

Chapitre VII

Les instruments optiques

LOUPES, OCULAIRES, MICROSCOPES



Le but de ces instruments est de donner, d'un petit objet, une image virtuelle sous un diamètre apparent aussi grand que possible et située, afin d'éviter toute fatigue d'accommodation, au Punctum Remotum de l'observateur.

VII.1 Classification et généralités

On se limite à deux groupes d'instruments d'optique assimilables à des systèmes centrés qui donnent de l'objet une image réelle ou virtuelle plus avantageuse à observer ou à stocker.

Les instruments qui donnent une image réelle constituent le premier groupe : les plus connus sont les objectifs des appareils de projection et les objectifs des appareils photos ou des caméras.

Le rôle des instruments du second groupe est de donner une image virtuelle ayant un diamètre apparent plus grand que l'objet observé à l'oeil nu. les plus connus sont les loupes et les microscopes pour l'examen de petits objets rapprochés et les lunettes pour l'observation des objets très éloignés ou des astres.

Bien que certaines des notions exposées dans ce chapitre soient applicables aux appareils des deux groupes, ce sont surtout les caractéristiques des instruments du second groupe qui sont décrites dans les paragraphes ci-après.

VII.2 Grandissement, puissance et grossissement

Ces grandeurs permettent de comparer les dimensions linéaires ou angulaires de l'image et de l'objet.

VII.2.1 Grandissement

Comme pour un dioptré ou une lentille, le grandissement est le rapport d'une dimension linéaire $A'B'$ de l'image à la dimension linéaire correspondante AB de l'objet.

C'est un nombre sans dimension. Il n'est intéressant que dans le cas où l'objet et l'image sont tous les deux à distance finie et tous les deux réels, c'est-à-dire pour des appareils du premier groupe.

$$\Gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \quad (\text{VII.1})$$

VII.2.2 Puissance

La puissance n'est définie que pour les instruments du second groupe, comme la loupe ou le microscope, servant à l'observation d'objets très rapprochés.

La puissance d'un instrument est le rapport de l'angle sous lequel on voit l'image donnée par l'instrument à la longueur de l'objet.

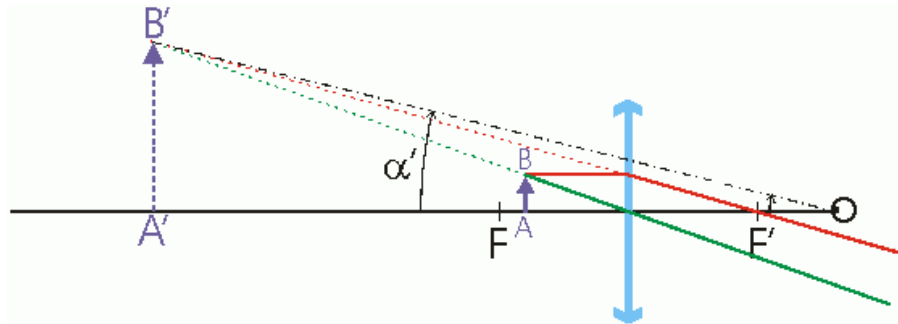


Figure VII-1

La figure VII-1 illustre l'observation d'un petit objet AB à l'aide d'une loupe. Sauf si l'image est à l'infini, α' dépend de la position de l'oeil.

$$P = \frac{\alpha'}{AB} \quad (\text{VII.2})$$

La puissance s'exprime en dioptries si α' est exprimé en radians et $\overline{AB}$ en mètres.

VII.2.3 Grossissement

Cette grandeur est surtout intéressante lorsque l'objet est très éloigné et que l'image observée est virtuelle comme c'est le cas des instruments du second groupe comme les lunettes astronomiques ou terrestres.

Le grossissement est le rapport des dimensions des images rétinienne dans la vision à travers l'instrument et dans la vision à l'oeil nu.

Mais les images rétinienne sont dans le rapport des diamètres apparents. Donc G , le grossissement est donné par (VII.3). C'est un nombre sans dimensions :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \quad (\text{VII.3})$$

Dans le cas de l'examen d'objets très rapprochés, à l'aide, par exemple, d'une loupe ou d'un microscope, l'angle est défini en plaçant l'objet au Punctum Proximum P, à la distance $d = \overline{OA}$ de l'œil O. Dans ce cas :

$$\alpha = \frac{\overline{AB}}{d} \Rightarrow G = \frac{\alpha'}{\overline{AB}} d$$

donc : $G = P.d$ (VII.4)

G dépend de l'observateur par l'intermédiaire de d . C'est pour s'affranchir de cette difficulté que le grossissement commercial G_C est défini en choisissant, pour un oeil moyen et dans un souci de simplification des calculs, la distance minimum de vision distincte d égale à $0,25m$.

Si P est en dioptries, on a alors :

$$G_C = \frac{P}{4}$$
 (VII.5)

VII.3 Loupes

Une loupe est une lentille convergente épaisse de courte distance focale. L'objet est placé entre la loupe et le foyer objet.

Pour l'observation, le centre optique noté O de l'oeil est placé au voisinage du foyer image F' de la loupe, comme le montre la figure VII-2 ci-dessous :

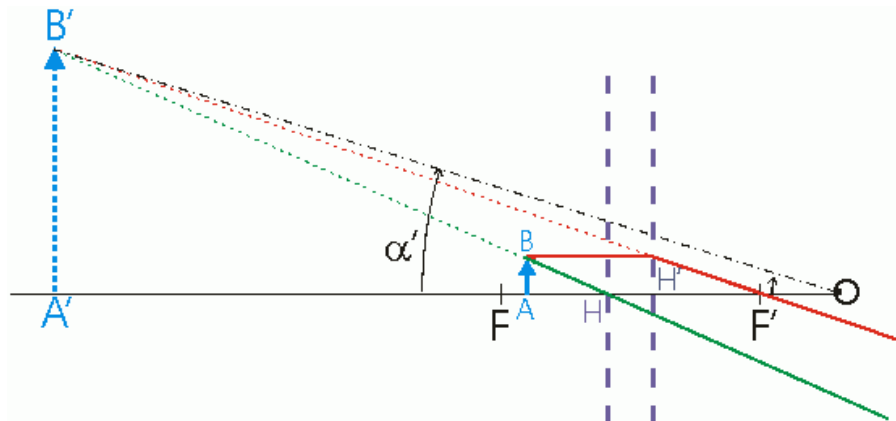


Figure VII-2

VII.3.1 Latitude de mise au point

Pour être vue nettement, l'image A'B' doit être située entre le Punctum Remotum R et le Punctum Proximum P de l'oeil. Si A_R et A_P désignent les conjugués de R et P, la distance $A_R A_P$ est la "latitude de mise au point".

On pose :

$\overline{RO} = D$ la distance maximale de vision distincte, $\overline{PO} = d$ la distance minimale de vision distincte et $\overline{F'O} = a$.

La formule de conjugaison de NEWTON appliquée aux couples de points conjugués A_R et R d'une part, A_P et P d'autre part, donne :

$$\overline{FA_R} \cdot \overline{F'R} = -\Phi^2 \Rightarrow \overline{FA_R} = \frac{-\Phi^2}{\overline{F'O} + \overline{OR}} = \frac{\Phi^2}{D - a}$$

et

$$\overline{FA_P} \cdot \overline{F'P} = -\Phi^2 \Rightarrow \overline{FA_P} = \frac{-\Phi^2}{\overline{F'O} + \overline{OP}} = \frac{\Phi^2}{d - a}$$

d'où, finalement :

$$\overline{A_R A_P} = \Phi^2 \left(\frac{1}{d - a} - \frac{1}{D - a} \right) \approx \Phi^2 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$$

Dans le cas d'un oeil normal $D = \infty$:



(VII.6)

VII.3.2 Puissance

Par définition, la puissance P vaut $\frac{\alpha'}{\overline{AB}}$. Or, dans les conditions de l'approximation de GAUSS, l'angle α' reste assez petit de telle sorte que :

$$\alpha' \approx \tan \alpha' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A'O}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \frac{\overline{AB}}{\overline{A'O}} = \frac{\overline{A'F'}}{\Phi} \frac{\overline{AB}}{\overline{A'O}}$$

Si on pose $\delta = \overline{A'O}$ la distance de visée, on a $\overline{A'F'} = \overline{A'O} + \overline{OF'} = \delta - a$

$$P = \frac{\delta - a}{\Phi} \frac{1}{\delta} = \frac{1}{\Phi} \left(1 - \frac{a}{\delta} \right)$$

Dans le cas général, la puissance dépend de la position de l'oeil de l'observateur " a " et de la distance de visée " δ ". La puissance prend une valeur caractéristique de la loupe : c'est la "puissance intrinsèque" notée P_i :



(VII.7)

VII.4 Oculaires

Les images données par les loupes sont de mauvaise qualité dès que la puissance atteint une vingtaine de dioptries. Pour améliorer cette qualité, tout en gardant une puissance élevée, on remplace les loupes par des " oculaires composés " : c'est-à-dire par des associations de lentilles.

Leur emploi est identique à celui des loupes simples en considérant les oculaires comme des systèmes centrés possédant des foyers F et F' , des plans principaux et " une " distance focale telle que $\overline{H'F'} = \Phi$ et $\overline{HF} = -\Phi$.

$$\overline{A_R A_P} \approx \frac{\Phi^2}{d} \quad \text{et} \quad P_i = \frac{1}{\Phi}$$

Le problème se réduit donc, à la détermination des éléments cardinaux connaissant les éléments de l'oculaire.

VII.4.1 Classification et description des oculaires

La plupart des oculaires sont des doublets : un doublet est constitué de deux lentilles minces de distances focales Φ_1 et Φ_2 séparées par un intervalle. Φ_1 , Φ_2 et e sont généralement proportionnels à des nombres entiers de telle sorte que :

$$\frac{f'_1}{m} = \frac{e}{n} = \frac{f'_2}{p} \quad (\text{VII.8})$$

avec $m > \text{ou} < 0$, $n > 0$, $p > \text{ou} < 0$. L'ensemble des trois entiers " m, n, p " constitue le symbole du doublet.

On distingue les oculaires :

- positif si le foyer objet est devant la première lentille ;
- négatif si le foyer objet est derrière la première lentille ;
- convergent si le foyer image est derrière la seconde lentille ;
- divergent si le foyer image est devant la seconde lentille.

VII.4.2 Exemple : Oculaire 3, 2, 1 d'HUYGENS

Le symbole signifie que : $\frac{f'_1}{3} = \frac{e}{2} = \frac{f'_2}{1} = a$. Les différents éléments composants l'oculaire sont représentés sur la figure VII-3 avec une unité "a" arbitraire. L'intervalle optique $\overline{F'_1 F_2}$ vaut :

$$\overline{F'_1 F_2} = \overline{F'_1 O_1} + \overline{O_1 O_2} + \overline{O_2 F_2} = -f'_1 + e - f'_2 = -2a$$

La position des foyers est obtenue par application des relations (IV.7) et (IV.8) :

$$\overline{F_1 F} = -\frac{f_1'^2}{\overline{F'_1 F_2}} = \frac{9a}{2} \quad \text{et} \quad \overline{F' F'_2} = -\frac{f_2'^2}{\overline{F'_1 F_2}} = -\frac{a}{2}$$

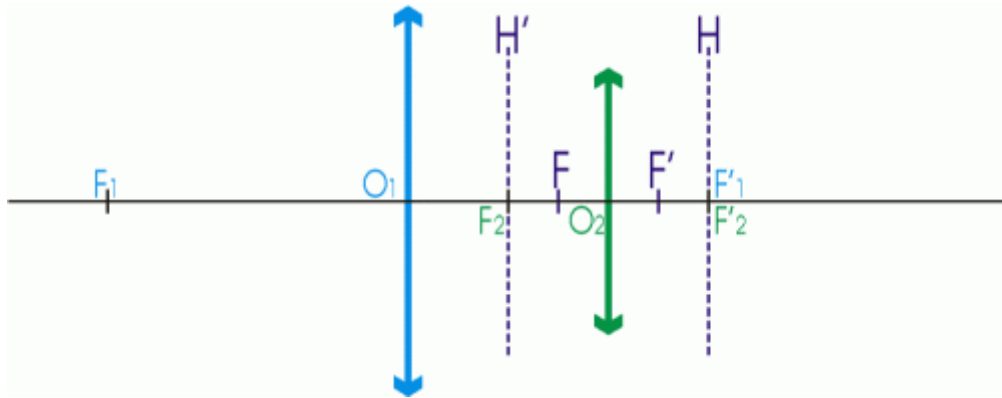


Figure VII-3

La distance focale Φ peut se calculer de la relation (IV.12) en remarquant que la vergence V_1 du premier système est simplement $\frac{1}{\Phi_1}$, la vergence V_2 du second système est $\frac{1}{\Phi_2}$ et que l'indice N du milieu entre les deux systèmes est égal à 1 :

On trouve finalement f' ce qui permet de positionner les plans principaux sur la figure VII-3.

On voit que l'oculaire (3,2,1) de HUYGENS est un oculaire négatif et convergent. Sa puissance intrinsèque P_i est le double de celle de la première lentille utilisée seule comme loupe.

VII.5 Microscopes

Le microscope sert à l'observation de très petits objets. Sa puissance est beaucoup plus grande que celle d'une loupe : de 100 à 6000 dioptries.

VII.5.1 Description générale

Un microscope réel avec un dispositif de réglage de l'éclairage élaboré est décrit sur la figure VII-4. L'instrument proprement dit comporte deux systèmes optiques épais de même axe :

- *l'objectif* qui donne de l'objet une image réelle très agrandie.
- *l'oculaire* qui sert à examiner cette image.

La distance entre l'oculaire et l'objectif est fixe de sorte que l'intervalle optique qui caractérise la distance entre le foyer image F_1' de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire est une constante (par souci de normalisation, de nombreux constructeurs ont fixé cette valeur entre 15 et 16 cm).

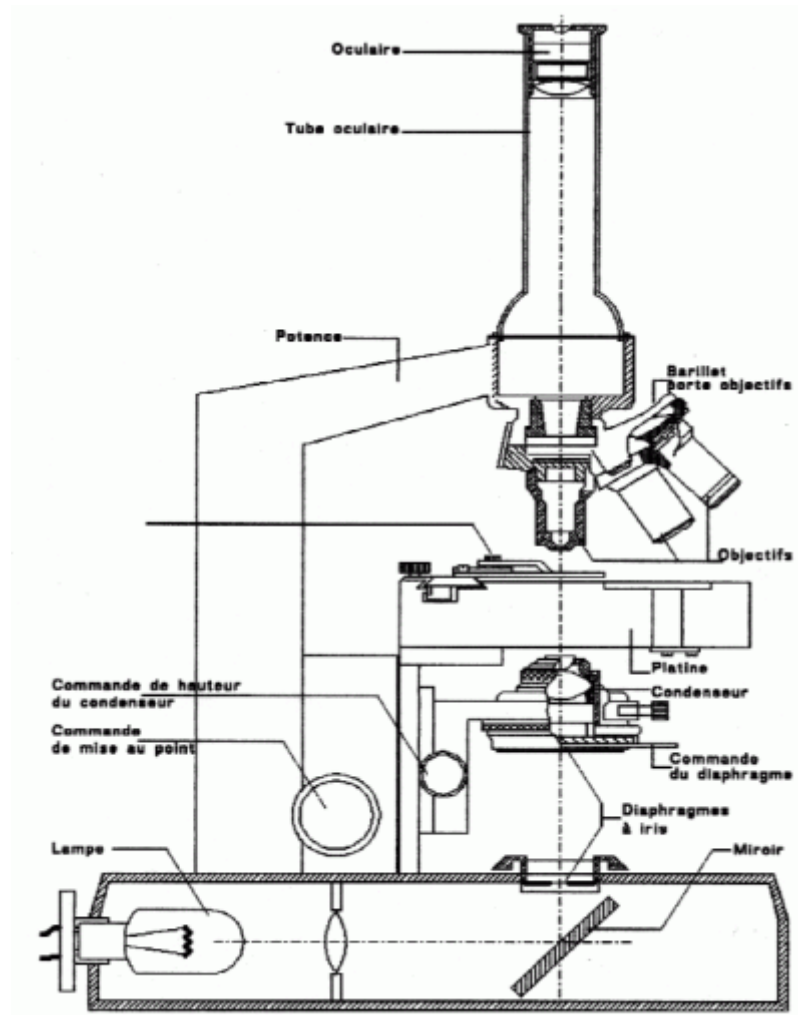


Figure VII-4

VII.5.1.1 L'objectif

Il doit donner une image réelle très agrandie à une distance assez faible pour que l'appareil ne soit pas trop encombrant : ce sera donc un système convergent de très petite distance focale (quelques mm). L'objet AB est placé très près et en avant du foyer objet de l'objectif (figure VII-5) et l'objectif en donne une image réelle A'B' renversée.

VII.5.1.2 L'oculaire

Il donne l'image définitive A''B'' virtuelle, de même sens que A'B' et donc renversée par rapport à AB. Sa distance focale est de quelques centimètres.

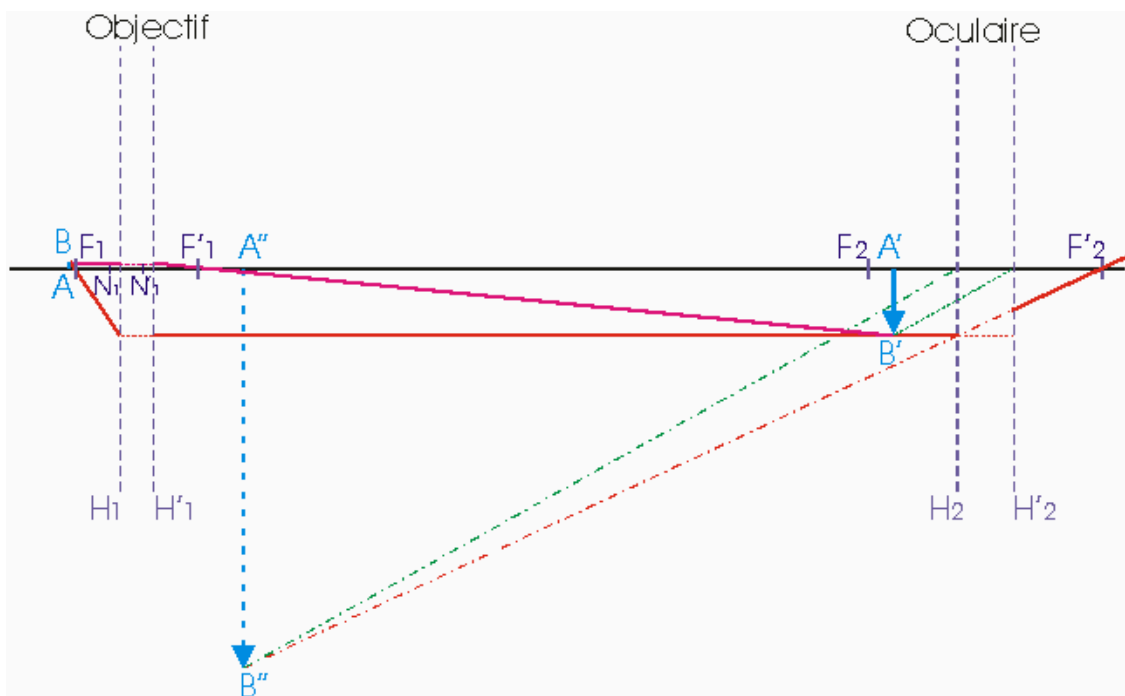


Figure VII-5

VII.5.1.3 Construction de l'image

Illustration numérique : pour situer l'ordre de grandeur des différentes quantités étudiées dans ce chapitre on fera à chaque fois l'application numérique (A.N.) pour un microscope dont l'objectif baigne dans l'air. On utilise les éléments cardinaux des deux systèmes centrés (voir figure VII-5) :

$$\Phi_1 = 5\text{mm} \quad (\text{distance focale de l'objectif}),$$

$$\Phi_2 = 2\text{cm} \quad (\text{distance focale de l'oculaire}),$$

$$\overline{F'_1 F_2} = 15\text{ cm} \quad (\text{intervalle optique}).$$

VII.5.1.4 Éléments cardinaux du microscope

Foyer image F' : à partir de la relation (IV.7)

$$\overline{F'_2 F'} = \frac{\Phi_2^2}{F'_1 F_2} \Rightarrow \text{A.N. } \overline{F'_2 F'} \approx +2.7\text{mm}$$

Le foyer image du microscope est un peu en arrière du foyer image de l'oculaire.

Foyer objet F : à partir de la relation (IV.8)

$$\overline{F_1 F} = -\frac{\Phi_1^2}{F'_1 F_2} \Rightarrow \text{A.N. } \overline{F_1 F} \approx -0.17\text{mm}$$

Le foyer objet du microscope est un peu en avant du foyer objet de l'objectif.

Distance focale : par application de la formule de GULLSTRAND on trouve :

d'où on tire :

(VII.9)

La distance focale du microscope est très courte et négative. Les foyers sont donc à l'intérieur de l'intervalle des plans principaux comme schématisé sur la figure VII-6.



Figure VII-6

VII.5.2 Puissance, grossissement, latitude de mise au point

VII.5.2.1 Première expression de la puissance

Si $\overline{A'B'}$ est la grandeur de l'image intermédiaire fournie par l'objectif, par définitions, on a :

$$\Gamma_1 = \frac{\overline{A'B'}}{AB},$$

le grossissement de l'objectif

$$P_2 = \frac{\alpha''}{\overline{A'B'}},$$

la puissance de l'oculaire

la puissance du microscope

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

ce qui montre que :

$$P = P_2 \Gamma_1$$

VII.5.2.2 Seconde expression de la puissance

Elle est obtenue en considérant le microscope comme un système épais qui joue le rôle de loupe. Les formules établies pour cet instrument s'appliquent. La puissance est toujours très voisine de la puissance intrinsèque car l'oeil est toujours très près du foyer image du système (voir ci-après) et les relations VII.2 et VII.4 donnent immédiatement :

$$P = \frac{1}{\Phi} = -\frac{\overline{F_1'F_2}}{\Phi_1\Phi_2} \Rightarrow \text{A.N. } P = 1500 \text{ dioptries}$$

VII.5.2.3 Grossissement

On se trouve dans le cas étudié au chapitre précédent. Les relations VI.4 et VI.5 donnent :

$$G = P.d \text{ et } G_C = \frac{P}{4} \Rightarrow \text{A.N. } G_C = 375$$

VII.5.2.4 Latitude de mise au point

Les résultats littéraux établis dans le cas de la loupe restent valables pour le système épais que constitue le microscope. On a donc :

$$\overline{A_R A_P} \approx \frac{\Phi^2}{d} \Rightarrow \text{A.N. } \overline{A_R A_P} \approx 1.8 \mu m$$

Ceci montre que le microscope ne permet d'observer que des objets très minces. On comprend aussi que, pour placer l'objet à la distance voulue de la face avant de l'objectif, il est indispensable d'avoir un mécanisme de déplacement extrêmement précis utilisant des vis micrométriques.