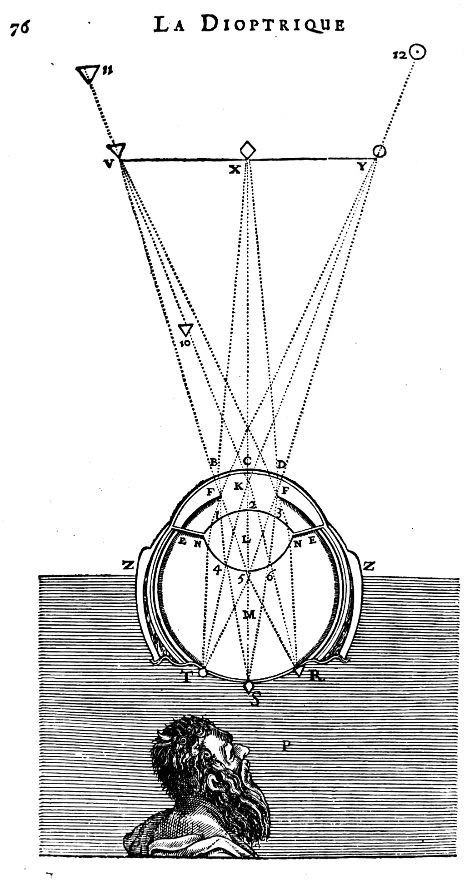
Faculté des Sciences et Techniques Saint-Étienne

D.U. CITISE
Cycle Initial en Technologies de l'Information de Saint-Étienne

Optique géométrique



René Descartes, *La dioptrique*, 1637

Travaux pratiques

Enseignant(s) responsable(s) :

Thomas OLIVIER

thomas.olivier@univ-st-etienne.fr

Année 2025-2026

A LIRE ABSOLUMENT AVANT LE DEBUT DES TP

Fonctionnement général des travaux pratiques

Voici quelques règles pour le bon fonctionnement des travaux pratiques :

1. **La présence est obligatoire** (vous êtes évalués à chaque séance).
2. **Chaque TP doit être préparé AVANT la séance, notamment le travail préliminaire, à faire à la maison et qui est noté.**
3. **Les comptes rendus de TP seront rendus impérativement à chaque fin de séance** (d'où l'intérêt de bien travailler la théorie avant si on veut pouvoir arriver au bout du TP).

Organisation et utilisation du fascicule de TP

Ceux qui commencent les TP tôt dans le semestre n'auront pas fini le cours d'optique géométrique avant de faire les TP. Ce n'est pas très grave, au contraire, faire les TP avant le cours aide à mieux le comprendre. Pour vous aider à préparer les parties théoriques et les travaux préliminaires, ce fascicule commence par une partie **Bases d'optique géométrique pour les TP** qui vous donnera, en accéléré, toutes les notions et formules utiles pour préparer les TP **avant** la séance. Pour vous guider, chaque énoncé de TP est construit de la même manière, selon 3 parties :

I. **Principe du TP** → *à travailler avant la séance pour savoir comment on va s'y prendre.*
II. **Travail préliminaire** → *à préparer avant la séance et* **à rendre sur feuille en début de TP**
III. **Travail expérimental et exploitation** → *à réaliser pendant la séance en vue de la rédaction du compte-rendu*

Remarque : Pour accorder le travail préliminaire et le travail expérimental demandés avec les compte-rendus, toutes les questions du travail préliminaires sont référencées de la manière suivante :

- « **QP 1** : *intitulé de la question...* » : pour les questions de la partie préliminaire
- « **QE 1** : *intitulé de la question...* » : pour les questions de la partie expérimentale

Grille d'évaluation

Travail concerné	Critères d'évaluation	Note
Travail préliminaire	➙ état d'avancement du travail préliminaire, ➙ qualité des réponses aux questions posées.	sur 5 pts
Travail expérimental	➙ évaluation du travail déjà entamé à la maison, ➙ compréhension et réalisation des consignes, ➙ autonomie, sérieux, attitude.	sur 5 pts
Compte-rendu	➙ qualité des réponses aux questions posées, ➙ qualité du travail d'exploitation des mesures, ➙ soin, rédaction, clarté.	sur 10 pts

Table des matières

Partie 1

Bases d'optique géométrique pour les TP

Puisque certains n'auront pas trop avancé en cours lorsque les TP vont commencer, cette partie est une sorte de cours accéléré pour définir les principes de base et formules utiles de l'optique géométrique afin de pouvoir préparer les parties théoriques dans de bonnes conditions.

Même pour ceux qui vont commencer les TP plus tard, la lecture de cette partie est importante, pour se remettre dans le bain.

Dans tous les cas, il est donc recommandé de lire attentivement cette partie avant d'attaquer les TP.

I Généralités

I.1 Conventions, définitions, hypothèses

- Un **dioptre** est une surface optique qui sépare deux milieux transparents d'indice de réfraction différents (ex. la première face d'une lentille).
- Un **système optique centré** est une série de **dioptres** séparant différents matériaux transparents et qui a un **axe de symétrie de révolution** que l'on appelle **axe optique** et qui est orienté dans le sens de propagation de la lumière.
- Par la suite, toutes les distances sont **algébriques**, c'est à dire qu'elles sont orientées, elles peuvent être positives si elles sont dans le sens de propagation de la lumière ou négatives si elles sont dans l'autre sens. On les note $\overline{AB}$ avec une barre pour rappeler qu'il s'agit bien de distances qui possèdent un signe. On a donc : $\overline{AB} = -\overline{BA}$.
- Par convention, on va noter les points géométriques avec des majuscules (ex. F'), et les distances algébriques associées avec des minuscules (ex. $f' = \overline{OF'}$).
- Pour simplifier ce cours accéléré, on ne traitera que du cas le plus courant où les systèmes optiques sont plongés dans l'air avant et après, c'est à dire que l'indice de réfraction de départ et celui d'arrivée valent $n = n' \approx 1$. Attention, si ce n'est pas le cas, les formules données ici ne sont plus valables car les indices de réfractions vont intervenir.

I.2 Approximation du rayon lumineux

Avant toute chose, il ne faut pas oublier que toute l'optique géométrique est basée sur une approximation qui consiste à décrire la lumière sous la forme d'un **ensemble de rayons lumineux infiniment fins**. Cette approximation fonctionne assez bien, mais en toute rigueur, la lumière est une onde et comme toute onde, elle **diffracte** lors de sa propagation, c'est à dire qu'on ne peut a priori pas former strictement un rayon lumineux, mais plutôt un petit faisceau à peu près parallèle, mais qui va quand même diverger un peu. Ce qui est pratique avec cette vision, c'est que le problème de la propagation de la lumière se résume à un problème purement géométrique où des segments de droites sont simplement déviés lorsqu'ils sont réfléchis ou réfractés par les matériaux transparents. **Attention**, d'autres approximations seront nécessaires par la suite pour simplifier encore le problème (stigmatisme approché, lentilles minces).

I.3 Formation de l'image d'un objet (stigmatisme)

Pour former l'image d'un objet par un système optique, il faudrait que n'importe quel rayon provenant d'un point objet situé avant le système optique ressorte du système de manière à toujours croiser un même point image (voir Fig. I.1). L'image d'un point unique est alors toujours un point unique. On appelle alors le point de départ le point objet (ex. A) et son image est alors un seul et même point (ex. A'). On dit alors que A et A' sont **conjugués** par le système optique. On dit aussi que ce système est alors **rigoureusement stigmatique**.

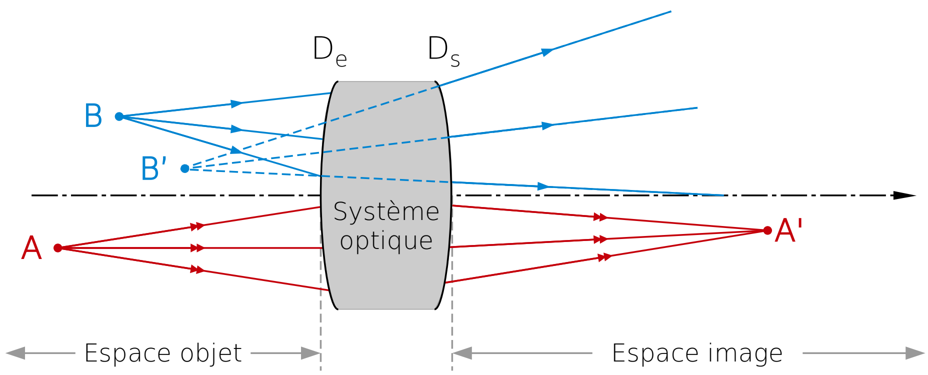


FIG. I.1 – Illustration de stigmatisme rigoureux sur un système centré (qui possède donc un axe de symétrie de révolution appelé axe optique).

Dans un système optique centré (qui possède donc un axe de symétrie de révolution appelé axe optique), on peut donc aussi définir l'**l'espace objet**, situé avant le système et l'**espace image**, situé après le système. Le système optique est alors délimité par un dioptre d'entrée D_e et un dioptre de sortie D_s. Peu importe ce qu'il y a dans le système optique pour l'instant (juste 2, 3, 4 dioptres ou plus, plusieurs lentilles, etc.). **Il est important de noter que les rayons en sortie peuvent diverger. Dans ce cas, ils ne se coupent pas réellement en un point en sortie, mais leurs prolongements se coupent en un point.** Dans ce cas, l'image n'est pas dans l'espace image et on parle d'image **virtuelle** (c'est le cas des points B et B' sur la figure).

I.4 Stigmatisme approché

En réalité, il est impossible mathématiquement de mettre en place un système optique qui puisse être rigoureusement stigmatique pour tous les points de l'espace. En revanche, si l'on se place dans certaines conditions, on peut avoir un **stigmatisme approché**, c'est à dire que les rayons sortants, ne vont pas tout à fait se couper en un seul et même point, mais pas très loin de ce point. En stigmatisme approché, l'image d'un point n'est pas un point, mais une petite tâche. Tant que cette tâche n'est pas trop grosse, ça marche !

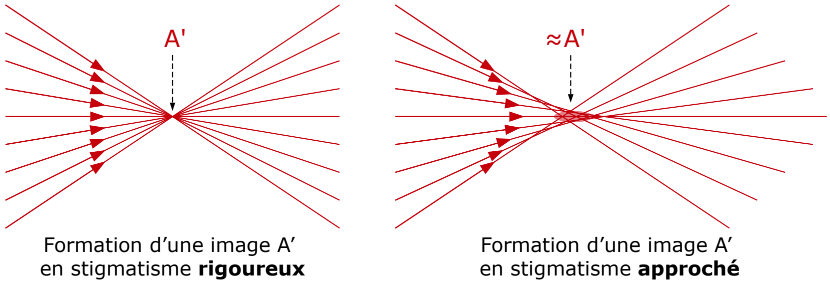


FIG. I.2 – Illustration de ce qu'il se passe réellement lors de la formation d'image en stigmatisme rigoureux et approché.

Cette condition est remplie si le système optique obéit aux **conditions de Gauss** (ou **conditions paraxiales**). Pour cela, il faut que les rayons utilisés dans le montage optique ne fassent pas d'angles trop importants avec l'axe optique. Cette conditions est assez facilement réalisée lorsque les distances objet et image sont grandes devant la taille des lentilles, de l'objet et de l'image. **Dans la suite, on supposera qu'on est toujours dans les conditions de Gauss. C'est à dire qu'on aura stigmatisme approché.**

ATTENTION : faire l'approximation du stigmatisme approché, ça veut dire qu'on aura **en réalité** ce qu'on peut voir à droite de la figure I.2, mais on fera **comme si on était dans le cas de gauche du stigmatisme rigoureux**.

II Cas des lentilles minces

II.1 Définition des lentilles minces

Une lentille mince est, comme toute lentille, une association de deux dioptres sphériques. Chaque dioptre est caractérisé par un sommet S et un centre de courbure C. On définit alors un rayon de courbure comme étant la distance algébrique $R = \overline{SC}$ (voir le cas général à la figure I.3). Dans le cas d'une lentille mince, la distance entre les sommets des dioptres (épaisseur de la lentille $e = \overline{S_1S_2}$) doit être faible devant les deux rayons de courbure ($R_1 = \overline{S_1C_1}$ et $R_2 = \overline{S_2C_2}$) et également devant la différence entre les rayons de courbures. Les rayons de courbures doivent être également de signes opposés. En langage mathématique, cela se traduit par les conditions suivantes :

$$e \ll R_1 \text{ , } e \ll R_2 \text{ , } e \ll |R_1 - R_2| \text{ et } (R_1 \times R_2) < 0 \tag{1.1}$$

Cette condition remplie, on peut alors supposer que la lentille est infiniment fine et que $S_1 \equiv S_2 \equiv O$, où O s'appelle le **centre optique** de la lentille mince.

II.2 Notion de foyers, distances focales, vergence

On caractérise la capacité d'une lentille à faire converger ou diverger un faisceau lumineux en définissant les **foyers objet et image**. Ces points sont des **points particuliers** tels que (voir exemple sur Fig.I.4) :

- Le foyer objet **F** est un point de l'axe optique tel que son image est à l'infini sur l'axe optique dans l'espace image.
- Le foyer image **F'** est un point de l'axe optique qui est l'image d'un point à l'infini sur l'axe optique dans l'espace objet.

ATTENTION : contrairement à ce qu'on pourrait croire avec leurs notations, F et F' **ne sont pas conjugués entre eux**. Le premier est un point objet conjugué avec une image à l'infini et le second est un point image

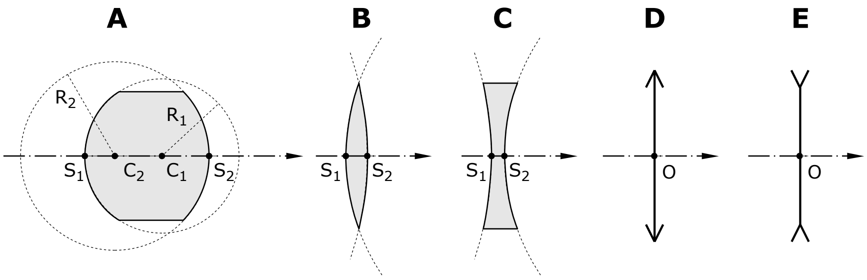


FIG. I.3 – Exemples de lentilles – A : cas général (pas une lentille mince), **B :** lentille mince convergente, **C :** lentille mince divergente, **D :** représentation simplifiée d'une lentille mince convergente, **E :** représentation simplifiée d'une lentille mince divergente.

conjugué avec un objet à l'infini. Il ne peuvent donc pas être conjugués entre eux.

En terme de rayons lumineux, les conséquences graphiques de ces définitions sont les suivantes (voir Fig. I.4) :

- tout rayon incident dont la direction passe par le foyer objet ressort parallèle à l'axe optique,
- tout rayon incident parallèle à l'axe optique ressort en passant par le foyer image.

Pour localiser ces points par rapport au système optique, on définit alors $f = \overline{OF}$ et $f' = \overline{OF'}$ comme les **distances focales objet et image** de la lentille mince. On construit également la grandeur V, appelée **vergence** (ou **puissance**) de la lentille et, si les milieux objet et image sont de l'air d'indice ≈ 1, on peut montrer que :

$$V = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} \tag{1.2}$$

L'unité de la vergence V est alors en m^{-1}, mais en optique, on appelle cette unité **dioptrie** (notée δ). On a $1\,\delta = 1\,m^{-1}$. Pour une lentille convergente, la vergence et la distance focale image seront positives et pour une lentille divergente, la vergence et la distance focale image seront négatives.

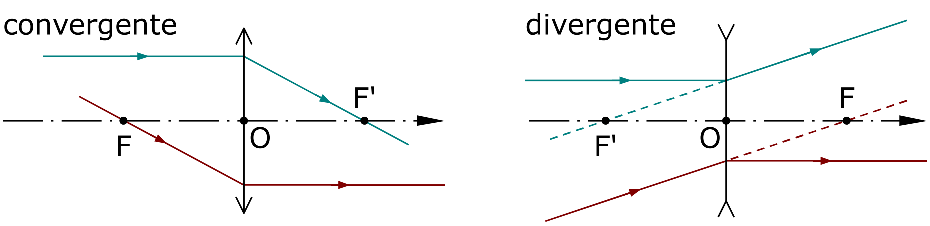


FIG. I.4 – Exemple de lentille mince convergente et divergente et leurs foyers objet et image (F et F'). On remarque que le sens des foyers par rapport au sens de la lumière doivent être inversés pour que la lentille soit divergente. Notez également la convention de dessin des lentilles minces (de simples segments fléchés différemment pour les lentilles convergentes et divergentes)

II.3 Formation de l'image par tracés de rayons

Une des grandes forces de l'optique géométrique, c'est qu'on peut faire des tracés géométriques de l'entrée et de la sortie des rayons. Ceci permet de localiser l'image d'un objet donné. Si le tracé est à l'échelle, on peut même résoudre le problème graphiquement, sans les équations. Si le schéma n'est pas à l'échelle, mais qu'il décrit assez bien la situation étudiée, le schéma permet de voir si l'image sera agrandie ou non, virtuelle ou non, inversée ou non. Dans tous les cas, un schéma optique bien fait permet de mieux comprendre ce qui se passe dans un système optique donné, comment il marche ou quelle est sa fonction.

Pour faire une tracé, il faut suivre quelques étapes :

- Tracer un axe optique, la lentille et placer ses foyers (attention, ils sont à la même distance du centre de la lentille si les milieux incident et sortant sont les mêmes et ils sont inversés si la lentille est divergente).
- Placer un objet AB perpendiculaire à l'axe optique.
- Tracer un premier rayon parallèle à l'axe optique passant par B. Par définition des foyers, le rayon sortant (ou son prolongement) doit passer par le foyer image F'.
- Tracer un second rayon qui passe (ou dont le prolongement passe) par le foyer objet F. Il doit alors ressortir parallèlement à l'axe optique.
- On peut tracer un troisième rayon pour être sûr : celui qui passe par B et O doit ressortir sans déviation si les indices sont les mêmes avant et après la lentille.

Pour bien faire un tracé, il faut s'entraîner un peu dans différents cas (lentille convergente, divergente, objet avant ou après le foyer, etc...). Si on respecte ces règles, **on peut alors localiser l'image B' à la croisée des rayons sortant.**

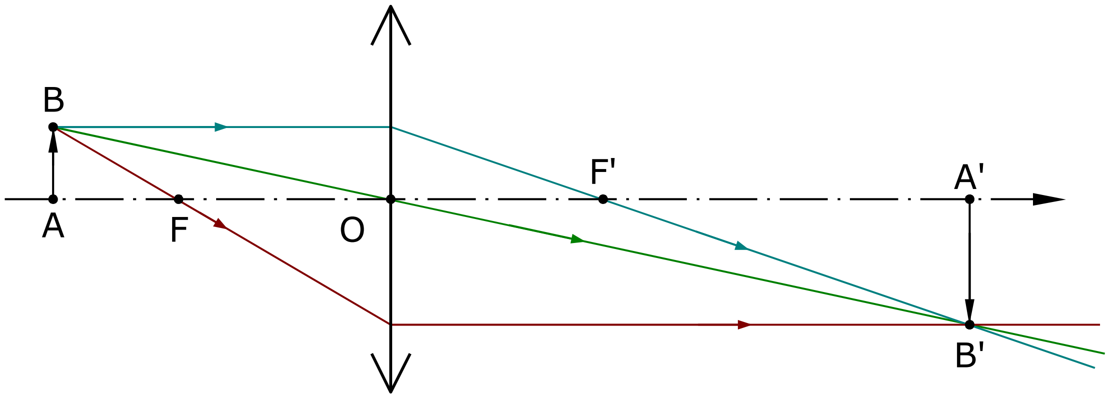


FIG. I.5 – Exemple de tracé de rayons pour former une image $A'B'$ à partir d'un objet AB. Dans ce cas particulier d'une lentille convergente et d'un objet situé avant le foyer objet, l'image est réelle et inversée.

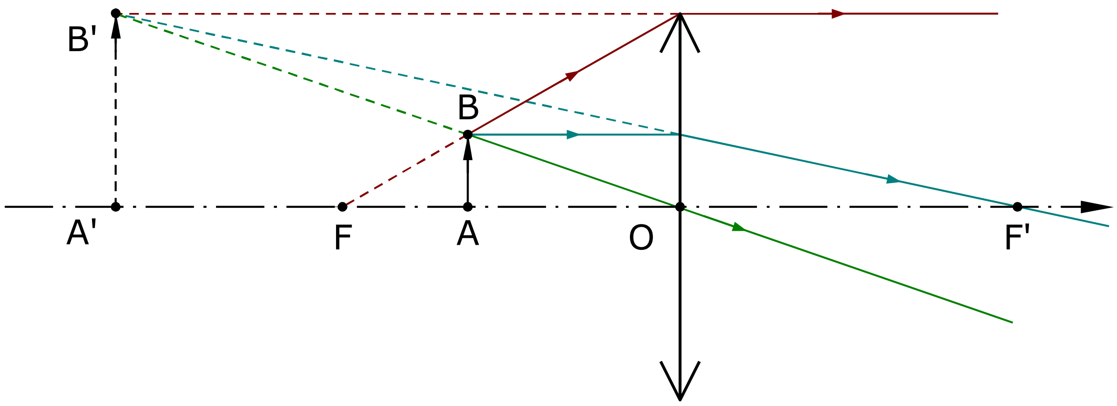


FIG. I.6 – Autre exemple de tracé de rayons, toujours avec une lentille convergente, mais dans ce cas, l'objet est situé après le foyer : ça change tout, le faisceau ne converge pas en sortie, ce qui a pour effet de former une image virtuelle.

II.4 Relations de conjugaison

En plus de l'approximation du rayon lumineux et de l'approximation paraxiale (stigmatisme approché), l'approximation de lentilles minces permet de simplifier les calculs de l'optique géométrique. Grâce à cette approximation, on peut déterminer des *relations de conjugaison* [1] assez simples. Ces relations de conjugaison permettent de trouver la position d'une image A' en fonction de la position de l'objet A. Ainsi, on montre que, pour une lentille mince plongée dans l'air [2] :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = V \qquad \rightarrow \quad \text{Relation de Descartes} \tag{1.3}$$

$$\overline{F'A'} \cdot \overline{FA} = f \cdot f' \qquad \rightarrow \quad \text{Relation de Newton} \tag{1.4}$$

Les deux relations précédentes sont équivalentes, la seule différence est que la relation de Descartes relie les positions de l'objet et de l'image par rapport au centre optique O, tandis que la relation de Newton relie les positions de l'objet et de l'image par rapport aux foyers, ce qui peut être parfois plus pratique à utiliser (on le verra dans le TP2).

En plus de ces relations de conjugaison, on peut déterminer des relations intéressantes sur le grandissement transversal γ (« gamma »), c'est à dire le rapport entre la taille de l'image $\overline{A'B'}$ et la taille de l'objet $\overline{A'B'}$. En effet, grâce au théorème de Thalès et avec un rayon passant par O, F ou F', on peut montrer ces 3 égalités :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -\frac{\overline{F'A'}}{f'} = -\frac{f}{\overline{FA}} \tag{1.5}$$

III Cas d'un système optique centré quelconque

III.1 Définition, tracés

Un système optique centré est l'association de plusieurs dioptres séparant plusieurs milieux d'indices différents et qui possède un axe de symétrie, appelé axe optique (voir les exemples sur la figure I.7).

Dans certaines conditions, les systèmes optiques centrés peuvent être considérés comme *minces*. Cette approximation simplifie les problèmes mais s'applique surtout au cas de lentilles simples. Pour beaucoup d'instruments composés de plusieurs lentilles (objectifs de microscope, d'appareil photo, oculaires, etc.), il n'est plus possible de considérer que le système optique est mince. En revanche, on peut toujours voir l'association de dioptres ou de lentilles comme formant un nouveau système possédant ses foyers et ses distances focales propres. En revanche, **les distances focales objet et image ne peuvent plus être définies par rapport à un centre optique O**, comme dans le cas des lentilles minces.

Pour définir le système épais équivalent à une association de dioptres, il faut maintenant introduire les **plans principaux objet et image** (Π et Π') et les **points principaux** H et H' qui sont leurs intersections sur l'axe optique. Π et Π' sont définis comme étant deux plans conjugués et tels que le grandissement transversal vaut 1 lorsqu'on passe de l'un à l'autre.

1. En effet, on parle de *conjugaison* entre 2 points A et A' lorsque A' est l'image de A par un système optique. On dit également que A et A' sont deux points *conjugués*.
2. Attention, si les milieux objet et image ne sont pas de l'air, mais des milieux d'indices n et n', ces indices vont intervenir dans les formules de conjugaison.

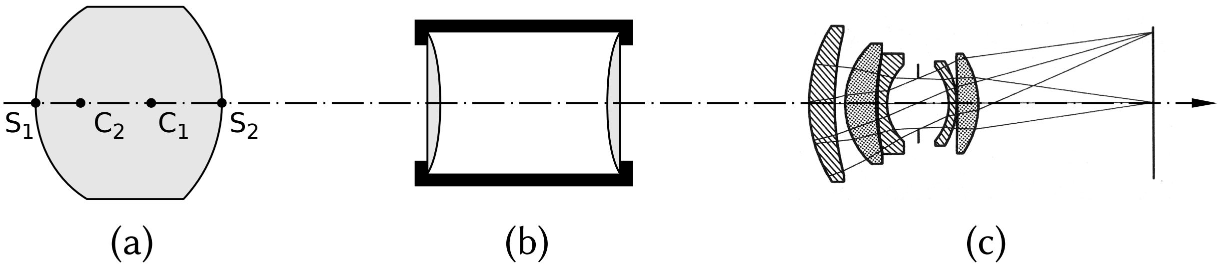


FIG. I.7 – Exemple de systèmes centrés : (a) lentille « épaisse » (association de deux dioptres sphériques dont les rayons de courbure ne sont pas faibles devant la distance S_1S_2), (b) oculaire constitué de deux lentilles minces, mais trop espacées pour qu'il soit considéré comme un système mince, (c) exemple d'objectif d'appareil photo (association de plusieurs lentilles de différentes géométries, convergentes ou divergentes, accolées ou non)

Ainsi, pour caractériser un système épais, il suffit de trouver les positions des quatre **points cardinaux** du système épais, c'est à dire : ses foyers F, F' et ses points principaux H et H'. Les tracés de rayons sont ensuite presque aussi simples que dans le cas des lentilles minces. On procède alors comme suit pour trouver l'image $A'B'$ d'un objet AB (voir figure I.8) :

- On trace, comme d'habitude, les rayons incidents passant par B et qui sont, soit parallèle à l'axe optique, soit passant par F, soit non dévié (passant par H dans ce cas).
- On arrête le tracé de ces rayons lorsqu'on arrive au plan principal objet Π.
- Puisque le grandissement vaut 1 entre Π et Π', on suppose que tout se passe comme-ci rien ne changeait entre ces deux plans : **on trace donc un simple prolongement parallèle à l'axe optique** jusqu'au plan principal image Π'.
- On termine le tracé et on localise l'image, comme d'habitude, en utilisant les propriétés des différents rayons tracés (parallèle à l'axe optique en entrée → passe par F', passant par F en entrée → parallèle à l'axe optique). Quant au rayon passant par H, il ressort donc en H' sans être dévié.

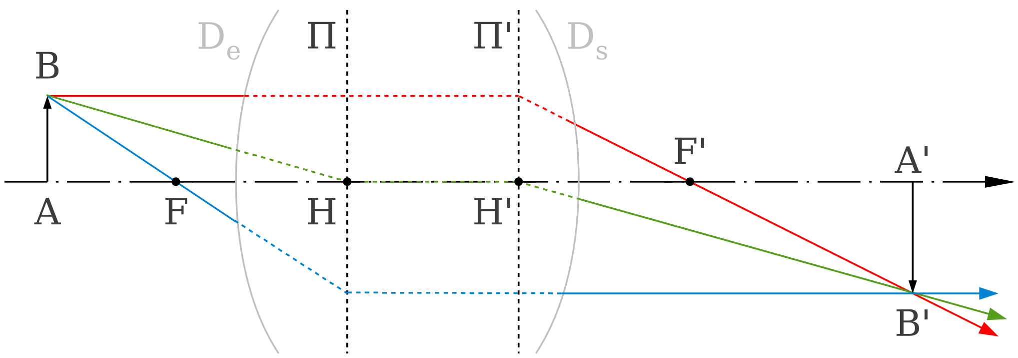


FIG. I.8 – Tracé de rayon dans le cas d'un système épais caractérisé par ses points cardinaux H, H', F et F'. D_e et D_s désignent les dioptres d'entrée et de sortie du système.

Ainsi, un système épais caractérisé par ses quatre points cardinaux H, H', F et F' n'est pas beaucoup plus difficile à étudier qu'un problème de lentille mince. Toute la difficulté, c'est justement de déterminer (théoriquement) ou de localiser (expérimentalement) les positions de ses quatre points cardinaux.

III.2 Définition des vergences et des distances focales

Soit n et n' les indices des milieux objet et image. La **vergence** d'un système optique centré vaut, dans tous les cas :

$$V = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f} \tag{1.6}$$

Les distances focales sont alors définies différemment selon le système considéré :

- Pour un dioptre sphérique : $f = \overline{SF}$ et $f' = \overline{SF'}$
- Pour une lentille mince : $f = \overline{OF}$ et $f' = \overline{OF'}$
- Pour un système épais : $f = \overline{HF}$ et $f' = \overline{H'F'}$ [3]

III.3 Relations de conjugaison

Pour faire le lien entre la position d'un point objet A sur l'axe optique et celle du point image A' sur l'axe optique, on peut utiliser deux types de relation de conjugaison :

$$\frac{1}{\overline{H'A'}} - \frac{1}{\overline{HA}} = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = V \quad \rightarrow \quad \text{Relation de Descartes} \tag{1.7}$$

$$\overline{F'A'} \cdot \overline{FA} = f \cdot f' \quad \rightarrow \quad \text{Relation de Newton} \tag{1.8}$$

On peut remarquer que ce sont quasiment les mêmes relations que pour la lentille mince. D'ailleurs dans le cas de la formule de Newton, c'est exactement la même relation !

III.4 Association de systèmes : formule de Gullstrand

Pour finir, une dernière formule intéressante à connaître est la formule de Gullstrand. Elle permet de calculer assez simplement la vergence équivalente de l'association de deux systèmes. Par exemple, si je place deux lentilles minces de vergences V_1 et V_2 et de centres optiques O_1 et O_2 l'une derrière l'autre, le nouveau système ainsi constitué aura une vergence V égale à :

$$V = V_1 + V_2 - eV_1V_2 \tag{1.9}$$

où $e = \overline{O_1O_2}$

Il existe deux autres formules de Gullstrand qui permettent de localiser les points principaux H et H' par rapport aux éléments de l'association O_1 et O_2, c'est à dire par rapport aux dioptres d'entrée et de sortie du système optique.

$$\overline{O_1H} = e\frac{V_2}{V} \qquad \text{et} \qquad \overline{O_2H'} = -e\frac{V_1}{V} \tag{1.10}$$

Dans le TP n°2, ces formules seront utile pour calculer les focales théoriques et localiser les points principaux de systèmes constitués de 2 lentilles.

3. Attention : dans ce cas les distances objet et image ne sont pas définies par rapport au même point !

ANNEXE 1 : MESURES AVEC LA PIGE (TP1 ET TP2)

Principe des mesures avec la pige : Dans ces TP, les mesures de distances se basent sur l'utilisation des graduations sur le banc. Dans les lois de l'optique, ce sont les distances réelles entre les éléments qui comptent (ex. $\overline{OA}$, $\overline{OA'}$, etc...). Les graduations sur le banc ne correspondent pas à la position réelle des éléments du montage (diapo, lentille, écran). Pour faire la correspondance, on va d'abord calibrer les distances avec une **pige**, c'est à dire un élément de taille connue (20cm) qu'on peut placer entre les éléments.

Le principe de la calibration est illustré à la figure I.9 :

- ➙ on place la pige entre 2 éléments de manière à ce que la pige les touche,
- ➙ on prend des points de repères pour voir les positions des pieds par rapport au banc,
- ➙ on mesure la distance entre les pieds (dans l'exemple, on trouve $(m_2 - m_1) = 27.2\,\text{cm}$).
- ➙ Cela veut dire que quand on mesure 27.2 cm entre les repères des pieds, on a en réalité 20 cm entre l'objet et la lentille (dans l'exemple).
- ➙ Il faudra donc toujours retirer 7.2 cm à la mesure $(m_2 - m_1)$ pour avoir la véritable mesure entre objet et lentille dans cet exemple.

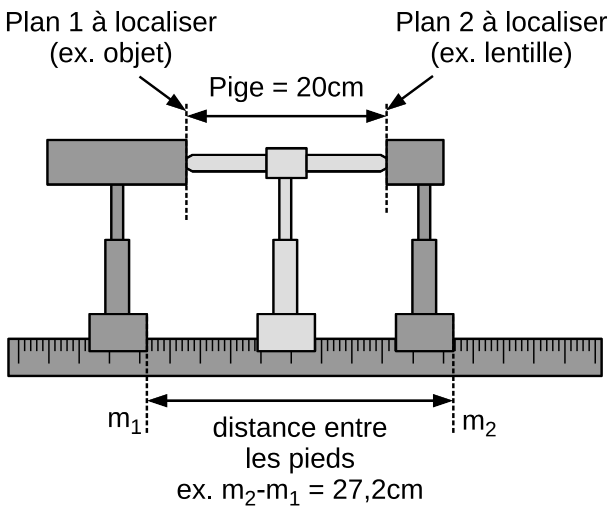


FIG. I.9 – Principe de mesure des distances avec la pige

Principe des mesures avec incertitude : Dans ce TP, la plupart des mesures commencent pas la recherche d'une position d'élément pour avoir une image de l'objet qui soit la plus nette possible. Mais vous verrez que parfois, à quelques millimètres près ou même à quelques centimètres près, l'image à l'air tout aussi nette. Pour évaluer cette incertitude de mise au point, il faudra procéder comme suit :

- ➙ On localise une première position x_{min} correspondant au *tout début de la netteté* en déplaçant l'élément de gauche à droite.
- ➙ On localise une seconde position x_{max} correspondant à la *toute fin de la netteté* en déplaçant l'élément de de droite à gauche.
- ➙ Ceci doit vous donner 2 mesures x_{min} et x_{max} qui encadrent la position la plus nette.
- ➙ La **bonne position à retenir** sera donc la **moyenne** et l'**incertitude** sera la **moitie de l'écart**.
- ➙ Garder en tête cette façon de faire pour tout le TP. Quand on vous demande une valeur avec son incertitude, il faudra donc donner :

$$\left(\frac{x_{\text{max}} + x_{\text{min}}}{2}\right) \pm \left(\frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{2}\right)$$

Annexe 2 : principe et réglage de la lunette / viseur à frontale fixe (TP2)

Les lunettes disponibles en TP sont composées de deux systèmes optiques convergents (un objectif et un oculaire). L'objectif a pour but de former une première image d'un objet et l'oculaire a pour but de renvoyer cette image à l'infini pour une observation plus confortable à l'œil (l'accommodation à l'infini est la position de repos de l'œil).

Sur ces lunettes, un réticule (graduations) est placé dans le plan focal objet de l'oculaire. Ainsi, lorsqu'on regarde dans la lunette, on est censé voir des graduations nettes au milieu de notre champ de vision. Si votre œil a des amétropies (myopie ou hypermétropie), le réticule ne doit pas tout à fait être placé dans le plan focal de l'oculaire pour être vu net. Un réglage de l'oculaire est alors possible pour retrouver une image nette du réticule.

Le *tirage* de la lunette est défini comme étant la distance entre le foyer image de l'objectif et le foyer objet de l'oculaire. Lorsque ce tirage est nul, le système est *afocal*, c'est à dire que l'image d'un objet à l'infini est aussi à l'infini (voir figure I.10). Dans ce cas, on dit que la lunette est *réglée à l'infini*. **Pour régler une lunette à l'infini, on procède comme suit :**

1. Régler l'oculaire à votre vue, de manière à voir le réticule bien net en tournant le réglage de l'oculaire.
2. Pointer un objet le plus loin possible (faire le réglage en extérieur ou à travers un fenêtre) et faire la mise au point en jouant sur le tirage (faire coulisser l'oculaire par rapport).
3. Serrer la bague de réglage du tirage. La lunette est réglée à l'infini. Tout objet qui sera vu net dedans proviendra de l'infini.

Un fois réglée ainsi, la lunette servira :

- À régler le montage pour envoyer un objet à l'infini (objet grille dans ce TP).
- Après avoir ajouté une **bonnette** (c'est à dire une lentille convergente supplémentaire sur l'objectif de la lunette), cette lunette réglée à l'infini deviendra un **viseur à frontale fixe**, c'est à dire un système permettant d'observer des objets situés à une distance fixe et finie (ex. 30cm dans le cas d'une bonnette de focale 30cm). Ce viseur permettra de faire les mesures nécessaires dans ce TP, c'est à dire estimer les positions relatives des faces d'entrée et de sortie du système à caractériser ainsi que les images de ces faces.

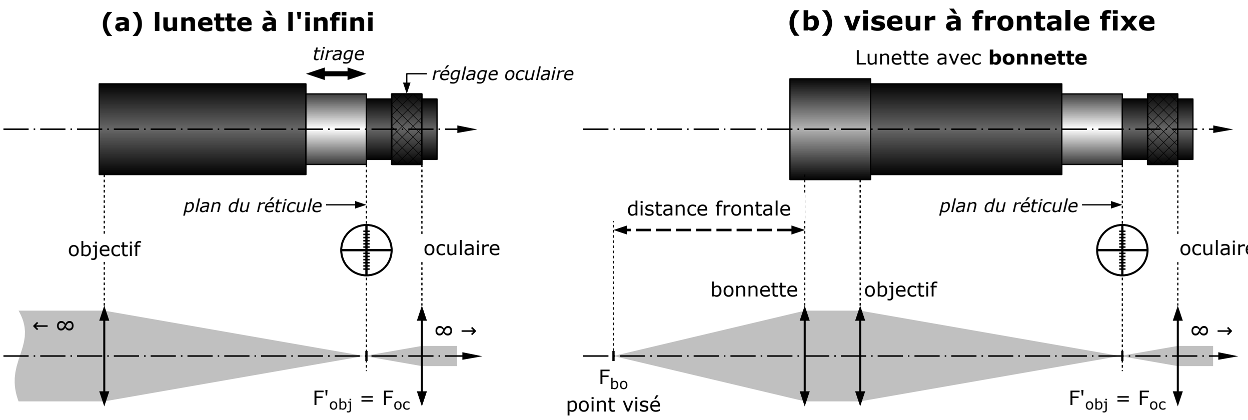


Fig. I.10 – Principe de fonctionnement la lunette de TP : (a) réglage du tirage de la lunette pour observer des objets nets à l'infini. **(b)** En ajoutant une bonnette (lentille convergente) devant la lunette, celle-ci devient un viseur à frontale fixe adapté à l'observation d'un objet situé à une distance de l'objectif fixe et finie (distance frontale). **En bas :** schémas optiques correspondant.

Partie 2

TP1 : lentilles minces, formation d'images et mesure de focale

Le but général de ce TP est d'étudier les lentilles dites « minces, » de comprendre leur fonctionnement pour former des images et enfin, d'utiliser plusieurs méthodes de caractérisation de leur distances focales.

I Principe de la méthode de Bessel

La méthode de Bessel est une méthode de détermination de la distance focale d'une lentille mince convergente. Pour cela, on projette l'image d'un objet lumineux sur un écran à l'aide de la lentille en fixant la distance entre l'objet et l'écran et en déplaçant la lentille. Soit L, la distance entre l'objet (A) et l'écran. Quand une image (A') se forme sur l'écran, on a donc :

$$L = \overline{AA'} = \overline{AO} + \overline{OA'} = -\overline{OA} + \overline{OA'} = p' - p \quad \text{soit :} \quad p' = L + p \tag{2.1}$$

où $p = \overline{OA}$ et $p' = \overline{OA'}$. On peut alors ré-écrire la relation de conjugaison de Descartes sous la forme :

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'} \implies \frac{1}{L+p} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'} \tag{2.2}$$

Après réduction au même dénominateur et quelques petits ré-arrangements mathématiques, on obtient finalement une équation du second degré en p :

$$p^2 + Lp + Lf' = 0 \tag{2.3}$$

Cette équation n'a de solutions réelles, que lorsque son discriminant $\Delta = L^2 - 4Lf'$ est positif ou nul. Cette condition mathématique s'observe, bien entendu, dans la réalité du montage optique. En effet :

- Si la distance entre objet et écran est supérieure à 4 fois la focale ($L > 4f'$), le discriminant est positif, il y a deux valeurs de p possibles (p_1 et p_2), c'est à dire que l'on peut former une image pour deux positions différentes de la lentille.
- Si la distance entre objet et écran est égale à 4 fois la focale ($L = 4f'$), le discriminant est nul, il n'y a qu'une seule position qui permette de former une image.
- Si la distance entre objet et écran est inférieure à 4 fois la focale ($L < 4f'$), le discriminant est négatif, il est alors impossible de former une image nette sur l'écran.

Lorsqu'il y a deux solutions, celles-ci s'expriment sous la forme :

$$p_1 = \frac{-L + \sqrt{\Delta}}{2} \quad \text{et} \quad p_2 = \frac{-L - \sqrt{\Delta}}{2} \tag{2.4}$$

Ainsi, si la condition $L > 4f'$ est vérifiée, lorsqu'on déplace la lentille de l'objet vers l'écran, on constate qu'il existe deux positions pour lesquelles l'image sera nette sur l'écran. Si ℓ désigne la distance entre ces deux positions, on remarque que : $\ell = p_1 - p_2 = \sqrt{\Delta} = \sqrt{L^2 - 4Lf'}$

On en déduit alors que la focale peut se calculer en fonction de L (longueur entre écran et objet) et ℓ (distance entre les deux positions où l'on forme une image nette) :

$$f' = \frac{L^2 - \ell^2}{4L} \tag{2.5}$$

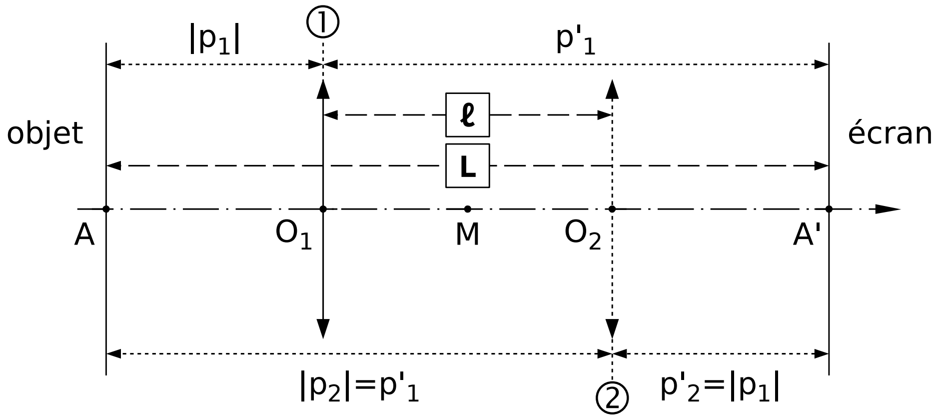


FIG. II.1 – Illustration de la méthode de Bessel

II Travail préliminaire

II.1 Estimation grossière de la focale d'une lentille convergente

La distance focale image d'une lentille mince convergente peut être évaluée simplement en prenant un objet éloigné et en cherchant son image sur une feuille de papier. Par exemple, pendant le TP, on formera sur le sol l'image des tubes fluorescents fixés au plafond. Si on suppose que l'objet est situé à l'infini, l'image doit se former dans le plan focal image de la lentille. On suppose alors que la distance entre la lentille et l'image est égale à la distance focale image. En réalité, le tube fluorescent n'est pas vraiment à l'infini, et donc, son image ne sera pas vraiment au foyer de la lentille, mais en un point A' différent de F'. Donc : OA' (mesurée) $\neq OF'$ (distance focale) . L'erreur commise sur la détermination de f' est alors égale à la différence entre OA' (mesurée) et OF' (distance focale). L'erreur commise est alors égale à $F'A'$. L'erreur relative commise sur la détermination de la distance focale f' vaut alors : $F'A'/f'$ et peut s'exprimer en %.

QP 1 : À l'aide de la loi de Newton qui fait intervenir $\overline{F'A'}$, déterminer une formule qui donne l'erreur **relative** $F'A'/f'$ sur la détermination de la distance focale f' en fonction du paramètre $X = OA/f'$.

II.2 Estimation de la focale avec la méthode de Bessel

QP 2 : Avec la méthode de Bessel, montrer qu'on a les 3 relations suivantes :

$$-p_1 + p_1' = L \qquad -p_2 + p_2' = L \qquad p_1' + p_2' = L$$

QP 3 : En déduire alors les 3 relations suivantes :

$$p_1' = -p_2 \qquad p_2' = -p_1 \qquad \gamma_1 = \frac{1}{\gamma_2}$$

où γ_1 et γ_2 sont les grandissements dans les deux situations, c'est à dire : $\gamma_1 = p'_1/p_1$ et $\gamma_2 = p'_2/p_2$.

Ces dernières relations signifient que la position ① est symétrique de la position ② par rapport au milieu du montage, et que le grandissement dans la position ① est l'inverse du grandissement dans la position ② (par exemple, une image 10× plus grande que l'objet dans la position ① sera 10× plus petite que l'objet dans la position ②). La figure II.1 illustre cette symétrie. Il est à noter que cette symétrie vérifie ce qu'on appelle le *principe de retour inverse de la lumière*. Si les rayons ont emprunté un certain trajet pour aller de A à A', ils emprunteraient le même chemin pour aller de A' à A. Effectivement, si l'on regarde le schéma suivant, la position ① est équivalente à la position ② si l'on inverse le sens de la lumière et qu'on inverse objet et image.

III Travail expérimental et exploitation

III.1 Estimation grossière de la distance focale d'une lentille mince

Vous ne disposez d'aucun matériel particulier pour cette mesure : les plafonniers de la salle de TP (ou du couloir) font office d'objet lumineux et le sol fera office d'écran.

Manipulation :

- Choisir une lentille convergente (à bords gris) n°5. Le « 5 » signifie que sa *vergence* est de 5δ (1 dioptrie $= 1\ \delta = 1\,m^{-1}$), c'est à dire que sa focale vaut environ $1/5\,m \approx 20$ cm (dans l'air).
- À la verticale d'un plafonnier du couloir, former l'image des lampes du plafond sur le sol avec cette lentille.
- Mesurer le plus précisément possible la distance entre la lentille et l'image sur le sol.

Exploitation :

QE 1 : Reporter la distance focale approximativement mesurée sur votre compte-rendu. La distance plafond → sol vaut environ 2.5 m. Avec une focale de 20 cm, la distance entre objet et lentille (OA) vaut donc environ 2.3 m. Avec la formule que vous avez trouvée au paragraphe II.1 des questions préliminaires, calculer l'erreur relative sur la détermination de la distance focale et vérifier que votre estimation de f' est donc compatible avec cette erreur.

III.2 Formation d'image avec une lentille convergente

On utilise maintenant le banc optique et une source comportant plusieurs points source et qui constitue donc un objet 2D à observer. Pour cela, vous disposez d'une source de lumière avec un verre dépoli sur lequel se trouve une lettre de l'alphabet.

Ce dépoli marqué sera notre **objet réel**. Placer la lentille **convergente** à 25cm de l'objet. Déplacer l'écran derrière la lentille jusqu'à trouver l'image de la diapositive.

QE 2 : Quel est le sens de l'image par rapport à l'objet ? Faire un schéma optique avec tracé de rayon pour illustrer la situation observée. Mesurer les valeurs de la distance objet $\overline{OA}$ et image $\overline{OA'}$. Grâce à la formule de conjugaison de Descartes, en déduire la valeur de la **distance focale image** f' de cette lentille. En mesurant la taille de l'objet et celle de l'image, déterminer le grandissement. Est-ce que ce grandissement mesuré est bien compatible avec l'équation 1.5 ?

QE 3 : Rapprocher un tout petit peu la lentille de l'objet et constater que l'image s'éloigne de plus en plus. Placer maintenant la lentille à 15cm de l'objet (on a donc $OA < f'$) : remarquer alors qu'on n'arrive plus à former une image sur l'écran. En faisant attention à ne pas être ébloui, placer votre œil directement à la sortie de la lentille. Observez-vous la lettre nette ? **Conclure :** existe-t-il tout de même une image ? Où se trouve-t-elle ? Avec l'aide de l'enseignant, éventuellement, faire un schéma optique qui rende compte de cette observation lorsque l'objet est situé après le foyer de la lentille.

QE 4 : **Juste avec un raisonnement théorique**, sachant que la vergence d'une lentille *divergente* est forcément négative et en raisonnement sur les signes des distances dans la loi de conjugaison de Descartes, montrer qu'on ne peut pas projeter d'image réelle sur un écran avec une lentille divergente lorsque l'objet est situé avant la lentille. Encore une fois, où se trouve donc l'image ?

III.3 Estimation de la focale par la méthode de Bessel

Manipulation :

On va mettre en place un montage pour déterminer la distance focale à l'aide de la méthode de Bessel (voir partie théorique).

- Positionner objet et écran assez loin l'un de l'autre pour s'assurer que la distance objet-écran soit très supérieure à $4f'$ (il faut donc être supérieur à 80cm ici, au minimum, mais comptez au moins 1,6m). Mesurer le plus précisément possible cette distance (à l'aide de la pige de 20cm).
- Rechercher les positions de la lentille pour lesquelles on a une image nette de l'objet sur l'écran. **Lors de cette mesure, profitez-en pour évaluer l'erreur sur la localisation**, c'est à dire évaluer une plage de variation de position pour laquelle l'image a toujours l'air d'être à peu près nette.
- Repérer ces positions grâce aux graduations du banc optique et mesurer la taille approximative de l'image pour chacune de ces mesures (on mesurera aussi la taille de l'objet).

Exploitation :

QE 5 : Reporter toutes les mesures demandées sur le compte-rendu. Remarquer que, comme vous l'avez montré dans le travail préliminiaire, $p_1' = -p_2$ et $p_2' = -p_1$, c'est à dire que la distance objet devient la distance image et vice versa quand on passe de la position 1 à la position 2. Du coup, remarquez aussi que cela implique que :

$$\gamma_1 = \frac{1}{\gamma_2}$$

Les grandissements dans les deux situations sont bien inverses l'un de l'autre (c'est à dire que si l'on a grossi $5\times$ en position 1, on divise par 5 en position 2).

QE 6 : Grâce à l'équation (2.5), calculer la distance focale image de la lentille utilisée.

QE 7 : Évaluer les incertitudes sur la mesure des positions. En déduire l'incertitude sur ℓ. En supposant que c'est la seule source d'incertitude sur ce montage, en déduire l'incertitude sur la distance focale estimée f'.

III.4 Estimation directe de la focale par autocollimation

Principe de l'autocollimation :

Pour fabriquer l'objet venant virtuellement de l'infini, il faut placer précisément un objet réel dans le plan focal objet d'une lentille. Pour ce faire, on utilise couramment la méthode d'**autocollimation**. Cette méthode consiste à placer un miroir derrière la lentille et de déplacer la lentille. Lorsque l'objet est dans le plan focal objet de la lentille, l'image est renvoyée à l'infini, se réfléchie sur le miroir, retraverse la lentille à l'envers et vient se former sur le plan de l'objet. Ce principe est illustré à la figure II.2.

QE 8 : Mettre en place cette expérience, faire les réglages et mesurer la distance focale image de la lentille convergente précédemment étudiée. Estimer l'erreur sur cette mesure directe de la distance focale. Pour cela, il vous faudra retirer le dépoli aimanté sur la source et placer l'objet grille/écran sur le montage.

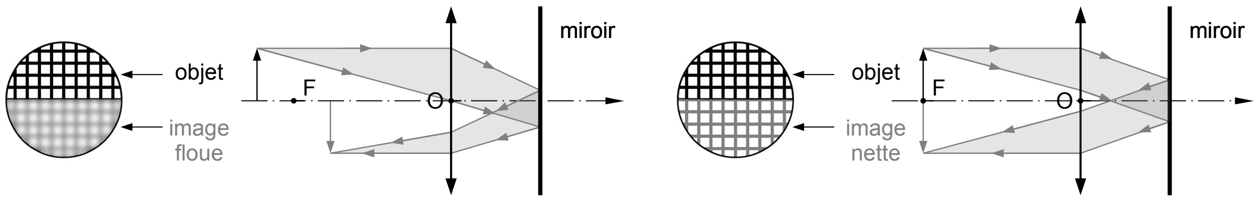


FIG. II.2 – Illustration de l'autocollimation (avec un objet constitué d'un quadrillage sur sa partie haute et d'un écran de papier sur sa partie basse pour observer l'image retour). À gauche, on a pas autocollimation : objet et image retour ne sont pas au foyer. À droite, il y a autocollimation.

Partie 3

TP2 : caractérisation d'un systèmes optique centré

Le but général de ce TP est d'étudier les caractéristiques d'un système optique centré épais ($\neq$ lentilles minces) à l'aide d'une méthode appelée *méthode de Cornu*. Ce TP ne présente pas vraiment de difficultés théoriques, mais au moment du TP, vous n'aurez pas forcément étudié les systèmes centrés dans le cours. La partie de préparation théorique donne les principales notions utiles pour préparer et mener à bien ce TP.

Remarques :

- Ce TP aborde des notions avancées d'optique géométrique. Il est particulièrement recommandé de lire et de bien préparer la partie expérimentale et de bien comprendre le principe de la méthode de Cornu.
- Pour que ce TP se passe bien, soyez organisés et n'hésitez pas à utiliser des tableaux bien pensés pour présenter vos mesures et résultats de calculs car on peut vite s'y perdre !
- Lorsque vous serez prêts pour effectuer les mesures avec la lunette, faîtes valider ce que vous voyez par l'enseignant avant de vous lancer.

I Principe de la méthode de Cornu

Dans la relation de conjugaison de Descartes, les positions des points objet et image ne sont pas définies par rapport à un même point O, comme dans le cas des lentilles minces [1], mais par rapport aux deux *points principaux* objet (H) et image (H'). En pratique, les points H et H' ne sont pas pratiques à localiser. La méthode de Cornu, utilisée dans ce TP, sera justement une méthode expérimentale permettant, sur un système centré épais et inconnu, de :

1. localiser les positions des foyers F et F',
2. déterminer les distances focales $f = \overline{HF}$ et $f' = \overline{H'F'}$ sans connaître les positions de H et H',
3. en déduire les positions des points H et H' à partir de celles de F et F' et des distances focales.

Comment localiser le foyer image F' ?

Il suffit pour cela d'envoyer un objet situé à l'infini sur le système à caractériser. Par définition du foyer image, l'image de cet objet doit se situer au niveau du foyer image F'. On peut alors déterminer la distance entre le sommet de la face de sortie (S) et ce foyer, c'est à dire la distance $\overline{SF'}$.

1. Pour plus de précisions, voir la partie théorique du TP n°1.

Comment localiser le foyer objet F ?

Par le principe de retour inverse de la lumière, il suffit de faire la même expérience que précédemment, mais en retournant le système optique (E se place en S et vice versa). On localise alors le foyer F par rapport à la face d'entrée. On accède alors à la distance $\overline{EF}$.

Comment estimer les distances focales objet et image f et f′ ?

On utilise la relation de conjugaison de Newton (équation 1.8). En effet, contrairement à la relation de Descartes en systèmes épais (1.7), elle ne fait pas intervenir les points H et H' dont on ne connaît pas encore les positions. Cette relation nous dit que, si A et A' sont deux points conjugués par le système, on a :

$$\overline{F'A'} \cdot \overline{FA} = f \cdot f' = -(f')^2 \quad \text{(car } f = -f' \text{ si les indices de réfractions sont les mêmes des deux côtés)} \tag{3.1}$$

Il reste à choisir un couple de points A et A' pratique à utiliser expérimentalement. On va choisir comme objet A la face d'entrée du système (point E). Il suffit de faire des repères au feutre sur cette face et de chercher son image à travers le système. On cherche donc l'image E' de E à travers le système. Après retournement du système, on pourra faire de même avec S et son image S'.

En résumé...

- Avec le système placé dans un sens, une première expérience nous donne accès à S, E′ et F′, et donc aux distances $\overline{F'S}$ et $\overline{F'E'}$.
- Avec le système retourné, une seconde expérience nous donne accès à E, S′ et F, et donc aux distances $\overline{FS'}$ et $\overline{FE}$.
- On peut donc écrire : $\overline{F'E'} \cdot \overline{FE} = \overline{F'S} \cdot \overline{FS'} = -f'^2$, ce qui nous donne **deux manières** d'évaluer la distance focale du système épais :

$$f' = \sqrt{-\overline{F'E'} \cdot \overline{FE}} \qquad \text{ou} \qquad f' = \sqrt{-\overline{F'S} \cdot \overline{FS'}}$$

- Avec cette distance focale image $f' = \overline{H'F'} = -\overline{HF}$ et les distances $\overline{FE}$ et $\overline{F'S}$, on peut localiser tous les points cardinaux F, F', H et H' par rapport aux faces E et S du système. Il reste juste à être rigoureux et ne pas se mélanger les pinceaux entre les différents points, les différentes distances et leurs orientations !
- Pour cela, la relation de Chasles sera votre meilleure amie ! Par exemple, pour déterminer $\overline{EH}$ on pourrait écrire :

$$\underbrace{\overline{EH}}_{\text{à calculer...}} = \underbrace{\overline{EF}}_{\substack{\text{déjà mesurée} \\ \overline{EF}=-\overline{FE}}} + \underbrace{\overline{FH}}_{\substack{\text{lié à la focale trouvée} \\ \overline{FH}=-\overline{HF}=-f=f'}}$$

II Travail préliminaire

Comme travail préliminaire, on se propose de « s'entraîner » en exploitant des mesures réalisées à l'aide de la méthode de Cornu. Pour un certain système épais, on mesure donc les données suivantes :

	Mesure E → S			**Mesure S → E**		
Point concerné	E'	S	F'	S'	E	F
Position relevée sur le banc (en cm)	103,7	112,5	118,0	69,7	112,5	138,5

Comme c'est le cas habituellement dans le cas de la méthode de Cornu, les positions de E', S et F' ont été obtenues avec le système placé dans un sens (Mesure E → S) et celles de S', E et F avec le système retourné

(Mesure S → E). Il faudra donc penser à inverser les signes des distances qui impliqueront les 3 derniers points. Sinon, la distance $\overline{FE}$ trouvée avec le système retourné, par exemple, sera négative alors qu'elle doit être positive avec le système à l'endroit. Par ailleurs, on sait que le système possède une épaisseur de **12 cm** ($= ES$).

QP 1 : Déterminer les distances $\overline{F'S}$ et $\overline{F'E'}$.

QP 2 : En déduire les distances $\overline{FS'}$ et $\overline{FE}$.

QP 3 : A l'aide des distances mesurées et de la loi de Newton, déterminer (**de 2 manières différentes**) les distances focales du système ainsi caractérisé. Faire la moyenne de ces deux valeurs.

QP 4 : À partir de ces mesures, déterminer les distances $\overline{EH}$ et $\overline{SH'}$.

QP 5 : En choisissant une échelle appropriée, faire une schéma sur lequel vous placerez correctement sur l'axe optique les points E, S, H, H', F et F'.

III Travail expérimental et exploitation

III.1 Montage expérimental

III.1. a Description du montage complet

Le montage complet est représenté à la figure III.1. Une lampe, suivie d'un diffuseur, est utilisée pour éclairer un objet (quadrillage). Une lentille collimatrice sert à envoyer une image de cet objet à l'infini. On place ensuite notre système épais à caractériser. Enfin, on utilise une lunette de visée qui permet d'observer et de pointer les positions des différentes images : face de sortie (S), image de la face d'entrée (E'), image de l'objet à l'infini (F') ou alors, lorsque le système est inversé : face d'entrée (E), image de la face de sortie (S'), image de l'objet à l'infini (F).

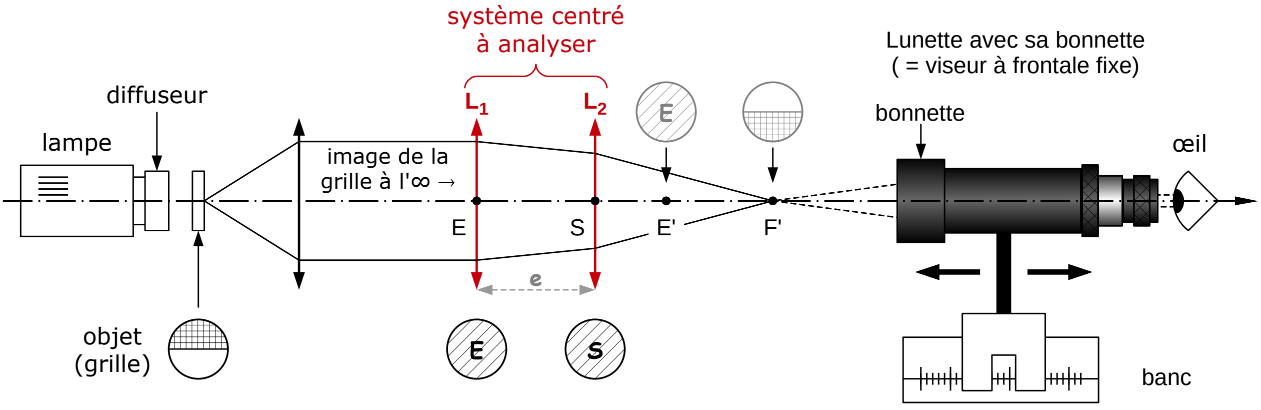


Fig. III.1 – Montage complet de la méthode de Cornu

III.1. b Mise en place de l'objet à l'infini

- Vérifier que la lampe est bien équipée du diffuseur. Placer l'objet quadrillé le plus proche possible de ce diffuseur.
- Préparer la lunette de visée de manière à ce qu'elle soit réglée à l'infini (voir annexe)
- Placer la lunette ainsi réglée sur le banc.
- Placer la lentille collimatrice entre l'objet quadrillé et la lunette.
- Déplacer la lentille, tout en regardant dans la lunette : **lorsque l'objet quadrillé est vu net dans**

la lunette, c'est que l'image de l'objet a bien été renvoyée à l'infini par la lentille collimatrice.

Remarque : Pour placer correctement la lentille auxiliaire pour qu'elle envoie l'image de la grille à l'infini, on aurait pu aussi utiliser la **méthode d'autocollimation** (avec un miroir) qui est utilisée au TP1.

III.1. c Mise en place du système à analyser, modification à faire sur la lunette

On étudiera, au choix, l'un des trois systèmes suivants :

	Système Σ_1	Système Σ_2	Système Σ_3
L_1 (en δ)	5	6	5
L_2 (en δ)	-2	4	4
e (en cm)	12	8,5	10

➙ Mettre en place le système choisi sur le banc, juste après la lentille auxiliaire.
- Pour cela, vérifier bien que les faces des lentilles qui comportent les marques « E » ou « F » sont à l'extérieur du système : il faut que ces faces soient sur les dioptres d'entrée et de sortie.
- Utiliser **la pige** pour régler le plus précisément possible la distance entre les lentilles (au mm près).
- Fixer bien les supports pour que plus rien ne bouge.

➙ Ajouter la bonnette de la lunette pour la configurer en *viseur à frontale fixe* et placer là sur le banc.

➙ Votre montage est maintenant prêts pour les mesures, comme illustré à la figure III.1.

III.2 Mesures et exploitation

III.2. a Mesures

Remarques importantes :

➙ Pour les premières mesures (de S, E' et F'), essayer d'évaluer une incertitude sur la mesure de position. Pour cela, localisez le début de la netteté observée dans la lunette en avançant, puis même chose en reculant. Cette procédure vous donnera le début et la fin de la netteté et permet donc **d'évaluer une incertitude** sur cette mesure. Pour les résultats des positions, puis des distances mesurées, il faudra donc indiquer une valeur moyenne et son incertitude sous la forme $(132,3 \pm 4)$mm.

➙ Un nombre important d'étudiants ont un problème avec les références de mesures dans ce TP. Pourtant, la situation est très simple grâce à la mesure par viseur à frontale fixe :
- Pour placer les objets et lentilles les uns par rapport aux autres, on utilise la pige et on se sert des positions des pieds sur le banc (comme au TP1)
- **Mais :** quand on pointe les images avec le viseur, c'est toujours la position **au pied du viseur sur le banc** qui compte, car ce n'est pas la position qu'on exploite, c'est la **distance entre les 2 positions pointées** (*voir illustration à la figure III.2*).

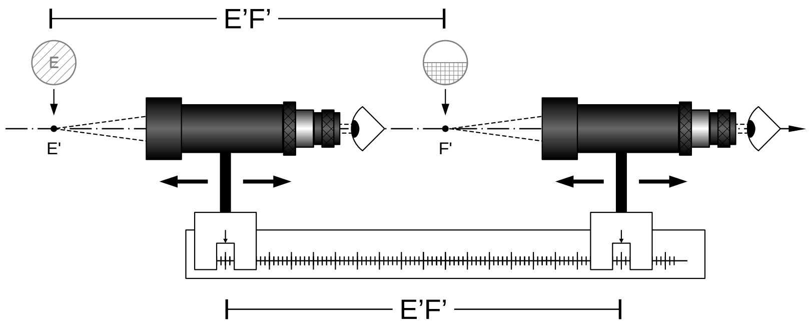


FIG. III.2 – Illustration de l'équivalence entre la mesure entre les positions des pieds et entre les images

Première série de mesures

QE 1 : Noter les positions de la lunette pour lesquelles on observe :
- la face de sortie (S)
- l'image de la face d'entrée par le système (E')
- l'image de l'objet quadrillé par le système (F')

QE 2 : En déduire les distances $\overline{F'S}$ et $\overline{F'E'}$.

Seconde série de mesures (système à l'envers)

Il faut maintenant retourner le système. Cela revient à échanger les lentilles dans les supports, **mais aussi** à retourner les lentilles pour que les faces E et S soient toujours vers l'extérieur du système, comme précédemment.

QE 3 : Maintenant, noter alors les positions de la lunette pour lesquelles on observe :
- la face d'entrée (E)
- l'image de la face de sortie par le système (S')
- l'image de l'objet quadrillé par le système (F)

QE 4 : En déduire les distances $\overline{FS'}$ et $\overline{FE}$, **mais attention, on a retourné le système** : Cela veut dire qu'on a fait comme-ci la lumière, tout comme l'axe optique, changeaient de sens. **Il faut alors penser à changer les signes des distances algébriques trouvées** ($\overline{FS'}$ et $\overline{FE}$).

→ *voir avec l'enseignant si cela vous parait bizarre. Il vous fera un beau schéma pour vous expliquer...* ☺

III.2. b Exploitation

QE 5 : À l'aide des distances mesurées et de la loi de Newton, déterminer (**de 2 manières différentes**) les distances focales du système ainsi caractérisé. Faire la moyenne de ces deux valeurs.

QE 6 : À partir de ces mesures, déterminer les distances $\overline{EH}$ et $\overline{SH'}$.

QE 7 : En choisissant une échelle appropriée, faire un schéma sur lequel vous placerez correctement sur l'axe optique les points E, S, H, H', F et F'. Conclure sur le placement des points cardinaux de votre système optique.

III.2. c Étude du système épais caractérisé

On défini comme étant la **distance frontale image** la distance entre le dioptre de sortie (S) et le foyer image (F'). Pour un système mince, cette distance vaut donc $\overline{OF'}$ et est donc égale à la distance focale. Du coup, on confond parfois ces deux distances qui sont pourtant différentes dans le cas des systèmes épais.

QE 8 : Ici, pour le système épais considéré, remarquer que la distance focale image trouvée ($\overline{H'F'}$) est effectivement différente de la distance frontale image ($\overline{SF'}$).

- Retirer la lentille auxiliaire et son support. L'objet grille n'est alors plus à l'infini.
- **Important :** pensez à remettre vos lentilles d'entrée et de sortie dans le bon sens et surtout, **ne déplacez pas le système optique**, il a été caractérisé, on y touche pas : c'est l'objet grille qu'on va déplacer pour le mettre à une distance donnée du système.
- Grâce à la pige, placer l'objet grille à exactement 15cm de la face d'entrée de votre système. On a donc un objet (A) qui est à 15cm de E et donc : $\overline{AE} = 15\,\text{cm}$.
- Mesurer la position où se trouve l'image par rapport à la face de sortie du système (S), c'est à dire mesurer la distance $\overline{SA'}$

QE 9 : Avec les distances $\overline{AE}$ et $\overline{SA'}$, déduire les distances $\overline{HA}$ et $\overline{H'A'}$

QE 10 : Maintenant que vous avez trouvé expérimentalement $\overline{HA}$, $\overline{H'A'}$ et f' dans un cas précis. Vérifiez que ces résultats de mesure vérifient la loi de conjugaison des systèmes épais (equation 1.7, rappelée ci-dessous) :

$$\frac{1}{\overline{H'A'}} - \frac{1}{\overline{HA}} = \frac{1}{f'}$$