Travaux pratiques | [O] TP n°1

Introduction aux lentilles minces

Une lentille est un composant fait d'un matériau transparent, qui est à la base de nombreux instruments d'optique : appareil photographique, lunette astronomique, microscope... Elles ont été utilisées pour la première fois en Grèce antique (vers 500 avant J.C.) pour faire converger la lumière du soleil afin de produire un feu, et dans l'empire romain (vers 50 avant J.C.) pour corriger des défauts de vision.

Dans ce TP, nous allons commencer par réaliser plusieurs manipulations simples avec des lentilles afin de mieux s'approprier le modèle de la lentille mince et d'apprendre à former des images de qualité. Dans un deuxième temps, nous détaillerons plusieurs techniques expérimentales permettant de déterminer une distance focale inconnue.

Ce TP dure 2 séances. Amener les cours **D2** et **D3** (si besoin). Utilisation de **Python** lors de la deuxième séance.

I - Formation d'une image avec une lentille mince

I.1 - Les lentilles convergentes et divergentes

Les lentilles convergentes sont plus épaisses au centre que sur les bords et ont une distance focale positive ($f' > 0$). À l'opposé, les lentilles divergentes sont plus fines au centre que sur les bords et ont une distance focale négative ($f' < 0$).

ATTENTION à ne pas laisser de traces de doigts sur les lentilles !

- Constater visuellement que les lentilles convergentes et divergentes n'ont pas la même courbure.
- Prendre deux lentilles de distance focale $+200\ \mathrm{mm}$ et $-200\ \mathrm{mm}$. Si on observe une page de texte à travers une lentille positionnée proche de la feuille (à une distance $< 20\ \mathrm{cm}$), pour quel type de lentille observe-t-on un grandissement du texte ? Pour quel type de lentille observe-t-on un rapetissement du texte ?

Ces manipulations vous permettent de vérifier en quelques secondes le caractère convergent ou divergent d'une lentille inconnue.

I.2 - Première image dans les conditions de Gauss

En optique géométrique dans les conditions de Gauss, une « image » est par définition nette. Si une figure floue est observée sur un écran, il est donc faux de la qualifier « d'image floue ».

- En suivant les indications ci-dessous, observer l'image d'un objet (une lettre F ou une fente par exemple) sur un écran, à l'aide d'une lentille convergente.

Lors d'un montage d'optique, on l'efforcera d'obtenir une « belle image », c'est-à-dire une figure nette, centrée et bien éclairée. Pour cela, on procède de la manière suivante.

Préréglage ▪ Commencer par placer la lampe à une extrémité du banc d'optique, avec un objet proche de la lampe. Placer une lentille convergente au milieu du banc et un écran à l'autre extrémité du banc. Rechercher rapidement une l'image de l'objet en déplaçant la lentille.

Alignement des composants ▪ Placer les composants de manière à avoir un axe optique commun à tous les objets utilisés : régler la hauteur, le centrage, la perpendicularité des objets au banc d'optique, etc.

Éclairage ▪ Enlever l'objet de son support. Former l'image du filament de la lampe sur la lentille, en jouant sur le tirage de la lampe (réglage de la position du filament par rapport au condenseur) : la tache lumineuse doit être la plus petite possible sur la lentille. Attention, la lampe peut chauffer fortement.

Position de l'écran et de la lentille ▪ Replacer l'objet sur son support. Positionner l'écran de manière à avoir une figure nette de l'objet sur l'écran. Dépasser cette position dans un sens, puis faire demi-tour pour y revenir : on a ainsi plus de précision.

Limitation des aberrations ▪ Placer un diaphragme juste devant la lentille et modifier la taille du diaphragme.

Lors d'un montage plus complexe, il faut s'assurer que chaque nouvel élément ajouté est bien aligné avec le reste du montage.

L'objet est-il réel ou virtuel ? Même question pour l'image.

Que se passe-t-il lorsqu'on diminue la taille du diaphragme ? Quels sont les avantages et inconvénients de son utilisation ?

I.3 - Aberrations géométriques

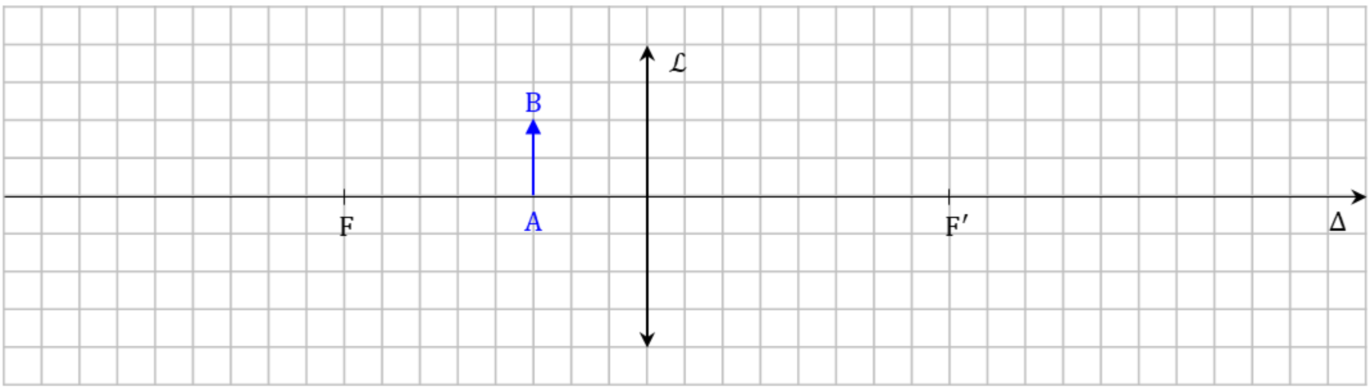
Rappeler les conditions de Gauss.

Pour s'éloigner grandement des conditions de Gauss, il est possible d'utiliser une lentille avec une grande ouverture et une faible distance focale. Ici, nous allons utiliser une lentille de grande ouverture et de distance focale $f' = +120\ \mathrm{mm}$.

Sur la paillasse professeur, observer les défauts de stigmatisme et d'aplanétisme du montage réalisé.

I.4 - Images virtuelles

Une image virtuelle n'est pas projetable sur un écran. Les rayons émergents semblent se croiser sur cette image, mais celle-ci étant située devant la lentille, ils ne s'y croisent pas réellement. L'œil va faire converger les rayons sur la rétine et rendre visible cette image virtuelle.



Sur le schéma ci-dessus, tracer l'image $\mathrm{A'B'}$ de l'objet AB.

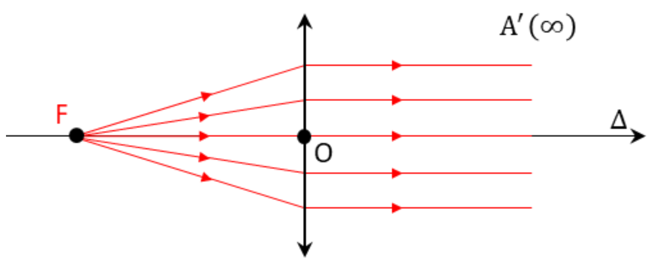
Réaliser un montage illustrant la situation ci-dessus. En plaçant votre œil derrière la lentille (attention à ne pas s'éblouir), vérifier que l'image est agrandie et droite (non renversée), comme l'indique votre schéma.

II - Points focaux et méthode d'autocollimation

II.1 - Point focal objet

Le point focal objet (ou foyer principal objet), noté F, est le point objet situé sur l'axe optique et dont le point image conjugué est situé à l'infini sur l'axe optique. Tout rayon incident passant par F émerge de la lentille parallèle à l'axe optique.

$$\mathrm{F} \xrightarrow[\mathcal{L}]{} \mathrm{A'}(+\infty \text{ sur } \Delta)$$



En pratique, en TP d'optique, un objet ou une image est dit « à l'infini » s'il est situé « très loin » de la lentille. On pourra donc considérer que cette condition est vérifiée dès lors qu'il se situe à plus de 10 fois la distance focale du centre de la lentille.

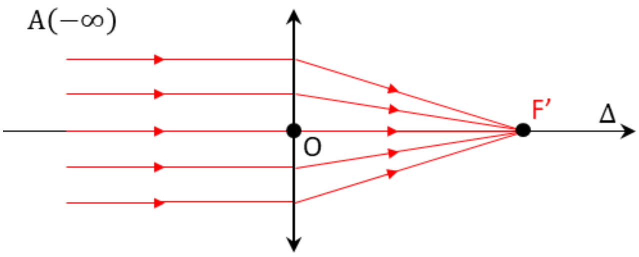
$$\mathrm{A}(+\infty) \quad \Leftrightarrow \quad \mathrm{OA} \gg |f'| \quad \Leftrightarrow \quad \mathrm{OA} > 10\,|f'|$$

À l'aide d'une lentille convergente, observer l'image à l'infini d'un objet réel. En déduire une estimation de la distance focale de la lentille.

II.2 - Point focal image

Le point focal image (ou foyer principal image), noté F', est le point image situé sur l'axe optique et dont le point objet conjugué est situé à l'infini sur l'axe optique. Tout rayon incident parallèle à l'axe optique passe par F' après avoir traversé la lentille.

$$\mathrm{A}(-\infty \text{ sur } \Delta) \xrightarrow[\mathcal{L}]{} \mathrm{F}'$$



En utilisant la même lentille convergente, faire l'image d'un objet réel situé à l'infini. En déduire une estimation de la distance focale de la lentille.

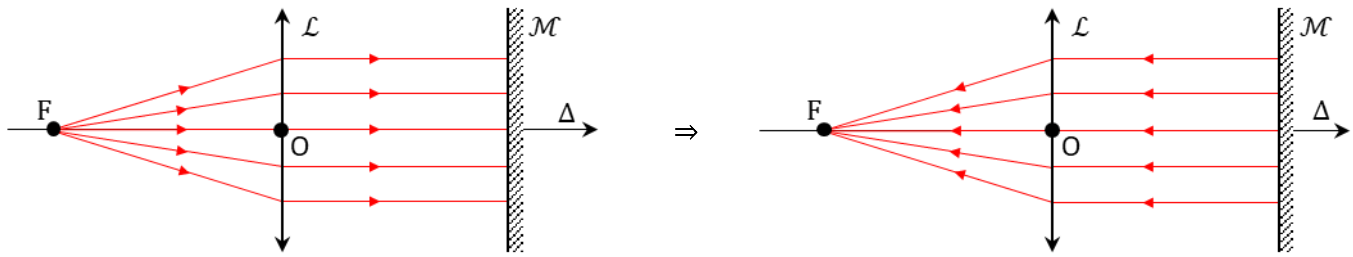
II.3 - Autocollimation

⚠⚠⚠ **Cette méthode est à maîtriser**, tant théoriquement qu'expérimentalement.

Lorsque l'objet est placé sur le point focal objet F d'une lentille $\mathcal{L}$, les rayons émergent de $\mathcal{L}$ parallèles entre eux et à Δ. L'image A' se trouve donc à l'infini sur l'axe optique. Si, à l'aide d'un miroir, ces rayons sont renvoyés vers $\mathcal{L}$, tout se passe comme si on éclairait la lentille avec un objet A' à l'infini sur l'axe optique. L'image se formera donc sur F.

$$\mathrm{F} \xrightarrow[\mathcal{L}]{} \mathrm{A}'(+\infty \text{ sur } \Delta) \xrightarrow[\mathcal{M}]{} \mathrm{A}'(+\infty \text{ sur } \Delta) \xrightarrow[\mathcal{L}]{} \mathrm{F}$$

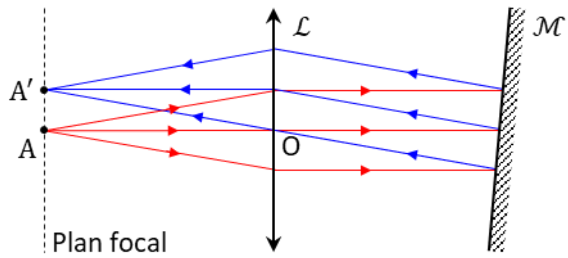
L'image est donc superposée à l'objet. C'est la **méthode d'autocollimation**.



Propagation des rayons lumineux de F jusqu'à ℳ *Propagation des rayons lumineux de ℳ jusqu'à F*

Afin que l'image ne se superpose pas *exactement* à l'objet, il suffit d'incliner légèrement le miroir. L'objet et l'image se trouve alors dans le même plan (le plan focal), le premier au niveau du foyer principal et la seconde au niveau d'un foyer secondaire.

Cette méthode est à privilégier pour créer expérimentalement un « objet à l'infini ».



Réaliser grossièrement le montage décrit ci-dessus. Accoler le miroir à la lentille puis les déplacer conjointement jusqu'à ce que l'image de l'objet se forme dans le même plan que ce dernier. Déplacer lentement le miroir le long de l'axe optique, en l'éloignant de la lentille (qui reste fixe) : si la figure reste nette et de même taille que l'objet, ce dernier est bien situé dans le plan focal objet de la lentille.

Mesurer la distance focale de la lentille f' et son incertitude-type $u(f')$.

III - Focométrie des lentilles convergentes

Les mesures de la partie II permettent d'obtenir rapidement l'ordre de grandeur d'une distance focale inconnue f', mais elles ne peuvent pas être utilisées pour la déterminer précisément. Dans cette partie, nous allons réaliser plusieurs méthodes permettant de déterminer f'.

III.1 - Méthode de Bessel

La méthode de Bessel exploite la relation de conjugaison de Descartes de façon subtile. Elle permet une mesure très précise de la distance focale.

Analyse théorique

Notons $\mathrm{L} = \overline{\mathrm{AA'}}$ la distance algébrique fixée entre l'objet et l'écran sur lequel on observe l'image. Cherchons les positions de la lentille qui conjuguent l'objet et l'écran.

Notons $\mathrm{x} = \overline{\mathrm{OA}}$ la distance algébrique lentille-objet correspondant à l'une de ces positions. Il vient donc :

$$\overline{\mathrm{OA'}} = \overline{\mathrm{OA}} + \overline{\mathrm{AA'}} = \mathrm{x} + \mathrm{L}$$

La relation de conjugaison de Descartes se réécrit ainsi :

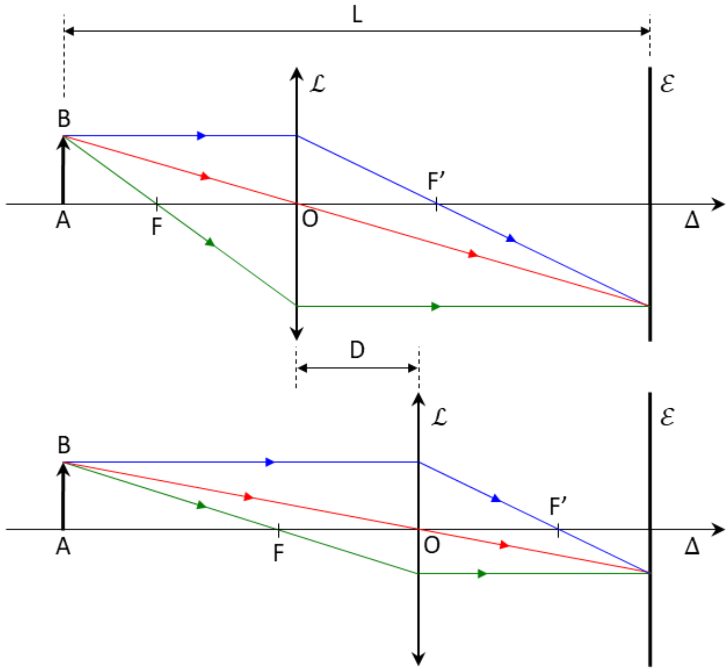
$$\frac{1}{\overline{\mathrm{OA'}}} - \frac{1}{\overline{\mathrm{OA}}} = \frac{1}{f'} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\mathrm{x}+\mathrm{L}} - \frac{1}{\mathrm{x}} = \frac{1}{f'}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\mathrm{x}^2 + \mathrm{L}\,\mathrm{x} + f'\mathrm{L} = 0}$$

Le discriminant de cette équation vaut :

$$\Delta = \mathrm{L}^2 - 4f'\mathrm{L} = \mathrm{L}(\mathrm{L} - 4f')$$

Il est positif si et seulement si : $\mathrm{L} \geq 4f'$.



- Vérifier qualitativement que ce critère est vérifié expérimentalement, c'est-à-dire qu'il n'existe pas d'image réelle d'un objet réel lorsque $\mathrm{L} < 4f'$. Ce critère est donc essentiel pour choisir une lentille adaptée à l'encombrement d'un montage !

Lorsque ce critère est vérifié, il existe deux positions (voir figure ci-dessus) qui conjuguent l'objet et l'écran :

$$\boxed{\mathrm{x}_{\pm} = \frac{1}{2}\left(-\mathrm{L} \pm \sqrt{\Delta}\right)}$$

En notant D la distance entre ces deux positions :

$$\mathrm{D} = \sqrt{\Delta} = \sqrt{\mathrm{L}^2 - 4f'\mathrm{L}} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{\mathrm{L}^2 - \mathrm{D}^2 = 4f'\mathrm{L}}$$

Partie expérimentale

- Fixer la distance $\mathrm{L} \geq 4f'$ entre l'objet et l'écran puis chercher les deux positions $\mathrm{x}_{\pm}$ de la lentille qui conjuguent ces deux positions. On ne cherchera pas à estimer les incertitudes.
- Reproduire le processus pour différentes valeurs de L.
- Effectuer une régression linéaire (Regressi ou Python) afin de déterminer la distance focale f'.

III.2 - Analyse statistique

- Prendre une lentille convergente et fixer sa position. Mesurer, pour environ dix positions de l'objet $\overline{\mathrm{OA}}$, la position de l'image $\overline{\mathrm{OA'}}$ correspondante.
- À l'aide de Python, écrire un script permettant :

  (1) de calculer la distance focale à l'aide de la formule de conjugaison de Descartes ;

  (2) de déterminer la moyenne $\overline{f'}$ et l'écart-type $\sigma(f')$ de la série de mesure ;

  (3) d'afficher dans la console le résultat de la mesure : $f' = \overline{f'} \pm u\left(\overline{f'}\right)$

IV - Focométrie des lentilles divergentes

Il est possible de montrer qu'un système de deux lentilles minces $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{L}_2$ accolées, de vergence respective V_1 et V_2, est équivalent à une lentille unique $\mathcal{L}$ de vergence :

$$\mathrm{V} = \mathrm{V}_1 + \mathrm{V}_2 \qquad \Leftrightarrow \qquad \frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'}$$

Nous allons utiliser cette propriété pour mesurer la distance focale d'une lentille divergente.

On accole deux lentilles minces, l'une divergente de distance focale $f_\mathrm{d}' < 0$ inconnue, et l'une convergente de distance focale $f_\mathrm{c}' > 0$ connue, de sorte que l'ensemble se comporte comme une lentille convergente.

Quelle relation lie f_d' et f_c' pour que cette propriété soit vérifiée ?

On mesure alors la distance focale f' du doublet par l'une des méthodes présentées ci-avant et, connaissant f_c', on peut ainsi en déduire la focale recherchée f_d'.

Déterminer la distance focale d'une lentille divergente par la méthode de votre de choix (selon le temps restant).