

F4. Instruments d'optique

I. INTRODUCTION

Les instruments d'optique ont pour but d'améliorer l'observation des objets en leur substituant des images. On classe ces appareils dans deux catégories principales :

- ceux qui fournissent des images réelles (téléobjectif, appareils de projection, appareil photographique,... permettant la visualisation ou l'impression de l'image sur un écran ou un film photosensible)
- ceux qui fournissent des images virtuelles observables uniquement à l'œil (miroir, télescope, lunette, périscope, endoscope, loupe, microscope).

Le présent travail pratique a pour but la réalisation de principe d'instruments à images réelles (microscope à projection, téléobjectif,...) sur banc optique, puis la mise en évidence de leurs caractéristiques principales.

II. BASES THEORIQUES

II.1. Optique géométrique.

L'optique géométrique se préoccupe de la propagation de la lumière sans se soucier de sa nature ondulatoire. Elle introduit le modèle du rayon lumineux et s'appuie sur les postulats suivants :

1. Propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène et isotrope.
2. Réversibilité des trajectoires lumineuses. Un rayon peut parcourir la même trajectoire indifféremment dans les deux sens.
3. Indépendance des rayons lumineux. Chaque rayon lumineux se propage indépendamment des rayons voisins qui n'exercent aucune influence sur lui.

Lorsqu'un rayon arrive sur la surface de séparation de deux milieux optiques différents (dioptré), il se scinde généralement en deux: un rayon réfléchi qui retourne dans le premier milieu, un autre réfracté qui pénètre dans le second milieu après changement de direction (Fig. 1)

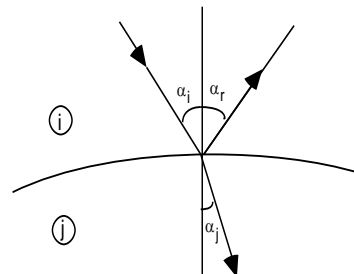


Fig1 : Réflexion et réfraction de la lumière

La géométrie des rayons impliqués est régie par les lois de Descartes-Snellius :

- 1) Les rayons incident, réfléchi, réfracté et la normale au dioptré issue du point d'incidence sont dans un même plan (Fig.:1).
- 2) Angles d'incidence α_i et de réflexion α_r sont égaux et de signes contraires.

$$\alpha_i = -\alpha_r \quad (1)$$

- 3) Pour chaque rayon monochromatique, les angles d'incidence α_i et de réfraction α_j sont reliés par les relations:

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_r} = n_{ji} = \frac{u_i}{u_j} \quad (2)$$

où n_{ji} est une constante appelée indice de réfraction du milieu j par rapport au milieu i pour la lumière envisagée. u_i et u_j sont les vitesses de la lumière dans les milieux i et j . Lorsque le milieu i est le vide, on a:

$$\frac{c}{u_j} = n_j \quad (3)$$

n_j étant l'indice absolu de réfraction du milieu et c la vitesse de la lumière dans le vide, qui est une constante universelle ($c = 2.99793 \cdot 10^8$ m/s). $c \geq u$.

On peut établir facilement que:

$$n_{ji} = \frac{n_j}{n_i} \quad (4)$$

En tenant compte du postulat 2, on obtient:

$$n_{ji} = \frac{1}{n_{ij}} \quad (5)$$

On a l'habitude de transcrire la loi (3) sous la forme:

$$n_i \cdot \sin \alpha_i = n_j \cdot \sin \alpha_j = n_k \cdot \sin \alpha_k = \dots = \text{const} \quad (6)$$

pour le rayon considéré.

Les indices varient avec la fréquence de la lumière considérée. Indiquons quelques valeurs:

air (à 0 °C et 760 mm de Hg)	1.000294
eau (à 20 °C)	1.33
verre (Crown)	1.52
verre (Flint)	1.6
diamant	2.4

SYSTEME OPTIQUE

Un système optique est constitué par un ensemble de surfaces, soit de séparation de milieux transparents différents (système dioptrique), soit de surfaces réfléchissantes (système catoptrique), soit les deux (système catadioptrique), de préférence simple pour en faciliter la réalisation pratique. La nature géométrique de la surface donne le nom au dioptré. Dans le cas d'un dioptré sphérique, la droite reliant le centre de la sphère au sommet choisi du dioptré définit l'axe principal du dioptré. Tout plan passant par cet axe définit une section principale. Lorsque toutes les surfaces d'un système optique sont de révolution autour d'un axe commun, le système est dit axé.

Un système optique définit une correspondance entre deux espaces qui peuvent se recouvrir: l'espace objet et l'espace image. L'optique géométrique fixe précisément la nature des correspondances entre ces deux espaces pour chaque système optique donné.

II.2. Lentilles.

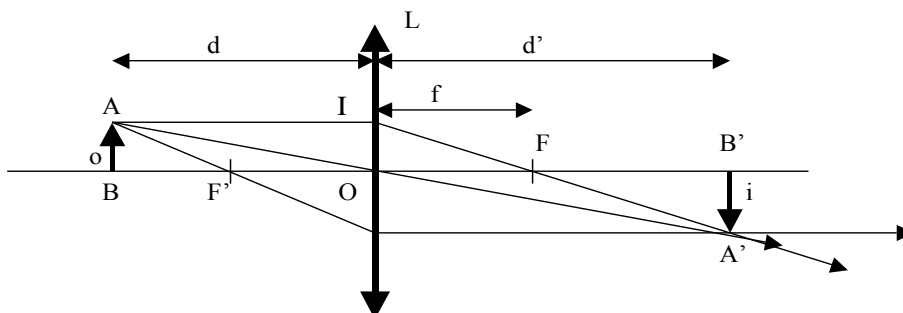
Un système optique constitué d'un milieu réfringent transparent limité par des surfaces sphériques constitue une lentille. Généralement, les lentilles sont en flint-glass (indice de réfraction: 1.6 à 1.7) ou en crown-glass (indice de réfraction: 1.5). On distingue deux catégories de lentilles : les lentilles convergentes et les lentilles divergentes.

Nous ne considérerons ici que des **lentilles minces** (on néglige l'épaisseur de la lentille) et que des rayons lumineux faiblement inclinés sur l'axe principal, ce qui permet des approximations au premier ordre. Les propriétés des lentilles minces sont:

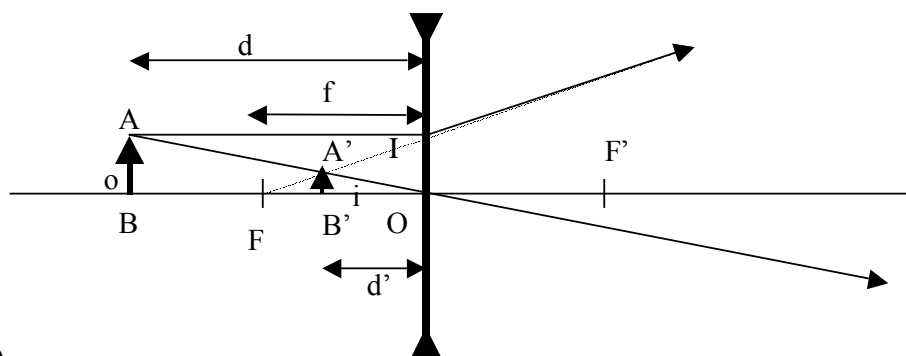
1. *Tout rayon lumineux passant par le centre optique d'une lentille mince ne subit aucune déviation*
2. *Tout rayon lumineux parallèle à l'axe principal d'une lentille se réfracte en passant réellement ou virtuellement par le foyer.*

L'image d'un objet formée par une lentille est le lieu géométrique des images des points qui constituent l'objet.

Soit à construire l'image d'un point A formée par la lentille convergente L (Fig. 2a). Nous connaissons les trajectoires de trois rayons lumineux issus du point A . L'intersection de deux de ces trajectoires suffit à déterminer la position de A' , point image de A . Le rayon AO passant par le centre optique O ne subit pas de déviation. Le rayon parallèle à l'axe optique passe, après réfraction, par le foyer F . Le rayon, qui passe par le foyer image F' , devient parallèle à l'axe optique après réfraction par la lentille. Le point A' , qui est à l'intersection de ces rayons réfractés, est l'image du point A , et l'image de la flèche AB est la flèche $A'B'$.



(a)



(b)

Fig. 2: Image d'un objet donnée par une lentille convergente (a) et divergente (b).

La construction géométrique de l'image d'un point formée par une lentille divergente est analogue à celle de la lentille convergente en remarquant toutefois que ce sont les prolongements des rayons réfractés qui convergent au point image (Fig. 2b). Dans le cas de la Fig. 2b, l'image de AB est virtuelle (ne peut pas être projetée sur l'écran).

Pour simplifier les notations, désignons par o la grandeur de l'objet AB, par i la grandeur de l'image A'B', par d la distance OB de l'objet à la lentille par d' la distance OB' de l'image à la lentille, par f la distance focale OF de la lentille.

Considérant les triangles semblables A'OB' et AOB, on obtient le grandissement γ :

$$\gamma = \frac{i}{o} = \frac{d'}{d} \quad (7)$$

et considérant les triangles semblables A'FB' et IFO on obtient

$$\frac{i}{o} = \frac{d' - f}{f} \quad (8)$$

Utilisant les relations (7) et (8), nous obtenons:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f} \quad (9)$$

Les formules (7) et (9) permettent de déterminer la position et les propriétés des images données par les lentilles à condition de convenir que les grandeurs d, d' et f sont positives s'il s'agit d'objets, images et foyers réels et négatives s'il s'agit d'objets, images et foyers virtuels. Puisque les lentilles réfractent la lumière, il en résulte que les grandeurs d et d' sont de même signe ou de signes contraires selon que ces grandeurs sont situées de part et d'autre ou du même côté de la lentille.

D'après ces conventions,

$f > 0$	lentille convergente	$f < 0$	lentille divergente
$d > 0$	objet réel	$d < 0$	objet virtuel
$d' > 0$	image réelle	$d' < 0$	image virtuelle

II.3. Stigmatisme.

La correspondance théorique et généralement biunivoque entre les espaces objet et image ne peut être qu'approchée en pratique. A un point objet M correspond en réalité une *surface caustique* pouvant, dans certains cas seulement, dégénérer pour se réduire à un point image M' . On dit alors que le *stigmatisme* est réalisé pour le point objet M . Mais il est impossible de réaliser ce stigmatisme pour tous les points de l'espace. On doit donc se contenter d'un *stigmatisme apparent* pour certaines portions d'espace seulement, en réduisant au mieux les dimensions des surfaces caustiques. Ce qui est suffisant en regard de l'imperfection des récepteurs (oeil, plaque photographique, etc.).

Systèmes optiques centrés

L'expérience et la théorie montrent que si l'on désire réaliser le stigmatisme pour un couple de points dans le cas d'un dioptré unique, celui-ci doit être de révolution autour de la droite qui joint les deux points. Les instruments d'optique seront donc naturellement constitués par une succession de dioptrés de révolution autour d'un axe commun appelé axe optique du système centré. Les milieux qui séparent ces dioptrés sont supposés transparents et isotropes et ils sont complètement définis par leur indice de réfraction.

Limitation des faisceaux

La qualité des images fournies par les systèmes centrés se conserve dans la mesure où l'on se limite au domaine paraxial qui est la portion de l'espace où l'on peut négliger dans les calculs les termes supérieurs au premier ordre par rapport aux inclinaisons des rayons lumineux sur l'axe optique, (inclinaisons inférieures à 1 degré d'arc). Dans le domaine ainsi défini, à toute figure objet d'un plan de front (perpendiculaire à l'axe optique) correspond une figure image située dans un autre plan de front (aussi perpendiculaire à l'axe optique). D'où la triple fonction des écrans matériels (diaphragmes) qui limitent l'étendue des faisceaux lumineux dans les instruments: 1) ils fixent l'éclairement de l'image; 2) ils limitent les dimensions de l'image et 3) ils arrêtent les lumières parasites.

II.4. Caractéristiques d'un instrument d'optique

- 1) **Le grossissement G** qui est le rapport de l'angle α' sous lequel on voit une dimension de l'objet à travers l'instrument, à l'angle α maximum sous lequel on peut la voir à l'œil nu.

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \quad (10)$$

- 2) **Le pouvoir séparateur** qui se rapporte à la limite de perception des détails. Il peut être limité par les aberrations (géométriques, chromatiques), les phénomènes de diffraction, la structure granulaire des écrans ou des plaques photographiques, l'acuité visuelle.

Dans le cas idéal d'un instrument parfaitement construit, les images des points sont en fait des taches circulaires de diffraction. La fig. 3 montre les allures du profil des brillances dans le cas d'un point lumineux image unique M' , puis dans celui de deux points lumineux M' et N' images voisines.



Fig. 3 : Aspects de point lumineux images fournis par des instruments

Le pouvoir séparateur dépend de l'ouverture u (Fig. 4) dans le milieu objet (u' dans le milieu image) du cône des rayons lumineux issus d'un point objet S sur l'axe et qui parvient jusqu'à son point image S' . Il dépend encore de l'indice n du milieu objet (n' du milieu image) et de la longueur d'onde λ de la lumière utilisée.

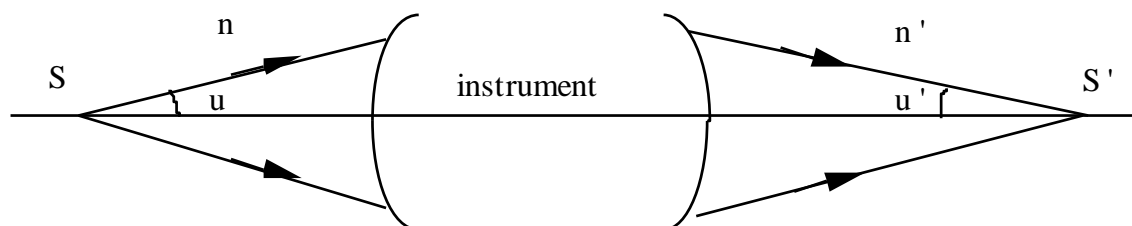


Fig. 4: Ouverture des faisceaux incidents et émergents dans un instrument

Le rayon R' d'une tache de diffraction vaut: $R' = \frac{0.61 \cdot \lambda}{n' \cdot \sin u'}$ (11)

La condition de séparation de deux points images s'écrit alors :

$$\overline{M'N'} \geq R' = \frac{0.61 \cdot \lambda}{n' \cdot \sin u'}$$

et de deux points objets $\overline{MN} \geq \frac{0.61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin u}$ (12)

3) **Le champ** est par définition la portion de l'objet dont l'instrument fournit une image nette.

4) **La clarté** concerne la luminosité apparente des objets vus à travers l'instrument.

La clarté se définit par le rapport :

$$C = \frac{\phi'}{\phi} \quad (13)$$

ϕ' et ϕ désignant respectivement les flux qui pénètrent dans l'oeil lors de la vision dans l'instrument et lors de la vision à l'oeil nu. C peut être supérieur à l'unité (étoile examinée au télescope).

III. EXEMPLES D'INSTRUMENTS D'OPTIQUE

III. 1. Microscope à projection

En principe le microscope à vision directe se compose d'une lentille objectif de courte distance focale (quelques mm) donnant une première image réelle agrandie de l'objet. Cette image est ensuite examinée à l'aide d'une lentille oculaire (de distance focale de l'ordre du cm) qui sert de loupe à l'oeil de l'observateur. En réalité objectif et oculaire se composent chacun de plusieurs lentilles destinées à augmenter les performances de l'instrument (correction des aberrations, pouvoir séparateur, clarté).

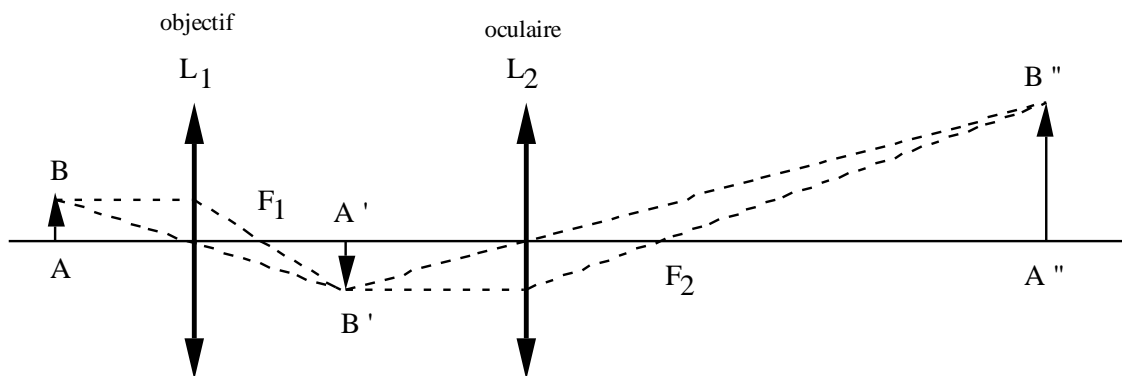


Fig. 5 : Marche des rayons lumineux dans un microscope à projection

En disposant la lentille oculaire L_2 au-delà de l'image $A'B'$ à une distance supérieure à sa focale (Fig. 5), on obtient une image réelle, qui peut être visualisée sur un écran ou une plaque photographique: principe du microscope à projection.

III. 2. Téléobjectif.

Le téléobjectif est composé de deux lentilles, une lentille convergente L_1 et d'une lentille divergente L_2 (Fig. 6). D'un objet situé à l'infini, la lentille convergente L_1 fait une image $A'B'$ qui se trouve située à son foyer (F_1). Cette image réelle est un objet virtuel dont la lentille divergente L_2 fait une image réelle $A''B''$ sur la plaque photo. La dimension de l'image $A''B''$ dépend de la distance de L_2 à la plaque photo. On modifie la dimension de $A''B''$ en déplaçant simultanément L_1 et L_2 le long de l'axe optique : effet zoom.

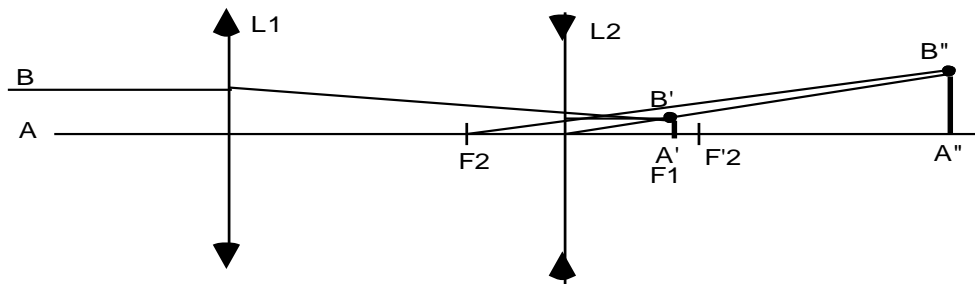


Fig. 6: Marche des rayons lumineux dans un téléobjectif.

Afin d'étudier ce système d'association d'une lentille convergente avec une lentille divergente sur un banc optique (de longueur finie), on va construire un instrument similaire au téléobjectif selon le schéma de la figure 7.

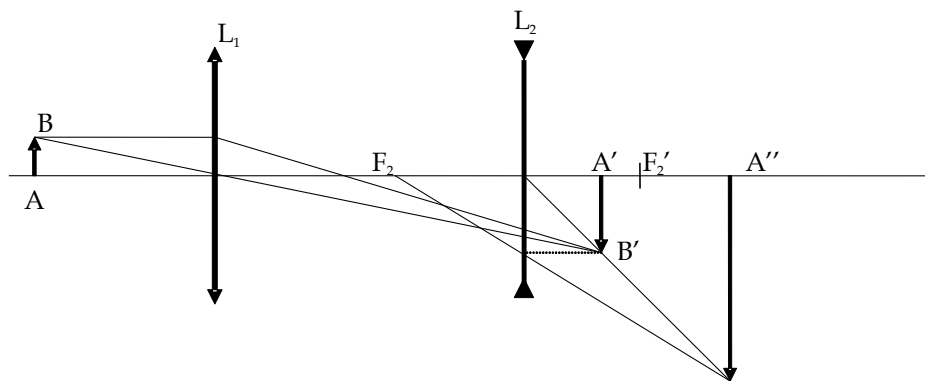


Fig. 7: Marche des rayons lumineux dans un téléobjectif avec objet à distance finie.

IV. TRAVAUX A REALISER

Etudier les deux instruments d'optique à image réelle, schématisés ci-dessus : microscope à projection et téléobjectif,... dont les performances seraient dictées par votre projet. (par exemple agrandissement de 50 X à 70 X,...). Un exemple du montage expérimental est disponible en figure 8.

On commence par étudier le microscope à projection :

1. En utilisant les formules des lentilles, calculer les positions de l'objet et des images.
2. Faire le plan de l'instrument (marche des rayons lumineux le long de l'axe optique) à l'échelle.
3. Réaliser pratiquement l'appareil sur banc optique et vérifier expérimentalement les lois des lentilles. Le calcul d'erreur doit confirmer la validité des lois de l'optique géométrique.
4. Donner les performances de l'appareil: agrandissement, pouvoir de résolution, champ, clarté. Discuter les aberrations observées.

Répéter les points 1 à 4 dans le cas du téléobjectif avec objet à distance finie (schéma de principe à la Fig. 7). On peut également simuler le cas d'un objet à distance infinie en plaçant une lentille convergente devant la source lumineuse, à la distance focale de celle-ci, de sorte à obtenir des rayons parallèles (voir fig. 8).

Pour simplifier, on va conserver le même agrandissement que pour le microscope à projection. Alors on peut conserver la lentille objectif L_1 et on remplace la lentille L_2 par une lentille divergente. On calcule alors la position de L_2 et de l'écran pour avoir l'agrandissement voulu.

Note : Pour enclencher la source lumineuse, actionner l'interrupteur général, puis maintenir appuyer le bouton rouge pendant 10 secondes environ, jusqu'à l'allumage de la lampe.

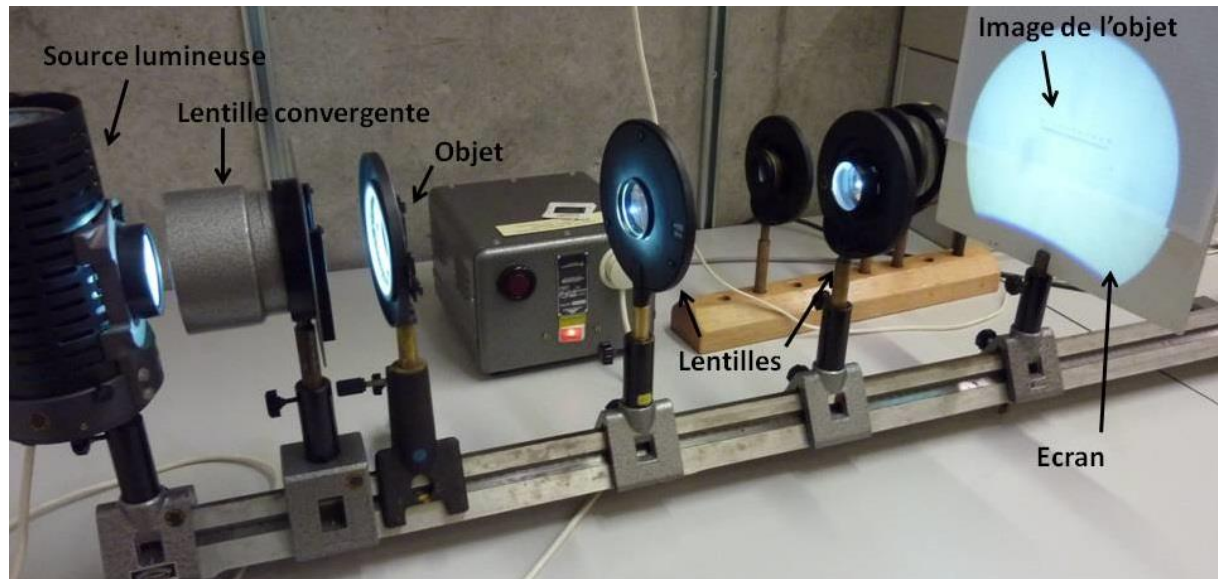


Fig. 8 : Image du montage expérimental à disposition