = 16$ que pour $N = 2.8$. En contrepartie, le temps de pose est allongé (32 s contre 1 s), d'où un risque de bougé (déjà observable au niveau de la trotteuse sur la figure 7.7.c).

7.1.3 Principe du télescope

L'objectif standard de focale $f' = +50$ mm ne permet pas de photographier des objets très rapprochés ou très éloignés. Dans ce dernier cas, l'utilisation d'une lentille de grande distance focale s'avère nécessaire. En effet, d'après les formules de Newton : $\frac{A'B'}{AB} = -\frac{f}{FA} = \frac{f'}{FA}$.

Si l'objet est très éloigné, le terme FA varie peu avec la

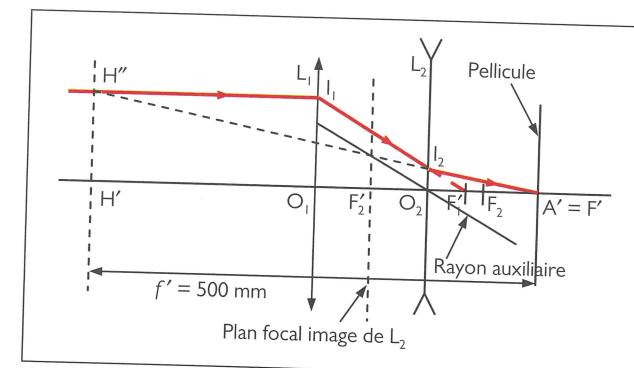
⁸. Visible grâce à la zone balayée par la grande aiguille de l'horloge.

position de A et $\frac{A'B'}{AB} \approx \frac{f'}{L}$, où L est la distance à laquelle se trouve l'objet. Dans ces conditions, le grossissement augmente linéairement avec f' .

Cependant, l'utilisation d'une lentille simple de grande distance focale présente un inconvénient majeur. Ainsi, pour que l'image d'une tour de hauteur $b = 60$ m, située à une distance $L = 2$ km, possède une dimension $b' = 1,5$ cm sur la pellicule, la lentille doit avoir une distance focale $f' = \frac{1,5 \cdot 10^{-2} \times 2 \cdot 10^3}{60} = 0,5$ m.

L'encombrement de l'appareil, défini par la distance objectif-pellicule sera alors égal à 50 cm, valeur inacceptable en pratique. Il est donc nécessaire d'utiliser une association de lentilles, appelée **télescope**, pour obtenir un grossissement identique avec un encombrement réduit.

Le télescope est constitué d'une lentille convergente L_1 , de distance focale f'_1 , et d'une lentille divergente L_2 , de distance focale f'_2 (schéma de principe, figure 7.8). L_1 et L_2 sont séparées d'une distance $e = O_1 O_2$ et constituent un **doublet non accolé**.

**Figure 7.8** Principe du télescope.

$$f'_1 = +100 \text{ mm}, f'_2 = -37,5 \text{ mm}, e = \overline{O_1 O_2} = +70 \text{ mm}$$

De même, dans les triangles rectangles $(O_1 I_1 F'_1)$ et $(O_2 I_2 F'_2)$, on a : $\frac{\overline{O_1 I_1}}{\overline{O_2 I_2}} = \frac{\overline{O_1 F'_1}}{\overline{O_2 F'_2}} = \frac{f'_1}{f'_2 - e}$

$$\text{or } \overline{O_1 I_1} = \overline{H' H''} \text{ donc } \frac{\overline{H' H''}}{\overline{O_2 I_2}} = \frac{f'_1}{f'_2 - e} \quad (3)$$

En identifiant les relations (2) et (3), on obtient :

$$\frac{\overline{H' H''}}{\overline{O_2 I_2}} = \frac{f'_1}{f'_2 - e} = \frac{f'}{O_2 F'}, \text{ soit } f' = \overline{O_2 F'} \times \frac{f'_1}{f'_2 - e}.$$

En remplaçant $O_2 F'$ par l'expression (1), on obtient

$$\text{finalelement : } f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e}.$$

En prenant $f'_1 = +100$ mm, $f'_2 = -37,5$ mm et $e = 70$ mm, on trouve $f' = +500$ mm, valeur identique à celle obtenue avec la lentille unique précédente.

L'encombrement du télescope est égal à :

$$\begin{aligned} \overline{O_1 F'} &= \overline{O_1 O_2} + \overline{O_2 F'} = e + \frac{f'_1(f'_1 - e)}{f'_1 + f'_2 - e} \\ &= \frac{f'_1 f'_2 + e f'_1 - e^2}{f'_1 + f'_2 - e} \\ &= 220 \text{ mm} \end{aligned}$$

En faisant glisser le point principal image H' à gauche de la première lentille, on obtient un encombrement $\overline{O_1 F'}$ inférieur à la distance focale $f' = \overline{H' F'}$. Avec les valeurs choisies ici, l'encombrement est même inférieur à la moitié de celui obtenu avec une lentille simple.

En pratique, on réalise des télescopes à focale variable (ex : zoom 80-200 mm), par translation continue d'un ensemble de lentilles. L'inconvénient du télescope est qu'il possède une faible ouverture angulaire, ce qui nécessite un temps de pose plus important, d'où un risque de bougé. À l'opposé, les objectifs de macrophotographie utilisent des distances focales courtes, de 40 mm à 6 mm, et possèdent une ouverture angulaire pouvant atteindre 220°.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les objectifs d'appareil photographique sont en réalité constitués d'un assemblage complexe de lentilles, qui permet de corriger la plupart des aberrations chromatiques et géométriques.

7.2 LE MICROSCOPE

Note au lecteur : pour ne pas alourdir la présentation, les expériences ont été regroupées dans un cahier expérimental à la fin.

7.2.1 Approche historique : microscopes de Hooke et de Van Leeuwenhoek

Si le pouvoir grossissant des lentilles était connu depuis l'Antiquité, l'idée de les utiliser de manière systématique

⁹. Ceci impose la double inégalité : $f'_1 + f'_2 < e < f'_1$, avec $f'_1 > 0$ et $f'_2 < 0$.

¹⁰. La caractérisation des systèmes optiques épais à l'aide des plans principaux passant par H et H' est développée en annexe.

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.

En 1665, l'anglais Robert Hooke publie son célèbre ouvrage *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 (figure 7.9). 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. Malgré son esthétisme et sa popularité, le microscope composé de Hooke était d'une qualité optique inférieure à celle du microscope simple de Van Leeuwenhoek.

Né à Delft, Antonie Van Leeuwenhoek (1632-1723) était drapier et vendait des soieries, laines, cotonnades et rubans aux riches bourgeois de la ville. Il était également bourgmestre, vérificateur des poids et mesures et expert auprès des tribunaux. Ami intime du peintre Vermeer, il fut même nommé administrateur de ses biens à la mort de ce dernier¹¹. Les drapiers se servaient de verres grossissants pour vérifier la qualité de leurs tissus. À partir de petits globules de verre, Van Leeuwenhoek fabriqua plusieurs centaines de lentilles, dont les meilleures grossissaient 500 fois et possédaient une résolution de l'ordre du micron¹².

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 (figure 7.10). Van Leeuwenhoek ne construisit que des microscopes simples, mais les observations qu'il réalisa étaient stupéfiantes pour l'époque. Ainsi, observant une goutte d'eau trouble et verdâtre prélevée dans un lac marécageux : « Je perçus alors très clairement qu'il s'agissait de petites anguilles ou vers, serrés les uns contre les autres, et qui se tortillaient ; exactement comme si l'on voyait à l'œil nu un plein baquet de toutes petites anguilles qui frémillaient dans de l'eau... Et je dois dire, pour ma part, que jamais devant mes yeux n'est apparu spectacle plus plaisant que celui de ces milliers d'êtres vivants logés dans une gouttelette d'eau, et qui se déplacent les uns parmi les autres, chacun animé de son mouvement propre »¹³. Après les bactéries, il observa des spermatozoïdes, et, frappé par leur mobilité, leur attribua un rôle prépondérant dans la création de la vie. Ses observations furent accueillies avec beaucoup de méfiance à l'époque.

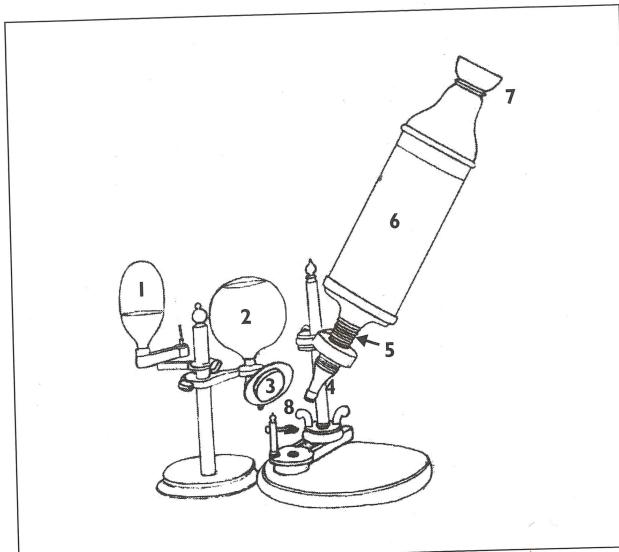


Figure 7.9 Microscope composé de Hooke.
Dessin de l'auteur, d'après la photographie page 22 de *La lumière, du visible à l'invisible*, coll. Passion des Sciences, Gallimard, 1993

1 : Lampe à huile 2 : Condenseur 3 : Lentille 4 : Objectif
5 : Vis de mise au point 6 : tube 7 : Oculaire 8 : Spécimen

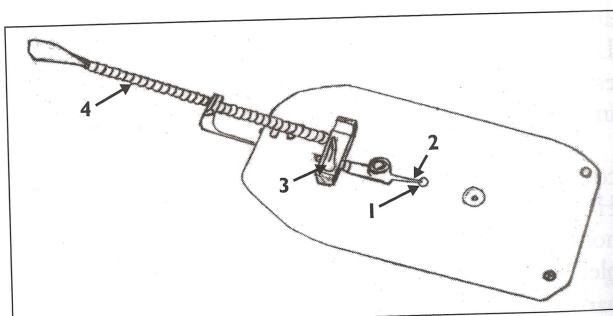


Figure 7.10 Microscope simple de Van Leeuwenhoek.
Dessin de l'auteur d'après la photographie page 22 de *La lumière, du visible à l'invisible*, coll. Passion des Sciences, Gallimard, 1993

1 : Lentille sphérique sertie entre deux plaques 2 : Pointe échantillon 3 : Bouton de mise au point 4 : Vis de translation.

propres »¹³. Après les bactéries, il observa des spermatozoïdes, et, frappé par leur mobilité, leur attribua un rôle prépondérant dans la création de la vie. Ses observations furent accueillies avec beaucoup de méfiance à l'époque.

Les performances du microscope composé de Hooke étaient limitées par les aberrations chromatiques et géométriques cumulées à travers les différentes lentilles. L'utilisation d'une lentille unique de très faible épaisseur et de très petit diamètre limitait

¹¹. D. BOORSTIN, *Les Découvreurs*, Éd. Robert Laffont, 2002, p. 315 (titre original *The Discoverers*, 1983).

¹². Résolution bien supérieure à celle des microscopes composés de l'époque, et seulement quatre fois inférieure à celle des meilleurs microscopes optiques actuels !

¹³. D. BOORSTIN, *Les Découvreurs*, Éd. Robert Laffont, 2002, p. 317 (titre original *The Discoverers*, 1983).

considérablement les aberrations. De fait, le microscope simple domina la scène de la microscopie jusqu'au milieu du xix^e siècle environ. Dans les années 1830, Robert Bancks conçoit des microscopes simples possédant un pouvoir de résolution élevé. Il a comme clients des biologistes et naturalistes réputés, comme Charles Darwin et Robert Brown¹⁴. Grâce à son microscope, ce dernier observe le noyau des cellules et surtout le **mouvement brownien**, mouvement erratique agitant de minuscules particules en suspension dans un liquide. Charles Darwin continue à recommander l'emploi du microscope simple jusqu'en 1848, mais ce dernier commence à disparaître au profit du microscope composé, dont les performances deviennent comparables lorsque le problème des aberrations est enfin résolu.

7.2.2. Principe du microscope composé à deux lentilles

Le microscope composé est constitué de deux systèmes optiques successifs, l'**objectif** et l'**oculaire**. Ces deux systèmes, que l'on retrouvera avec des caractéristiques différentes dans la lunette astronomique, sont représentés schématiquement par deux lentilles minces L_{ob} et L_{oc} . Le principe de fonctionnement du microscope composé est représenté figure 7.11¹⁵.

- L'objectif donne de l'objet AB une image intermédiaire A_1B_1 agrandie et renversée. Pour obtenir un grandissement important et un encombrement réduit, on utilise une lentille de courte focale f' (de quelques cm à quelques mm). L'objet AB est placé très près en avant¹⁶ du foyer objet F_{ob} de l'objectif (figure 7.11).

- L'oculaire agit alors comme une loupe et donne de l'image intermédiaire réelle une image finale virtuelle agrandie. Lors d'une utilisation normale, l'image intermédiaire A_1B_1 est située dans le plan focal objet de l'oculaire ($A_1 = F_{oc}$), et l'image finale $A'B'$ est rejetée à l'infini, permettant une observation sans accommodation, donc sans fatigue de l'œil.

Les faisceaux rouge et bleu formés par les rayons issus respectivement des points extrêmes A et B de l'objet émergent en se croisant au niveau du **cercle oculaire**. C'est au niveau de ce cercle que l'observateur devra placer son œil pour recevoir le plus de lumière et obtenir corrélativement le champ d'observation angulaire le plus grand.

7.2.3. Puissance et grossissement

Les performances d'un microscope sont caractérisées par deux grandeurs :

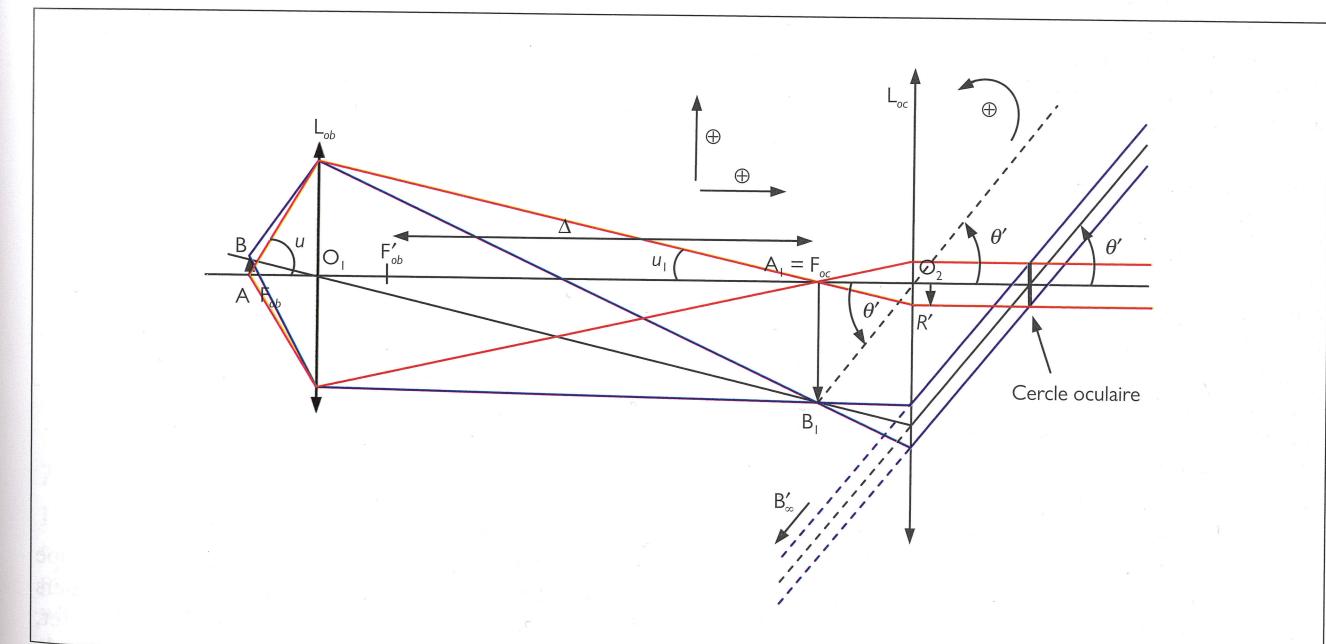


Figure 7.11 Principe de fonctionnement d'un microscope composé à deux lentilles.

¹⁴. Cf. B. J. FORD, « La naissance de la microscopie », *La Recherche*, n° 249, décembre 1992, p. 1370-1378.

¹⁵. Nous n'aborderons pas les méthodes d'observation par contraste de phase ou contraste interférentiel. Le lecteur intéressé pourra consulter les deux références suivantes :

M. FRANÇON, *L'Optique moderne et ses développements*, coll. Liaisons scientifiques, Éd. Hachette CNRS, 1986.

G. ROBLIN, *Microscopie optique*, dossier pédagogique n° 44 de l'Adasta, juin 1995.

¹⁶. Afin que l'image intermédiaire soit réelle, ou « objective ».

- sa **puissance** $P = \frac{\theta'}{AB}$, où AB est la taille de l'objet et θ' l'angle (positif) sous lequel l'œil placé au niveau du cercle oculaire voit l'image finale $A'B'$ (figure 7.11).

P est une grandeur positive¹⁷ homogène à l'inverse d'une longueur. Si AB est mesurée en mètres, P est mesurée en dioptries (δ) ou m^{-1} ;

- son **grossissement** $G = \frac{\theta'}{\theta}$. θ est l'angle (positif) sous lequel l'objet AB est vu à l'œil nu à une distance d (figure 7.12). θ' possède la même signification que précédemment. G est une grandeur positive sans dimension.

L'image finale $A'B'$ étant vue sous un angle θ' plus grand que θ , sa taille sur la rétine sera plus grande (figure 7.12). **Le grossissement G mesure le rapport des tailles des images rétinianes lorsque l'objet est vu respectivement à travers un instrument d'optique et à l'œil nu**¹⁸.

Dans la limite des petits angles, $\theta \approx \tan \theta = \frac{AB}{d}$ d'où $G = \frac{\theta'}{AB} d = Pd$ et donc $[G = Pd]$.

Dans la pratique, on utilise les notions de puissance intrinsèque P_i et de grossissement commercial G_c . La puissance intrinsèque P_i correspond à une des deux situations suivantes :

- image $A'B'$ rejetée à l'infini ;
- œil placé au foyer image de l'instrument.

Dans les deux cas, on montre que¹⁹ $P_i = \frac{1}{|f'|}$.

Lors d'une utilisation normale du microscope, l'œil est placé au niveau du cercle oculaire, dont le centre est pratiquement confondu avec le foyer principal image F' . L'angle θ' et la puissance P sont alors indépendants de la position de l'objet AB sur l'axe (cf. annexe). La puissance P est égale à la puissance intrinsèque P_i .

Le grossissement commercial G_c est défini pour les mêmes conditions d'utilisation, la distance d'observation à l'œil nu d étant de plus normalisée. Elle

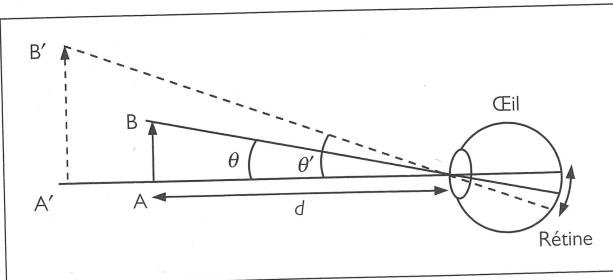


Figure 7.12 Grossissement à travers une loupe ou un microscope.

¹⁷ P et G sont définies positives mais l'image finale est bien renversée.

¹⁸ Cette définition reste valable pour d'autres instruments comme la loupe.

¹⁹ Le calcul de la puissance d'un système centré dans le cas général puis intrinsèque est détaillé en annexe.

correspond à la distance au *punctum proximum* d'un œil normal, soit²⁰ $d_m = 25 \text{ cm} = \frac{1}{4} \text{ m}$.

Puissance intrinsèque P_i et grossissement commercial G_c sont alors reliés par la relation :
$$G_c = \frac{P_i}{4\delta}.$$

On peut exprimer P_i et G_c en fonction des caractéristiques de l'objectif et de l'oculaire.

Dans le triangle rectangle ($O_2A_1B_1$), figure 7.11, on a : $\theta' \approx \tan \theta' = \frac{A_1B_1}{f'_oc}$ d'où $P_{oc} = \frac{\theta'}{A_1B_1} = \frac{1}{f'_oc}$

$$P_i = \frac{\theta'}{AB} = \frac{\theta'}{A_1B_1} \frac{A_1B_1}{AB} = P_{oc} |\gamma_{ob}| = \frac{|\gamma_{ob}|}{f'_oc}$$

Par ailleurs, $\gamma_{ob} = -\frac{F'_ob A_1}{f'_ob} = -\frac{F'_ob F_{oc}}{f'_ob} = -\frac{\Delta}{f'_ob}$, où $\Delta = \frac{F'_ob F_{oc}}{f'_ob}$ est appelé **intervalle optique**.

D'où finalement :

$$P_i = |\gamma_{ob}| P_{oc} = \frac{\Delta}{f'_ob f'_oc} \quad \text{et} \quad G_c = |\gamma_{ob}| G_{oc,c} = \frac{\Delta}{(4\delta) f'_ob f'_oc}$$

Le grossissement commercial du microscope est égal au produit du grossissement de l'objectif par le grossissement commercial de l'oculaire. La puissance et le grossissement du microscope sont d'autant plus importants que les distances focales de l'objectif et de l'oculaire sont petites, et que l'intervalle optique Δ est grand.

Enfin, le microscope fournit une image renversée de l'objet et possède une distance focale $f' = H'F'$ négative : $P_i = \frac{1}{|f'|} = -\frac{1}{f'} \text{ donc } f' = -\frac{f'_ob f'_oc}{\Delta}$.

Applications numériques

On prend $\Delta = 160 \text{ mm}$ (valeur standard), $f'_ob = 40 \text{ mm}$ et $f'_oc = 25 \text{ mm}$.

$$|\gamma_{ob}| = \frac{160}{40} = 4 \text{ (objectif } \times 4)$$

$$G_{oc,c} = \frac{250}{25} = 10 \text{ (oculaire } \times 10)$$

$$G_c = |\gamma_{ob}| \times G_{oc,c} = 4 \times 10 = 40$$

$$P_i = \frac{\Delta}{f'_ob f'_oc} = \frac{160}{40 \times 25 \cdot 10^{-3}} = 160 \delta$$

$$f' = -\frac{1}{P_i} = -\frac{1}{(4\delta) G_c} = -6,25 \cdot 10^{-3} \text{ m} = -6,25 \text{ mm.}$$

En règle générale, la puissance d'un microscope optique varie de quelques centaines à quelques milliers de dioptries, mais ne dépasse jamais 5000δ . En effet, le pouvoir de résolution du microscope est limité par la diffraction, ce qui rend inutile l'utilisation de puissances ou grossissements supérieurs.

²⁰ Dans les pays anglo-saxons, on prend $d_m = 254 \text{ mm}$ (10 inches), de sorte qu'un oculaire $\times 10$ possède une distance focale $f'_oc = \frac{1}{P_{oc,i}} = \frac{d_m}{G_{oc,c}} = \frac{254}{10} = 25,4 \text{ mm}$ (1 inch).

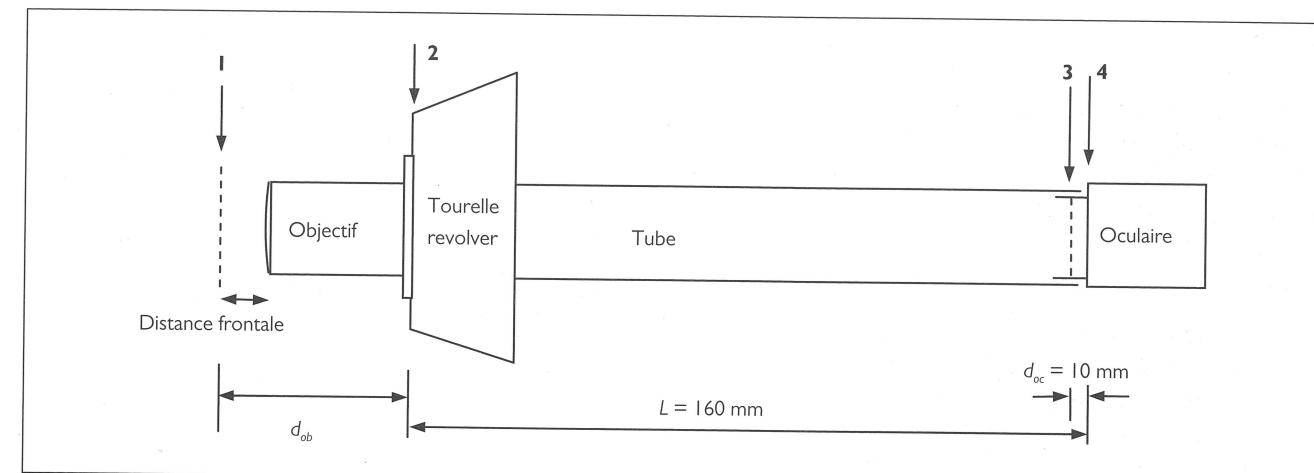


Figure 7.13 Normes et standardisation d'un microscope.

- 1 : Plan de l'objet
- 2 : Plan d'appui de l'objectif
- 3 : Plan de l'image intermédiaire = plan focal objet de l'oculaire
- 4 : Plan d'appui de l'oculaire

7.2.4. Normes et standardisation²¹

L'image intermédiaire A_1B_1 donnée par l'objectif devant se trouver impérativement au voisinage du plan focal objet de l'oculaire, l'ensemble objectif/oculaire est maintenu solidaire par le biais d'un tube. Lors de la mise au point, l'ensemble objectif/tube/oculaire se déplace en bloc vis-à-vis de l'objet. Afin de permettre un échange standard des objectifs et des oculaires de différentes marques, une normalisation des différents paramètres géométriques du microscope a été adoptée (figure 7.13) :

- la longueur mécanique L du tube, mesurée entre les plans d'appui 2 et 4 de l'objectif et de l'oculaire est fixée à **160 mm** ;
- la distance d_{oc} entre le plan focal objet et le plan d'appui de l'oculaire est fixée à 10 mm ;
- la **distance parafocale** d_{ob} entre le plan de l'objet et le plan d'appui de l'objectif est égale à 45 mm lorsque la mise au point est effectuée par un œil emmétrope au repos (image finale rejetée à l'infini). Par contre, l'intervalle optique $\Delta = F'_ob F_{oc}$ et la distance focale image f'_ob de l'objectif ne sont pas normalisés²².

7.2.5. Profondeur de champ

La profondeur de champ ou **latitude de mise au point** est la plage de distance objet/objectif pour laquelle l'œil, placé au niveau du cercle oculaire, obtiendra une image nette de l'objet. Elle est déterminée par deux positions extrêmes de AB qui correspondent respectivement :

²¹ Cf. G. ROBLIN, *Microscopie optique*, dossier n° 44 de l'Adasta, juin 1995, p. 12, et SEXTANT, *Optique expérimentale*, coll. Enseignement des sciences, Éd. Hermann, 1997, p. 50.

²² Dans SEXTANT, *Optique expérimentale*, coll. Enseignement des sciences, Éd. Hermann, 1997, p. 50, on trouve une formule approchée de $\gamma_{ob} = \frac{\Delta}{f'_ob}$ qui conduit à l'expression approchée : $\Delta \approx 150 + d_{ob} - 2f'_ob$ en mm.

- à une image finale $A'B'$ située au *punctum remotum* de l'œil, c'est-à-dire rejetée à l'infini pour un œil emmétrope. Dans ce cas, l'image intermédiaire A_1B_1 est située dans le plan focal objet de l'oculaire ;
- à une image finale $A'B'$ située au *punctum proximum* de l'œil, c'est-à-dire à $d_m = 25 \text{ cm}$ (à gauche) de l'œil pour un œil emmétrope. L'image intermédiaire A_1B_1 est située cette fois entre le plan focal objet de l'oculaire et l'oculaire lui-même.

En appliquant les formules de Newton au microscope global, on montre que la latitude de mise au point ℓ est inversement proportionnelle au carré de la puissance intrinsèque²³. Elle varie **d'une fraction de millimètre pour des grossissements faibles** ($\ell = 0,16 \text{ mm}$ pour $P_i = 160 \delta$) **à quelques microns seulement pour des grossissements élevés** ($\ell = 1,6 \mu\text{m}$ pour $P_i = 1600 \delta$).

7.2.6. Exemples d'observation

La figure 7.14 représente un microscope standard utilisé en biologie. La stabilité des différents éléments constitutifs est assurée par une monture appelée **statif**. 1. La lamelle porte-échantillon 2 est calée sur la platine porte-objet 3 à l'aide d'un clip, et éclairée par en dessous par un système source 4 (dans le pied du statif) + condenseur 9 (situé sous la platine). À l'aide de deux vis de réglage 5, on commence par positionner l'échantillon à l'aplomb de la lentille du condenseur. Afin de pouvoir bénéficier de plusieurs grossissements, l'objectif

²³ Cf. A. MOUSSA, P. PONSONNET, *Cours de Physique – Optique*, Éd. Desvigne, 1963, p. 266 et 309, ou

B. BALLAND, *Optique géométrique – Imagerie et instruments*, coll. Enseignement des Sciences appliquées de l'INSA de Lyon, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2007, p. 574-575. On trouve $\ell = A_R A_p = \frac{n D_{ac}}{P^2}$, où n est l'indice du milieu objet et D_{ac} la puissance dioptrique de l'œil. Pour un objectif à sec et un œil normal : $n = 1$ et $D_{ac} = 4 \delta$.



Figure 7.14 Microscope optique utilisé en biologie.
1 : Statif 2 : Lamelle porte-échantillon 3 : Platine 4 : Source lumineuse 5 : Verniers de déplacement horizontal de la platine 6 : Tourelle revolver 7 : Mise au point (mouvements lent et rapide) 8 : Oculaire $\times 10$ 9 : Condenseur

se présente sous la forme d'une tourelle revolver 6 comportant ici quatre objectifs ($\times 4$, $\times 10$, $\times 40$ et $\times 100$).

Par rotation de la tourelle, on place d'abord l'objectif de plus faible grossissement à l'aplomb de l'échantillon, le condenseur étant réglé en position basse. Une mise au point d'abord grossière puis plus précise est effectuée à l'aide de deux verniers successifs à mouvement rapide et à mouvement lent 7. Lors des observations, l'œil est collé contre l'oculaire 8, et situé au niveau du cercle oculaire où il reçoit le maximum de lumière et ne limite pas le champ offert par le microscope.

Des photographies peuvent être prises en plaçant directement l'objectif d'un appareil photographique contre l'oculaire, avec une mise au point à l'infini (solution adoptée ici), ou en remplaçant l'oculaire par le boîtier seul de l'appareil photographique à l'aide d'une bague d'adaptation.

La figure 7.15. a et b représente une cellule de tige de vigne. La figure 7.16 a à d montre une coupe d'œsophage humain pour des grossissements croissants $\times 4$, $\times 10$, $\times 40$ puis $\times 100$ de l'objectif. Lors de la rotation de la tourelle revolver, le condenseur est progressivement remonté en position haute afin d'obtenir une plus grande luminosité. La figure 7.17. a à c montre enfin une coupe transversale d'épididyme de testicule de cobaye pour des grossissements croissants $\times 4$, $\times 40$ puis $\times 100$ de l'objectif. Lorsqu'on utilise l'objectif $\times 100$, il

est nécessaire de placer une goutte d'huile de cèdre entre la lame échantillon et la face avant de l'objectif (objectif à immersion) afin d'optimiser le pouvoir de résolution.

7.2.7. Objectif

a) Classification

L'objectif est la pièce maîtresse du microscope. Il doit fournir de l'objet une image intermédiaire agrandie de très bonne qualité.

Ses caractéristiques principales sont indiquées sur sa monture : grossissement γ , ouverture numérique, objectif à immersion ou non, degré de correction des aberrations chromatiques et géométriques. Le grossissement est la première valeur numérique indiquée à gauche sur la monture. Il correspond à l'une des valeurs standard suivantes : $\times 2.5$, $\times 4$, $\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 40$, $\times 100$. La figure 7.18 représente trois objectifs Zeiss de grossissement croissant $\times 2.5$, $\times 10$ et $\times 40$. Sur l'objectif $\times 40$, la longueur L du tube ($L = 160$ mm) et l'épaisseur de la lamelle couvre-objet pour laquelle la correction des aberrations est optimale ($e = 0,17$ mm) sont également indiquées.

Parmi les différents types d'objectifs on distingue :

- Les **objectifs à sec** ou les **objectifs à immersion**, selon la nature du milieu d'entrée.

Les objectifs à sec sont utilisés directement dans l'air, d'indice unité. Les objectifs à immersion permettent d'obtenir des grossissements plus importants (typiquement $\times 100$), mais la face avant de l'objectif doit alors être mise en contact avec un liquide (huile ou glycérine) possédant quasiment le même indice que la première lentille de l'objectif et que la lamelle couvre-objet. Dans ce cas, la mention *Oil* ou *Ol* sera indiquée sur la monture.

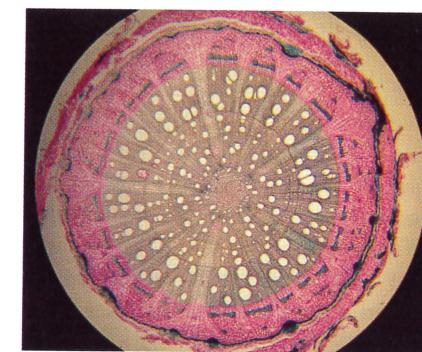
- **objectif achromat, apochromat ou plan**, selon la nature et le degré de correction des aberrations chromatiques et géométriques.

• Les objectifs achromatiques, les plus simples, sont corrigés de l'aberration chromatique primaire (distances focales identiques pour deux longueurs d'onde de référence dans le rouge et le bleu), et de l'aberration sphérique pour une longueur d'onde intermédiaire.

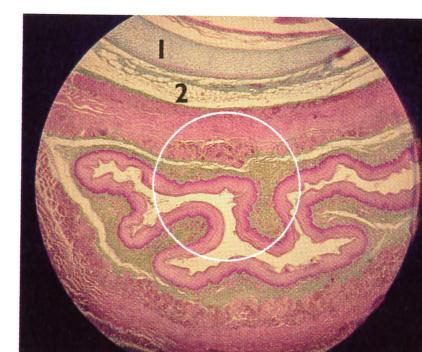
• Les objectifs apochromatiques sont souvent des triplets. Ils sont corrigés de l'aberration chromatique secondaire (distances focales identiques pour trois radiations de référence), de l'aberration sphérique pour deux des trois radiations précédentes, et de la coma. Il peut cependant subsister du chromatisme de grandeur.

• Les objectifs plans (ex. : objectif $\times 2.5$, figure 7.18) sont corrigés de la courbure de champ, défaut très gênant en microphotographie car il entraîne une mise au point différente pour différents points du champ objet²⁴.

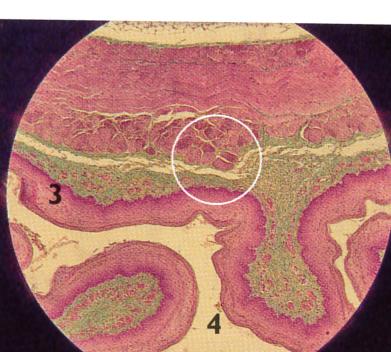
²⁴ En microscopie, l'extension latérale du champ objet est très limitée, de sorte que le défaut d'astigmatisme intervient peu.



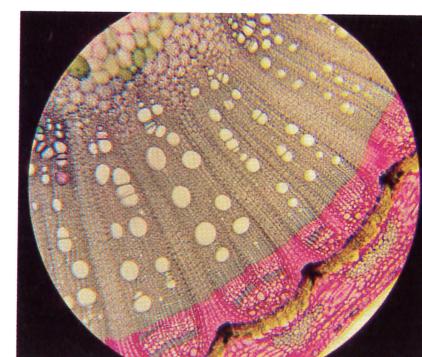
a) Objectif $\times 4$



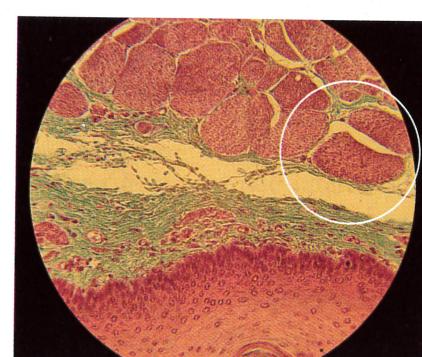
a) Objectif $\times 4$
1 : Trachée 2 : Tissu conjonctif



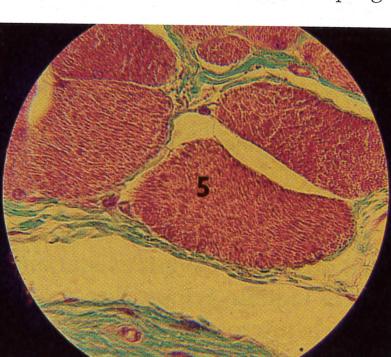
b) Objectif $\times 10$
3 : Épithélium 4 : Lumière de l'œsophage



b) Objectif $\times 10$



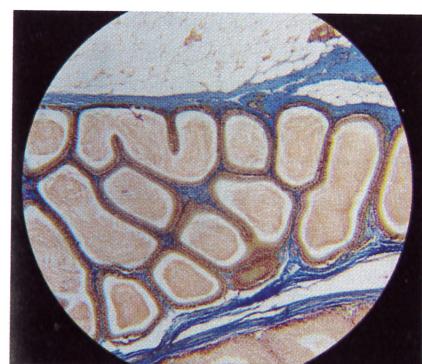
c) Objectif $\times 40$



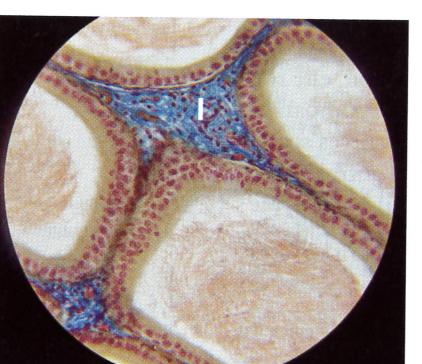
d) Objectif $\times 100$ (*oil*)
5 : Muscle lisse

Figure 7.15 Coupe d'une cellule de tige de vigne.

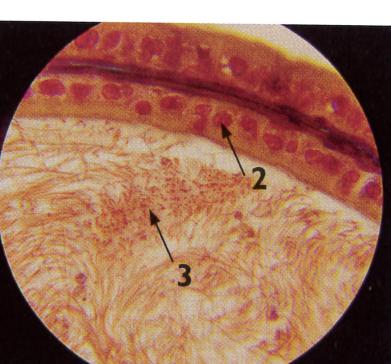
Figure 7.16 Coupe transversale d'un œsophage humain.



a) Objectif $\times 4$



b) Objectif $\times 10$
1 : Conjonctif riche en collagène



c) Objectif $\times 100$ (*oil*)
2 : Noyau de cellule 3 : Amas de spermatozoïdes

Figure 7.17 Coupe transversale d'épididyme de testicule de cobaye.

b) Ouverture numérique et limite de résolution

La caractéristique la plus importante d'un objectif, celle qui conditionne le pouvoir de résolution du microscope, n'est pas son grossissement $\gamma_{monture}$ mais une grandeur ω_0

appelée **ouverture numérique**. Sa valeur numérique est indiquée à droite du grossissement sur la monture. Les objectifs $\times 2.5$, $\times 10$ et $\times 40$ de la figure 7.18 possèdent des ouvertures numériques égales respectivement à 0.08, 0.22 et 0.65.

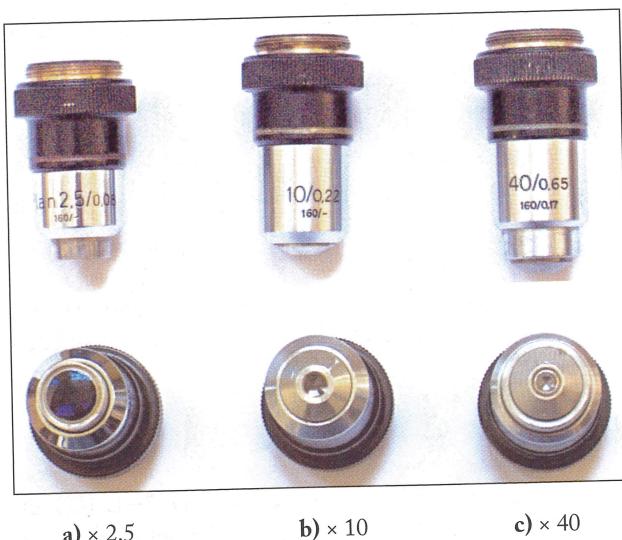


Figure 7.18 Objectifs de microscope Zeiss $\times 2.5$, $\times 10$ et $\times 40$.

La limite de résolution d'un microscope est la distance minimale devant exister entre deux points A et B de la lamelle échantillon pour que leurs images à travers le microscope soient séparées.

Cette distance minimale AB_{min} est imposée par le phénomène de diffraction. On montre que²⁵ :

$$AB_{min} = \frac{0,61\lambda_0}{n \sin u} = 0,61 \frac{\lambda_0}{\omega_0}$$

où n est l'indice du milieu objet, u le demi-angle d'ouverture du faisceau incident sur l'objectif (figure 7.11), λ_0 la longueur d'onde dans le vide de la radiation utilisée et $\omega_0 = n \sin u$ l'ouverture numérique de l'objectif.

Lorsqu'une radiation monochromatique de longueur d'onde λ_0 traverse la lamelle échantillon, elle rencontre des inhomogénéités d'indice de taille comparable à λ_0 . Celles-ci se comportent comme des sources secondaires qui réémettent la lumière dans d'autres directions que celle de la lumière incidente : il y a **diffractio**n. L'information sur les détails spatiaux les plus fins de l'objet est contenue dans les rayons diffractés les plus inclinés par rapport à l'axe optique.

Plus le demi-angle d'ouverture u du faisceau incident est important, plus l'objectif possède une ouverture numérique ω_0 élevée, et meilleure est la résolution.

²⁵ La limite de résolution est obtenue en appliquant le critère de Rayleigh (cf. § 10.6, chapitre 10) dans le plan de l'image intermédiaire. Le faisceau issu d'un point objet A de la lame échantillon est diffracté par la monture de l'objectif. Le rayon de la tache principale de diffraction (ou disque d'Airy) dans le plan de l'image intermédiaire vaut $R_1 = \frac{0,61\lambda_1}{u_1} \approx \frac{0,61\lambda_0}{n_1 \sin u_1}$, où n_1 est l'indice dans l'espace intermédiaire, $\lambda_1 = \lambda_0/n_1$ et $u_1 \approx \sin u_1$ ($u_1 \ll 1$). En appliquant la relation d'Abbe, $n AB \sin u = n_1 A_1 B_1 \sin u_1$,

on peut remonter à la limite de résolution dans l'espace objet : $AB_{min} = \frac{n_1 \sin u_1 A_1 B_1 \sin u_1}{n \sin u} = \frac{n_1 \sin u_1 R_1}{n \sin u} = \frac{0,61 \lambda_0}{n \sin u}$

Pour abaisser la limite de résolution au maximum, on utilise des radiations ultraviolettes et un objectif de grande ouverture numérique. Avec un objectif à immersion ($n_{liq} = 1,50$) d'ouverture numérique $\omega_0 = 1,25$ et des radiations de longueur d'onde $\lambda_0 = 400$ nm, on obtient une résolution spatiale $AB_{min} \approx 0,2 \mu\text{m}$.

La limite de résolution de l'objectif conditionne celle du microscope lui-même. En effet, si l'image intermédiaire donnée par l'objectif n'est pas résolue, l'image finale agrandie par l'oculaire ne le sera pas mieux. Il est donc inutile de recourir systématiquement aux grossissements commerciaux les plus forts.

L'angle d'ouverture du faisceau incident sur l'objectif est important : $u = 40^\circ$ pour un objectif à sec d'ouverture numérique $\omega_0 = 0,65$; $u = 56^\circ$ pour un objectif à immersion ($n_{liq} = 1,50$) d'ouverture numérique $\omega_0 = 1,25$. Avec des rayons aussi inclinés par rapport à l'axe, on est très loin des conditions de Gauss et de stigmatisme approché.

L'optique d'un objectif de microscope est une optique non paraxiale. Elle utilise les **points de Weierstrass** du dioptrre sphérique²⁶ pour réaliser une image rigoureusement stigmatique et aplanétique de l'objet. Le schéma de principe d'un objectif à immersion est représenté figure 7.19. Il est constitué d'une succession d'éléments comprenant dans l'ordre : une lentille demi-boule appelée lentille de tête, un **ménisque d'Amici** et deux doublets achromatiques de Lister²⁷. Le demi-angle d'ouverture u du faisceau est ainsi réduit progressivement jusqu'à des valeurs compatibles avec une optique paraxiale.

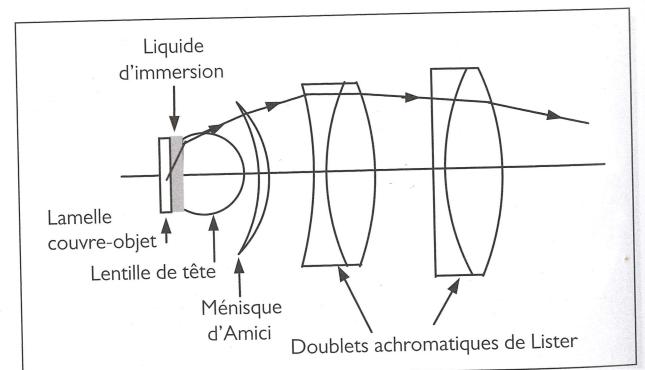


Figure 7.19 Objectif à immersion homogène.

²⁶ Un dioptrre est une surface de séparation entre deux milieux transparents d'indices n_1 et n_2 . Une lentille sphérique mince est constituée de l'association de deux dioptrres sphériques de rayons de courbure algébriques R_1 et R_2 . Les points de Weierstrass W et W' sont deux points sur l'axe d'un dioptrre sphérique, pour lesquels ce dernier réalise un stigmatisme rigoureux et un aplanétisme. Pour le calcul de leur position, cf. A. MAUREL, Optique géométrique (cours) - DEUG/Licence, coll. Belin Sup Sciences, Éd. Belin, 2002, p. 75-76.

²⁷ Pour plus de détails sur la conception des objectifs de microscope, on pourra consulter : G. ROBLIN, Microscopie optique, dossier n° 44 de l'Adasta, juin 1995, p. 21-29.

7.2.8. Oculaire

Fonctionnant à la manière d'une loupe, l'oculaire sert à agrandir l'image intermédiaire fournie par l'objectif. Il est caractérisé par son grossissement commercial $G_{oc} = \frac{1}{(4\delta)f_{oc}}$ ou $G_{oc} = \frac{250 \text{ mm}}{f_{oc}}$. G_{oc} correspond à l'une des valeurs numériques standard suivantes : 5, 10, 12, 16, 20, 25, indiquée sur sa monture.

a) Verre de champ et verre d'œil – Achromatisme apparent

Les oculaires classiques sont constitués d'un doublet de lentilles non accolées appelées respectivement **verre de champ** (situé du côté de l'objectif) et **verre d'œil** (situé du côté de l'œil). L'utilisation d'un doublet permet de corriger le chromatisme de grandeur²⁸ et d'obtenir un champ de vision plus important qu'avec une lentille simple.

Le principe de correction du chromatisme de grandeur est illustré figure 7.20. Le verre de champ étant dispersif, les « rayons bleus » sont plus déviés que les « rayons rouges ». Ils se retrouvent plus près de l'axe optique lors de la traversée du verre d'œil, où ils seront donc moins déviés. En choisissant l'écartement e et les distances focales f'_1 et f'_2 des deux lentilles de manière adéquate, les rayons bleus et rouges émergeront parallèles du doublet et convergeront au même point de la rétine. Le doublet réalise alors un **achromatisme apparent**. Attention, les positions des foyers principaux image F'_b et F'_r et des points principaux image H'_b et H'_r ne sont pas confondues. Ce sont les distances focales images $H'_b F'_b$ et $H'_r F'_r$ qui sont identiques pour les radiations bleues et rouges. En pratique, on impose que la distance focale f' du doublet, et donc sa vergence $C = 1/f'$, soit identique pour les raies rouge C et bleu-vert F du spectre de l'hydrogène.

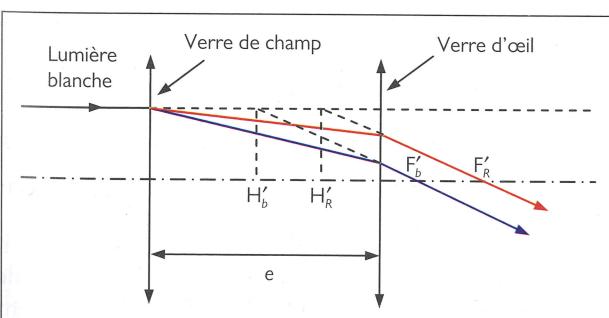


Figure 7.20 Principe de l'achromatisme apparent.

D'après la figure 120 p. 278 de A. DANJON et A. COUDER, Lunettes et télescopes, réédition Librairie Albert Blanchard 1999

²⁸ Aberration extra-axiale selon laquelle la grandeur de l'image bleue n'est pas la même que celle de l'image rouge.

La distance focale image f' d'un doublet de lentilles $\{L_1, L_2\}$ non accolé d'épaisseur e vaut²⁹ :

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e}$$

En prenant l'inverse de cette expression, on obtient la **relation de Gullstrand** : $C = C_1 + C_2 - eC_1 C_2$ où $C = 1/f'$, $C_1 = 1/f'_1$ et $C_2 = 1/f'_2$ sont les vergences respectives du doublet et des lentilles L_1 et L_2 ³⁰.

Soit dC la variation élémentaire de C induite par une variation élémentaire $d\lambda_0$ de la longueur d'onde des radiations incidentes :

$$dC = dC_1 + dC_2 - eC_1 dC_2 - eC_2 dC_1 \\ = (1 - eC_2)dC_1 + (1 - eC_1)dC_2$$

Assimilons dC , dC_1 et dC_2 aux variations de vergence $\Delta C = C(F) - C(C)$, $\Delta C_1 = C_1(F) - C_1(C)$ et $\Delta C_2 = C_2(F) - C_2(C)$ du doublet et des lentilles L_1 et L_2 entre les raies C et F de l'hydrogène. Assimilons C_1 et C_2 aux vergences $C_1(d)$ et $C_2(d)$ de L_1 et L_2 pour la raie intermédiaire jaune d de l'hélium. La condition d'achromatisme apparent impose alors :

$$\Delta C = (1 - eC_2(d))\Delta C_1 + (1 - eC_1(d))\Delta C_2 = 0 \quad (1)$$

b) Oculaires de Ramsden et de Huygens

Il existe deux manières de satisfaire la condition (1).

- Soit $eC_2(d) = eC_1(d) = 1 \Leftrightarrow f'_1 = f'_2 = e$

La condition (1) est alors satisfaite quelle que soit la nature des verres utilisés pour le verre de champ et le verre d'œil. Cette première solution correspond à

l'**oculaire de Ramsden** $\left(\frac{f'_1}{1} = \frac{e}{1} = \frac{f'_2}{1}\right)$ ou $(1, 1, 1)$, oculaire convergent de focale $f' = +e$. Tel quel, il présente cependant deux inconvénients majeurs :

- l'image finale donnée par l'oculaire étant rejetée à l'infini, l'image intermédiaire donnée par l'objectif se trouve dans le plan focal objet de l'oculaire. Comme $f'_1 = e$, ce plan est celui du verre de champ lui-même³¹. Les poussières et traces de doigts déposées sur le verre de champ seront alors vues nettes en même temps que l'image finale ;
- le cercle oculaire est situé au niveau du verre d'œil : il est donc impossible d'y placer son œil.

Pour y remédier, on décale le verre de champ légèrement à droite du plan de l'image intermédiaire. Cette version modifiée correspond au doublet $\left(\frac{f'_1}{3} = \frac{e}{2} = \frac{f'_2}{3}\right)$ ou $(3-2-3)$ représenté figure 7.21³². **Le foyer objet F d'un tel oculaire est réel et situé légèrement à gauche du verre de champ. L'oculaire est dit positif.** Il est possible de

²⁹ Expression démontrée lors de l'étude du télescope.

³⁰ Pour $e = 0$ (doublet accolé), on retrouve la formule des vergences (cf. § 4.1.8, chapitre 4) : $C = C_1 + C_2$.

³¹ À condition d'assimiler ce dernier à une lentille mince.

³² Dans l'oculaire compensateur de Kellner, le verre d'œil est constitué d'un doublet permettant de corriger les aberrations résiduelles de l'objectif.

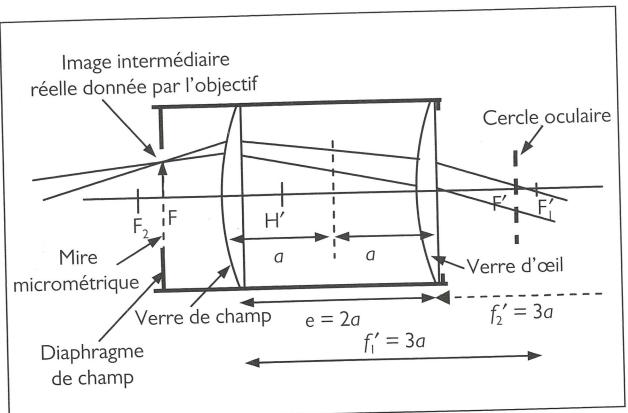


Figure 7.21 Oculaire positif (3-2-3) de type Ramsden. Le foyer objet F est réel, situé à gauche du verre de champ ; $f' = \overline{H'F'} = \frac{9a}{4}$.

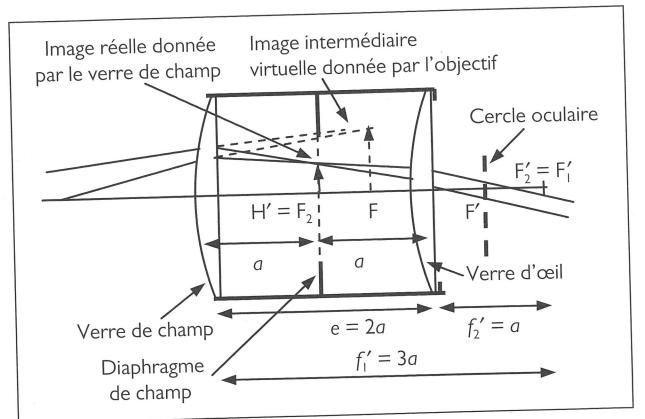


Figure 7.22 Oculaire négatif (3-2-1) de Dollond. Le foyer objet F est virtuel, situé entre le verre de champ et le verre d'œil ; $f' = \overline{H'F'} = \frac{3a}{2}$.

placer une mire micrométrique dans le plan de l'image intermédiaire. En l'absence de micromètre, on préférera cependant utiliser un oculaire négatif (*i.e.* tel que le foyer objet soit placé légèrement à droite du verre de champ)³³.
• Soit $eC_2(d) \neq eC_1(d)$, les verres des deux lentilles étant de même nature.

La vergence $C = 1/f'$ d'une lentille sphérique peut s'écrire sous la forme : $C(\lambda) = (n(\lambda) - 1)A$, où A est une constante ne dépendant que des rayons de courbure des deux dioptres sphériques.

$$C_1 = (n(\lambda_d) - 1)A_1 \text{ et } C_2 = (n(\lambda_d) - 1)A_2$$

$$\text{d'où } \begin{cases} \Delta C_1 = (n(\lambda_F) - n(\lambda_C))A_1 = C_1/v \\ \Delta C_2 = (n(\lambda_F) - n(\lambda_C))A_2 = C_2/v \end{cases}$$

où v définie par $\frac{n(\lambda_F) - n(\lambda_C)}{n(\lambda_d) - 1} = \frac{1}{v}$, est la **constriction** du verre, introduite au chapitre précédent, lors de l'étude des doublets achromatiques.

La condition (1) se réécrit alors :

$$(C_1/v)(1 - eC_2) + (C_2/v)(1 - eC_1) = 0 \Leftrightarrow f'_1 + f'_2 = 2e$$

Cette deuxième relation est réalisée dans l'**oculaire de Huygens** $\left(\frac{f'_1}{4} = \frac{e}{3} = \frac{f'_2}{2} \right)$ ou (4,3,2), ou dans la

variante de **Dollond** $\left(\frac{f'_1}{3} = \frac{e}{2} = \frac{f'_2}{1} \right)$ ou (3,2,1), représentée figure 7.22³⁴.

³³. Les oculaires positifs et négatifs sont tous les deux convergents. Le terme positif ou négatif fait référence à la position du foyer objet par rapport au verre de champ.

³⁴. Sur les schémas des figures 7.21 et 7.22, on suppose que le verre de champ et le verre d'œil se comportent comme des lentilles minces. Dans les oculaires compensateurs négatifs, le verre d'œil, constitué d'un doublet, permet de corriger les aberrations chromatiques résiduelles de l'objectif.

Ces oculaires sont négatifs. **Le foyer objet est virtuel, situé entre les deux verres**, donc inaccessible. On ne pourra pas les utiliser comme une loupe normale, car l'image donnée par l'objectif constitue un objet virtuel pour eux (les rayons convergent en arrivant sur l'oculaire, figure 7.22).

L'**oculaire de Huygens** possède un avantage par rapport à l'**oculaire de Ramsden** : à diamètre de verre de champ égal, le champ objet est plus large et plus net. Toutefois, le cercle oculaire, où doit être placé l'œil, est situé à seulement quelques millimètres du verre d'œil.

Dans les deux types d'oculaires, le verre de champ agit comme une lentille de champ, qui augmente considérablement le champ observable. Un diaphragme de champ est disposé dans le plan où se forme une image réelle, afin d'éliminer le champ de contour (*cf.* § 6.4.3 et 6.4.4, chapitre 6).

7.2.9. Développements récents en microscopie : microscopie électronique et microscopie à champ proche

Le pouvoir de résolution d'un microscope optique $(AB_{min} = 0,61 \frac{\lambda_0}{\omega_0})$ est limité par la nature ondulatoire de la lumière et le phénomène de diffraction. En microscopie optique classique, il n'est pas possible de descendre en dessous de $0,2 \mu\text{m}$, et le grossissement maximal est de l'ordre de 1000. Ceci est suffisant pour observer des cellules ou des bactéries, mais insuffisant pour observer des virus. Cependant, le pouvoir de résolution étant proportionnel à la longueur d'onde λ_0 , on peut espérer l'abaisser sensiblement en utilisant un flux de particules possédant une longueur d'onde λ_0 nettement inférieure à celle des photons. C'est le principe du

microscope électronique.

Dans ce dernier, le flux de photons est remplacé par un flux d'électrons fortement accélérés sous une tension U de quelques centaines de kilovolts, et qui acquièrent une quantité de mouvement P . D'après la relation de De Broglie, les électrons possèdent une longueur d'onde $\lambda_0 = \frac{h}{P}$ de l'ordre de quelques picomètres ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$)³⁵, environ 10^5 fois plus courte que la longueur d'onde moyenne des photons du domaine visible. Ce faisceau d'électrons est focalisé par un système de lentilles magnétiques ou électrostatiques équivalent à celui d'un microscope optique (on parle d'**optique électronique**). L'image obtenue repose sur la diffusion des électrons accélérés par l'échantillon de matière. Le premier microscope électronique fut conçu à Berlin en 1931. Les progrès furent constants avant et après la seconde guerre mondiale. Ils donnèrent lieu à plusieurs techniques successives de microscopie électronique.

Dans le **microscope électronique à balayage** (MEB), l'image n'est pas obtenue globalement comme dans un microscope optique ou électronique conventionnel, mais séquentiellement. La surface à analyser est balayée de manière programmée par un pinceau d'électrons très focalisé, comme dans un téléviseur cathodique de télévision. Le microscope électronique permet d'obtenir une résolution à l'échelle moléculaire, égale à une fraction de nanomètre. Le grossissement maximal, égal à environ $5 \cdot 10^5$, est supérieur d'un facteur 500 à celui d'un microscope optique. Par contre, la focalisation du flux d'électrons exige un fonctionnement sous vide, ce qui complique la préparation des échantillons.

Dans les années 1980, le phénomène d'**effet tunnel**³⁶, prévu de longue date par la mécanique quantique, va être mis à profit pour développer une nouvelle génération de microscopes, les **microscopes à champ proche**. Le premier **microscope à effet tunnel** a été mis au point dans les laboratoires d'IBM à Zurich en 1981. Il vaudra à ses deux concepteurs, Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, le prix Nobel de physique en 1986. Sa résolution latérale et longitudinale atteint cette fois une fraction de distance atomique, soit 10^{-10} m . Le microscope à effet tunnel électronique (STM) est un microscope à balayage dans lequel une très fine pointe métallique ou sonde est maintenue à une distance d'une fraction de nanomètre de la surface **conductrice** à analyser. Lorsqu'on applique une tension de quelques dizaines de millivolts entre la sonde et la surface à analyser, un courant décroissant exponentiellement avec la distance sonde-surface est recueilli par effet tunnel. Dans le mode à courant constant, le courant est maintenu constant lors du balayage de la surface par le biais d'un asservissement piézo-électrique qui commande le déplacement de la sonde. Ce dernier permet alors de reconstituer le profil de la surface analysée³⁷. Mais l'effet tunnel n'est pas l'apanage des seuls électrons. Un effet tunnel peut également être obtenu avec des photons. Analogique classique de l'effet tunnel quantique, le phénomène de **réflexion totale frustée** est mis à profit dès la fin des années 1980 pour élaborer des microscopes optiques à champ proche. Une pointe constituée d'une fibre optique monomode de diamètre nanométrique est approchée à quelques nanomètres de la surface d'un dioptrite sur lequel se produit une réflexion totale de lumière. Elle recueille alors une onde évanescante dont l'amplitude décroît exponentiellement avec la distance entre la pointe et la surface du dioptrite. Cette onde évanescante nous informe sur des détails plus fins que l'onde diffractée vers l'objectif du microscope. Elle permet d'atteindre des résolutions de l'ordre du nanomètre, comparables à celles de la microscopie électronique, mais sans les inconvénients de celle-ci³⁸.

7.2.10. Cahier expérimental

a) **Détermination expérimentale de la distance focale d'un objectif**

La distance focale d'un objectif peut être mesurée à l'aide de l'expérience suivante, conçue pour les lentilles ou systèmes épais de courte focale³⁹.

Le principe de l'expérience est décrit figure 7.23.a. On forme une image du filament d'une lampe quartz-iode sur la lentille frontale de l'objectif. Une lame micrométrique⁴⁰ est disposée légèrement en avant de l'objectif, de manière à en obtenir une image très agrandie sur un écran éloigné⁴¹ (figure 7.23.b en haut). On montre alors que $f'_{ob} = \frac{p'}{1 + |\gamma_{ob}|}$, où $p' = \overline{H'A'}$ et

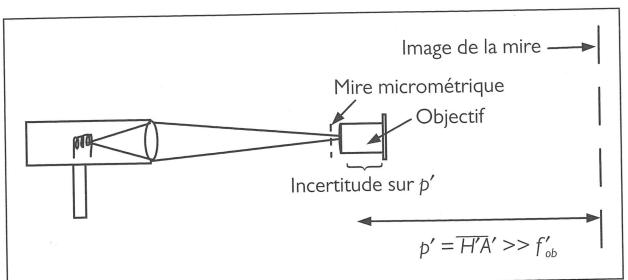
³⁷. Le microscope à effet tunnel électronique ne permet d'analyser que les surfaces de matériaux conducteurs ou semi conducteurs. Dans le cas de matériaux isolants, on utilise un microscope à force atomique (AFM). Ce dernier repose sur les mesures de déformation d'une pointe, reliée à un levier microscopique, soumise à des forces électrostatiques interatomiques très faibles avec la surface à analyser.

³⁸. Pour plus de détails sur la microscopie optique à champ proche, on pourra consulter : G. ROBLIN, *Microscopie optique*, dossier pédagogique n° 44 de l'Adasta, juin 1995, p. 79-84.

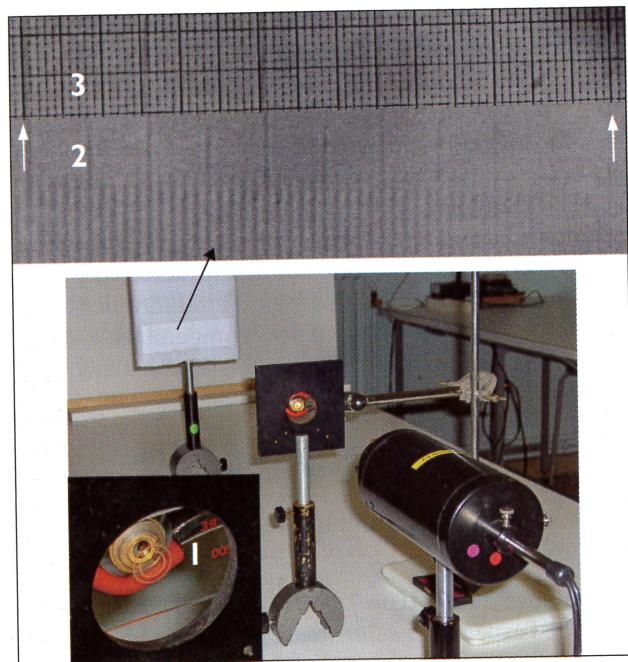
³⁹. SEXTANT, *Optique expérimentale*, coll. Enseignement des sciences, Éd. Hermann, 1997, p. 23.

⁴⁰. La lame micrométrique comporte une série de 200 traits fins gravés tous les $10 \mu\text{m}$, ainsi que des graduations plus espacées tous les $50 \mu\text{m}$ et tous les $100 \mu\text{m}$, comme sur une règle. On décalera au besoin légèrement la mise au point sur la lentille de l'objectif, de façon à éviter la présence d'aberrations chromatiques au niveau de la mire micrométrique.

⁴¹. L'objectif étant un système épais, la condition $p' = \overline{H'A'} \gg f'_{ob}$ permet de minimiser l'incertitude sur la valeur de p' (*cf.* figure 7.23.a), et donc sur f'_{ob} .



a) Principe du montage – Échelles non respectées



b) Expérience

1 : Mire micrométrique 2 : Image de la mire 3 : Feuille de papier millimétré témoin (une graduation fine = 1 mm)

Figure 7.23 Mesure de la distance focale f'_{ob} d'un objectif.

$$|\gamma_{ob}| = \frac{A'B'}{AB} \text{ sont respectivement la « distance image »}$$

et la valeur absolue du grandissement de l'objectif ($\gamma_{ob} < 0$)⁴². La mesure de $|\gamma_{ob}|$ et de p' permet alors de déterminer f'_{ob} . Pour calculer $|\gamma_{ob}|$, on mesure le rapport d'espacement entre un nombre donné de traits de la mire image et de la mire objet. Ainsi, pour l'objectif $\times 40$, cinq intervalles de 0,1 mm de la mire objet correspondent à une largeur de 74 mm sur la mire image

⁴² La relation de Descartes adaptée aux systèmes épais donne :

$$\frac{1}{H'A'} - \frac{1}{HA} = \frac{1}{f'_{ob}} \text{ soit } \frac{1}{H'A'} \left(1 - \frac{H'A'}{HA} \right) = \frac{1}{f'_{ob}}$$

Or $\overline{H'A'} = p'$ et $\frac{\overline{H'A'}}{HA} = \gamma_{ob} < 0$

d'où $\frac{1}{p'} (1 + |\gamma_{ob}|) = \frac{1}{f'_{ob}}$ puis $f'_{ob} = \frac{p'}{1 + |\gamma_{ob}|}$

(figure 7.23.b en haut). Le grandissement associé est donc, en valeur absolue : $|\gamma_{ob}| = \frac{74}{0,5} = 148$.

Les différentes mesures, effectuées pour les objectifs $\times 10$ et $\times 40$ de la figure 7.18, sont résumées dans le tableau 7.2⁴³.

On vérifie que plus le grandissement monture $\gamma_{monture}$ de l'objectif est important, plus la distance focale image f'_{ob} est courte. On notera la petitesse de f'_{ob} pour l'objectif $\times 40$: $f'_{ob} = 4,5$ mm⁴⁴. Pour former l'image de la mire sur l'écran, on doit pratiquement coller celle-ci contre l'objectif. On vérifie de plus, avec la formule $\Delta = f'_{ob} \gamma_{monture}$, que la valeur de Δ n'est pas normalisée et varie selon l'objectif.

b) Détermination expérimentale de l'ouverture numérique d'un objectif

Pour déterminer l'ouverture numérique d'un objectif de microscope, deux expériences peuvent être proposées.

Dans la première⁴⁵, un trou fin de 1 à 2 mm de diamètre, percé dans une plaque d'aluminium, est disposé juste après l'objectif d'un projecteur de diapositives, à l'endroit où se forme une image du filament de la lampe (figure 7.24.a et b). L'objectif du microscope est retourné, l'épaulement étant placé rigoureusement à 150 mm du trou source⁴⁶. Le faisceau lumineux doit recouvrir complètement la surface de l'objectif. Afin d'éliminer la lumière parasite sur l'écran de projection, on dispose un cache circulaire juste après l'objectif (figure 7.24.a et b)⁴⁷. Le faisceau lumineux qui sort de l'objectif converge à une distance b de la face de sortie, puis diverge pour former un disque lumineux de diamètre D sur l'écran de projection, disposé à une distance d de la face de sortie.

À partir des mesures de D , d , b , on calcule $A = \tan u = \frac{D}{2(d-b)}$, d'où $\omega_0 = \sin u = \frac{A}{\sqrt{1+A^2}}$.

La distance parafocale vaut $d_{ob} = a + b$ (figure 7.24.a). Les mesures, effectuées pour les objectifs $\times 10$ et $\times 40$ de la figure 7.18, sont résumées dans le tableau 7.3. On obtient des valeurs de ω_0 en excellent accord avec les valeurs indiquées sur les montures (figure 7.18) : $\omega_0 = 0,22$ pour l'objectif $\times 10$ et $\omega_0 = 0,65$ pour l'objectif

⁴³ Attention, le grandissement $|\gamma_{ob}|$ mesuré ici ne correspond pas au $|\gamma_{ob}| \times 10$ ou $\times 40$ indiqué sur la monture (noté $\gamma_{monture}$ dans le tableau 7.2). En effet, lorsqu'il est utilisé dans le microscope, l'objectif doit former une image intermédiaire située au voisinage du plan focal objet de l'oculaire.

⁴⁴ Les valeurs de f'_{ob} obtenues dans le tableau 7.2 sont conformes aux valeurs standard données dans G. ROBLIN, *Microscopie optique*, dossier pédagogique n° 44 de l'Adasta, juin 1995, p. 21.

⁴⁵ SEXTANT, *Optique expérimentale*, coll. Enseignement des sciences, Éd. Hermann, 1997, p. 52.

⁴⁶ Cette valeur correspond à la distance entre l'épaulement de l'objectif et le plan de l'image intermédiaire dans le fonctionnement réel du microscope (figure 7.13). Ici, le trajet de la lumière se fait cependant en sens inverse.

⁴⁷ Attention au positionnement du cache, qui ne doit pas diaphragmer le faisceau sortant de l'objectif !

Tableau 7.2 Mesures permettant de déterminer la distance focale image f'_{ob} de l'objectif.

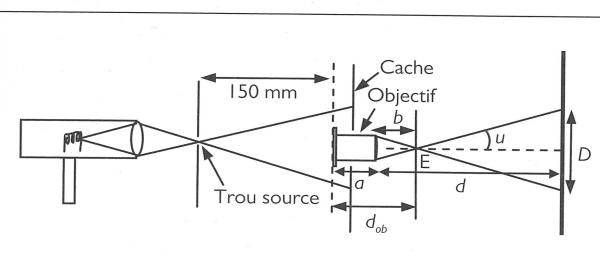
	$\overline{A'B'}$ (mm)	\overline{AB} (mm)	$ \gamma_{ob} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$	$p' = \overline{H'A'}$ (mm)	f'_{ob} (mm)	$\Delta = f'_{ob} \gamma_{monture}$ (mm)
Obj. $\times 10$	82	2,0	41,0	690	16,4	$164 = 16,4 \times 10$
Obj. $\times 40$	74	0,5	148	665	4,46	$178 = 4,46 \times 40$

Tableau 7.3 Mesures permettant de déterminer l'ouverture numérique et la distance parafocale d'un objectif.

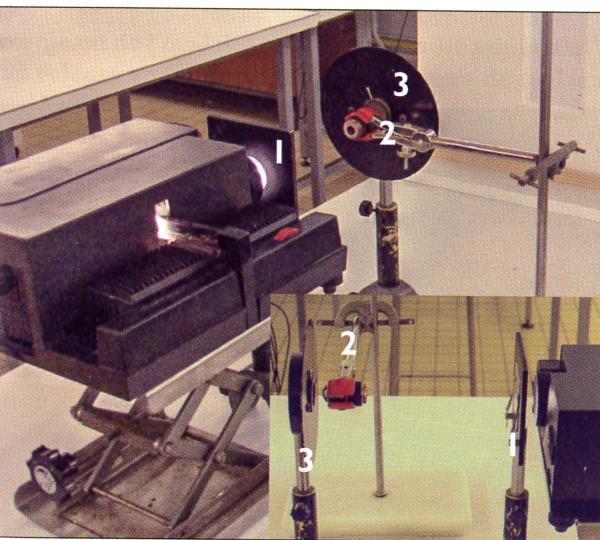
	b (mm)	a (mm)	D (cm)	d (cm)	$\omega_0 = \sin u$	$d_{ob} = a + b$ (mm)
Obj. $\times 10$	5	40	24,7	55,7	0,22	45
Obj. $\times 40$	≈ 0	45	39,0	22,8	0,65	45

$\times 40$. Dans les deux cas, la distance parafocale est égale à la valeur standard $d_{ob} = 45$ mm.

L'ouverture numérique peut également être déterminée à l'aide d'un dispositif appelé **aperto-**



a) Schéma de principe de l'expérience



b) Montage expérimental
1 : Trou source 2 : Objectif retourné 3 : Cache circulaire

Figure 7.24 Détermination expérimentale de l'ouverture numérique d'un objectif.

mètre d'Abbe⁴⁸, dont une variante est représentée figure 7.25.

À l'aide d'un papier calque autocollant et d'un stylo de décoration, on réalise sur le pourtour circulaire d'un demi-cylindre de plexiglas (indice $n_p = 1,50$), une graduation angulaire diffusante (figure 7.25.b). Sur la partie rectiligne du demi-cylindre, on colle un papier opaque en laissant une fente d'un millimètre de largeur au centre (figure 7.25.a). L'objectif est placé très près de la fente, dont il réalise l'image. Lorsque le demi-cylindre est éclairé, l'œil de l'observateur, placé à environ 16 cm en arrière de la fente, aperçoit dans l'image de celle-ci les graduations diffusantes situées à l'intérieur du cône de lumière entrant dans l'objectif (figure 7.25.a). Les graduations extrêmes lues correspondent à l'angle d'entrée maximal u_p dans le plexiglas : $n_p \sin u_p = n_{air} \sin u = \sin u = \omega_0$. Pour l'objectif $\times 40$, on lit $u_p \approx 25^\circ$, d'où $\omega_0 = 1,50 \times \sin(25^\circ) = 0,63$.

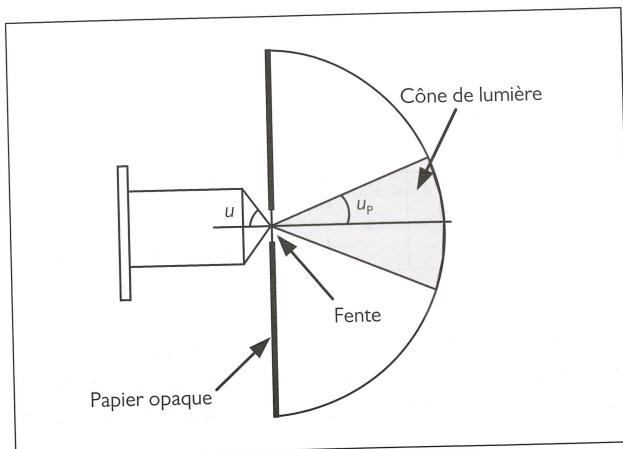
c) Réalisation d'un microscope sur table⁴⁹

Pour bien assimiler le principe de fonctionnement d'un microscope, le mieux est de réaliser soi-même un microscope sur table. Le montage de l'expérience est représenté figure 7.26.

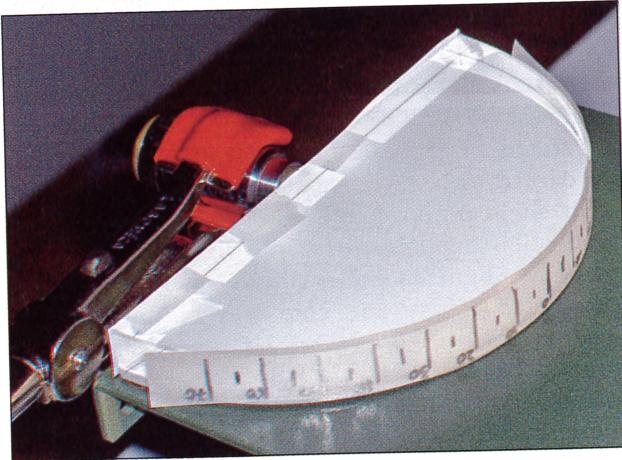
L'objet 2 est constitué d'une lettre F de 5 mm de hauteur disposée au centre d'une grille carrée de côté $a = 15$ mm et de pas égal à 1 mm (figure 7.27.a). Un morceau de calque est collé contre l'objet, l'ensemble constituant un objet dépoli. L'œil 6 est modélisé par une lentille convergente de focale $f'_{axil} = +300$ mm. Un écran avec papier quadrillé 7 simule la rétine.

⁴⁸ Cette méthode est plus souvent mentionnée que la première, mais reste délicate : l'observation des graduations n'est pas aisée au premier abord, et peu précise (il faudrait avoir la patience de tracer des graduations tous les degrés !).

⁴⁹ Cf. R. JOUANISSON, « Expériences d'optique à l'aide d'un projecteur de diapositives », dossier pédagogique n° 42 de l'Adasta, janvier 1995.



a) Schéma de principe



b) Apertomètre en plexiglas

Figure 7.25 Apertomètre d'Abbe.

Dans un premier temps, on se propose de mesurer le grossissement du microscope. On commence par déterminer la taille de l'image de l'objet donnée par l'œil/lentille seul.

On fixe la distance objet-œil à $d = 110 \text{ cm}$, valeur représentant symboliquement la distance au *punctum proximum* de l'œil/lentille. On ajuste la distance œil-rétine de façon à ce que l'image de l'objet soit nette sur l'écran/rétine :

$$\frac{1}{OA'} = \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_{\text{œil}}} = -\frac{1}{1,1 \text{ m}} + \frac{1}{0,30 \text{ m}} = 2,42 \text{ m}^{-1}$$

d'où $OA' = 0,41 \text{ m}$.

On dispose donc l'écran/rétine à $d_{\text{œil-rétine}} = 41 \text{ cm}$ de l'œil/lentille. L'image directe renversée est si petite que le pas d'origine du quadrillage (1 mm) et la lettre F ne sont pas résolus (figure 7.27.b). Soit AB la partie inférieure de la jambe de la lettre F dans le quadrillage objet : $AB = a/5 = 3 \text{ mm}$ (figure 7.27.a). Soit A'B' l'image directe renversée de AB donnée par l'œil/lentille seul. Le quadrillage image étant un carré de 6 mm de côté, on en déduit, par proportionnalité : $A'B' = a'/5 = 6/5 \text{ mm}$. On dispose maintenant l'oculaire, une lentille de focale $f'_{\text{oc}} = +200 \text{ mm}$, en avant de la lentille/œil, à une distance un peu supérieure à la distance focale f'_{oc} . On place la lentille objectif, de distance focale $f'_{\text{ob}} = +50 \text{ mm}$, après la lentille dépolie, à une distance légèrement supérieure à f'_{ob} . Sans toucher à la lentille/œil ni à l'écran/rétine, on ajuste la position relative de l'objectif et de l'oculaire de manière à obtenir :

- une image finale nette sur la rétine ;
- une image intermédiaire (renversée) de grossissement $\gamma \approx -10$ par l'objectif.

On s'assure de plus que la lentille/œil est positionnée au niveau du cercle oculaire, endroit où le faisceau

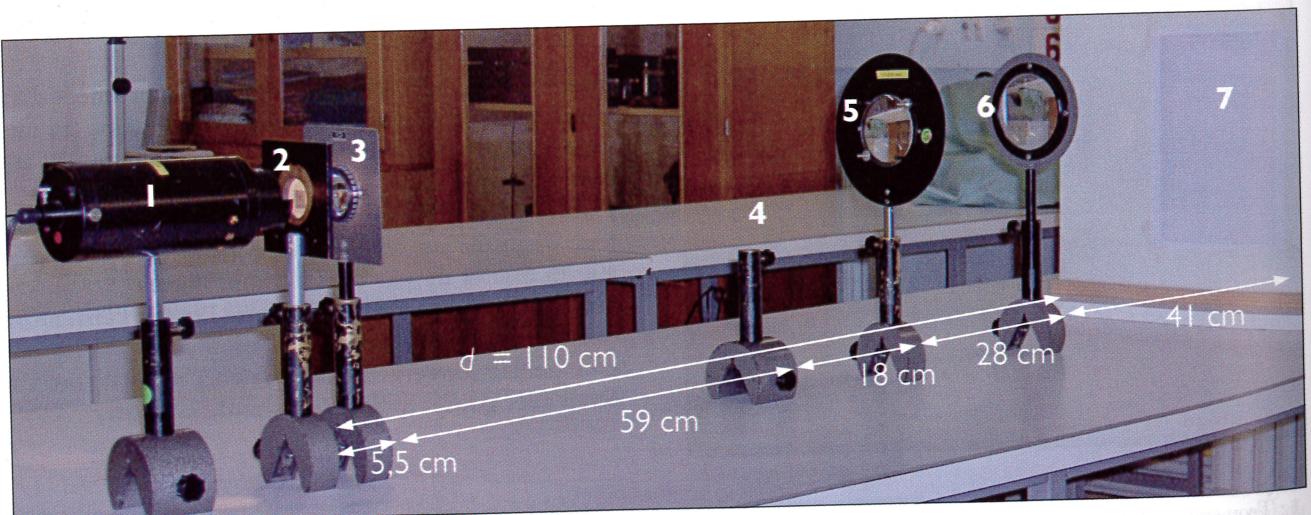
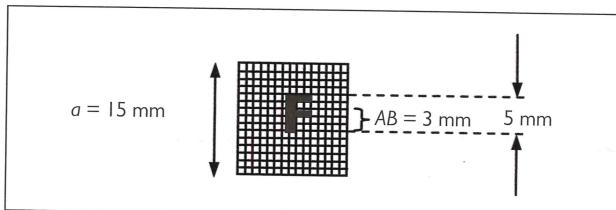
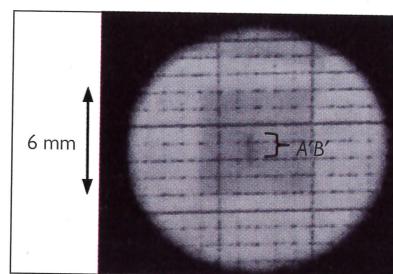


Figure 7.26 Microscope sur table - Montage.

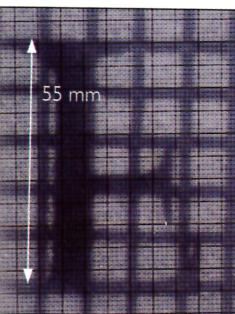
1 : Lampe 2 : Objet dépoli 3 Objectif ($f'_{\text{ob}} = +50 \text{ mm}$) 4 : Plan de l'image intermédiaire 5 : Oculaire ($f'_{\text{oc}} = +200 \text{ mm}$)
6 : Lentille/œil ($f'_{\text{œil}} = +300 \text{ mm}$) 7 : Écran/rétine



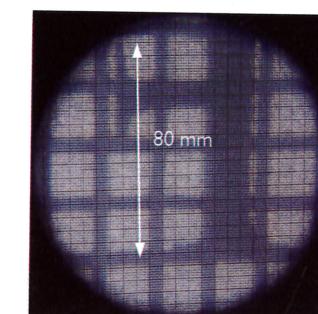
a) Objet dépoli



b) Image directe de l'objet formée par l'œil/lentille seul



c) Image intermédiaire donnée par l'objectif



d) Image finale à travers l'ensemble {microscope + œil/lentille}

Figure 7.27 Microscope sur table - Observations.

émergeant de l'oculaire possède une taille minimale⁵⁰. Les valeurs approximatives des distances de réglage sont indiquées sur la figure 7.26.

L'image intermédiaire renversée donnée par l'objectif est représentée figure 7.27.c. La lettre F renversée possède une taille égale⁵¹ à 55 mm et sa jambe inférieure une taille $A_1B_1 = 55 \times 3/5 = 33 \text{ mm}$. Le grossissement associé vaut $\gamma_1 = -33/3 = -11$. L'image intermédiaire constitue pour l'oculaire un objet réel situé entre son foyer objet et son centre optique :

$$O_2A_1 = -18 \text{ cm} \quad (f'_{\text{oc}} = 20 \text{ cm} > |O_2A_1|)^{52}$$

L'oculaire donne donc de A_1B_1 une image A_2B_2 virtuelle toujours renversée, et rejetée très en arrière. En appliquant la relation de conjugaison, on trouve :

⁵⁰ Ceci n'est vrai qu'avec un objet incohérent, dont chaque point envoie un faisceau qui couvre toute la surface de l'objectif (d'où l'usage ici du papier calque).

⁵¹ Sur la figure 7.27. c et d : traits gras = quadrillage de la grille objet ; traits fins = quadrillage du papier millimétré de l'écran.

⁵² Le microscope n'est pas utilisé ici dans des conditions intrinsèques (image intermédiaire dans le plan focal objet de l'oculaire et image finale rejetée à l'infini) et la distance d'au *punctum proximum* n'est pas égale à 25 cm.

$$\frac{1}{O_2A_2} = \frac{1}{f'_{\text{oc}}} + \frac{1}{O_2A_1} = \frac{1}{20,0 \text{ cm}} + \frac{1}{-18,0 \text{ cm}} = -5,55 \text{ cm}^{-1}$$

d'où $O_2A_2 = -180 \text{ cm}$. L'image A_2B_2 donnée par l'oculaire est située au-delà du *punctum proximum* de l'œil/lentille ($d = 110 \text{ cm}$), à gauche du foyer objet de celui-ci ($f'_{\text{œil}} = +300 \text{ mm}$). L'image finale $A''B''$ de A_2B_2 donnée par l'œil/lentille sera donc renversée, c'est à dire droite sur l'écran (figure 7.27.d)⁵³.

L'image finale sur la rétine est tellement agrandie que l'ensemble de la lettre F n'est pas visible⁵⁴. Pour la jambe inférieure de la lettre F, on mesure sur l'écran $A''B'' = 80 \text{ mm}$ (figure 7.27.d).

1) Le grossissement G du microscope sur table est égal au rapport des tailles des « images rétinianes » avec et sans instrument, soit : $G = \left| \frac{A''B''}{A'B'} \right| = \frac{80}{6/5} \approx 66$.

2) La puissance P du microscope est égale à :

$$P = |\gamma_1| P_{\text{œil}} \approx \frac{|\gamma_1|}{f'_{\text{œil}}} = \frac{11}{0,2} = 55 \delta$$

Par la relation $G = Pd$, on obtient $G = 55 \times 1,1 = 60,5$, valeur légèrement inférieure à celle donnée par la mesure directe de G , mais compatible avec elle.

3) La distance focale du microscope sur table vaut : $f' = -\frac{1}{P} = -1,8 \text{ cm}$.

4) L'ouverture numérique ω_0 de la lentille objectif, de diamètre $\Phi_{\text{ob}} = 40 \text{ mm}$, est donnée par :

$$\tan u \approx \frac{\Phi_{\text{ob}} / 2}{f'_{\text{ob}}} = \frac{40}{2 \times 50} = 0,40$$

d'où $\omega_0 = \sin u \approx 0,37$.

5) Terminons en comparant les valeurs expérimentale et théorique du rayon R' du cercle oculaire. À l'endroit où le faisceau émergeant de l'oculaire possède une taille minimale on mesure $R' = 7 \text{ mm}$. La valeur théorique de R' est donnée par la formule : $R' = \frac{\omega_0}{P} = \frac{0,37}{55 \text{ m}^{-1}} = 6,7 \text{ mm}$. L'accord est satisfaisant.

7.3 LUNETTE ASTRONOMIQUE

7.3.1 Approche historique

Au mois de mars 1610, Galilée publie à Venise un petit recueil d'astronomie révolutionnaire, le *Sidereus*

⁵³ Par contre, si vous ôtez la lentille/œil et placez votre propre œil au niveau du cercle oculaire, vous percevez bien une image finale à l'envers car le cerveau renverse les images !

⁵⁴ En disposant une lentille de champ dans le plan 4 de l'image intermédiaire, on peut augmenter considérablement le champ objet (fig. figure 6.29, chapitre 6), et voir l'image de la lettre F en entier.