

TP1a - Étude et application des lentilles

Matériel : Banc d'optique, lampe blanche, objet (par exemple plaque gravée d'une lettre), écran, miroir, jeu de lentilles convergentes : 200 mm, 100 mm, et deux qui diffèrent d'au moins un facteur 2 (par exemple (+500 et +150 mm), ou bien (+300 et +100 mm)), une lentille divergente.

Première partie

Formation d'image par une lentille

Savoir-faire :

- Optimiser la qualité d'une image (alignement, orientation, limitation des aberrations, ...).
- Mettre en œuvre des protocoles d'évaluation rapide et de mesure précise de distances focales.
- Choisir une ou plusieurs lentilles en fonction des contraintes expérimentales et choisir leur focale de façon raisonnée.
- Comparer deux valeurs dont les incertitudes-types sont connues à l'aide de leur écart normalisé.
- Simuler un processus aléatoire permettant de caractériser la variabilité de la valeur d'une grandeur composée.
- Analyser les résultats obtenus à l'aide d'une procédure de validation : analyse graphique intégrant les barres d'incertitude.
- Simuler un processus aléatoire de variation des valeurs expérimentales pour évaluer l'incertitude sur les paramètres du modèle.

L'objectif de ce TP est de se familiariser avec les lentilles minces, outils essentiels à la manipulation des faisceaux lumineux. Les applications des lentilles vont de la formation des images (caméra, œil, lunettes, télescope, etc) à la focalisation de lasers (lecture de DVD, pointeur laser, etc). Elles seront ainsi utilisées dans toutes les expériences d'optique ondulatoire de PC.

ATTENTION : Les lentilles et miroirs utilisés sont fragiles et peuvent être facilement rayés. Il ne faut donc pas toucher leur surface !

Vous disposez d'un banc d'optique, d'une source lumineuse, d'un objet, d'un écran, d'un jeu de lentilles, d'un miroir et d'un diaphragme.

Mode d'emploi des énoncés de TP :

Le symbole \clubsuit indique une question où il faut proposer un protocole/schéma expérimental.

Le symbole STOP \ominus indique qu'il faut faire appel au professeur pour valider votre travail et poursuivre le TP.

Le symbole \heartsuit indique une question théorique qui peut être travaillée à la maison avant ou après le TP. Ce peut être une question de proposition de protocole repérée par \clubsuit .

1 Reconnaissance rapide des lentilles minces

Vous disposez d'un jeu de lentilles. La déviation des rayons lumineux par une lentille est caractérisée par une longueur algébrique (c'est-à-dire pouvant être positive ou négative, comme les longueurs dans un repère orienté) souvent notée f' , appelée **distance focale** et indiquée sur le support de la lentille. Les lentilles de distance focale $f' > 0$ sont convergentes, celles de $f' < 0$ sont divergentes.

1.1 Forme de la lentille

Une première méthode pour identifier le caractère convergent ou divergent d'une lentille consiste à observer sa forme et plus précisément la courbure de sa surface.

1. Observer les lentilles à votre disposition. Quel est le signe de la distance focale des lentilles à bords plus épais que le centre ? Même question pour les lentilles à bords plus fins que le centre.

1.2 Observation d'un objet - effet loupe d'une lentille convergente

Une seconde méthode pour identifier le caractère convergent ou divergent d'une lentille consiste à observer un objet à travers la lentille.

★ Lire un texte à travers la lentille (-100 mm ou -150 mm) puis à travers la lentille ($+100$ mm ou $+200$ mm), la lentille étant placée près du texte.

2. Les lettres sont-elles plus grandes ou plus petites ? En déduire quelle type de lentille permet d'obtenir un effet loupe (c'est-à-dire où l'image paraît plus grande ce qui facilite la lecture).

★ Observer un objet situé à grande distance (quelques mètres) en plaçant votre œil derrière la lentille (-100 mm ou -150 mm).

3. L'image formée par la lentille apparaît-elle plus grande ou plus petite, droite ou renversée ?

2 Estimation rapide de la distance focale d'une lentille convergente

★ Poser ce magnifique poly de TP sur un tabouret ou par terre. Placer une lentille convergente (si possible de faible distance focale pour de meilleures observations) contre ce texte et l'éloigner progressivement. Pour une distance lentille-poly faible, on remarque au début un effet loupe comme vu précédemment.

4. Que remarque-t-on ensuite sur le sens de l'image observée lorsqu'on continue à éloigner la lentille du texte ? Repérer le lien avec la distance focale indiquée sur la lentille.

3 Formation d'image par une lentille convergente

3.1 Instructions pour les manipulations

Pour minimiser les aberrations (altération de la géométrie et de la couleur des images), il faut vérifier le mieux possible ces critères :

- rayons peu inclinés par rapport à l'axe optique (axe principal de votre dispositif),
- rayons proches de l'axe optique.

En conséquence, la méthodologie générale est de :

- Placer les éléments sur un banc d'optique pour un alignement longitudinal (le long de l'axe principal) optimal.
- Ajuster la hauteur de chaque élément de manière à les centrer sur un même axe : alignement transverse.
- Orienter les éléments de manière à rendre parallèles leurs plans de symétrie.

rq : pas forcément évident si le faisceau lumineux issu de la source n'est pas horizontal...

3.2 Condition d'observation d'une image réelle - règle des $4f'$

On souhaite former une image réelle d'un objet (plaque gravée d'une lettre par exemple) à l'aide d'une lentille convergente de focale $f' = +100$ mm (ou $+200$ mm). Pour mesurer des longueurs, on choisira de centrer le repère au centre de la lentille (point O), l'axe horizontal est orienté positivement dans la direction de propagation des rayons lumineux, l'axe vertical orienté vers le haut. On notera \overline{AB} la distance algébrique (qui peut être positive ou négative) entre les points A et B.

★ Placer sur le banc d'optique la source et un objet. Placer l'écran à une distance D de l'objet telle que $D > 4f'$.

5. En déplaçant la lentille [*Il faut évidemment ajuster sa hauteur et son orientation dès qu'on la place sur le banc.*], est-il possible d'obtenir une image nette sur l'écran? Remarquer son sens. Combien de positions permettent une image nette? Laquelle permet une image agrandie?
6. Considérons une configuration où on effectue une image nette agrandie avec une lentille convergente. Pour une distance objet-écran fixée, comment choisir une nouvelle lentille pour obtenir une image encore plus agrandie?
7. Cette fois, rapprocher l'écran de manière à avoir $D < 4f'$. Est-il possible d'obtenir une image nette sur l'écran?

3.3 Exploitation d'une mesure unique

★ Placer la lentille $f' = +200$ mm après l'objet à environ trois fois sa distance focale. Déplacer alors l'écran de manière à avoir une image nette.

8. On souhaite mesurer avec précision les positions (horizontales) de l'objet A , de la lentille O , de l'image A' . Quelles sont les sources d'incertitudes sur ces mesures? Comment procéder pour les estimer?
9. Mesurer les distances \overline{OA} et $\overline{OA'}$ avec leurs incertitudes.

La formule théorique reliant position de l'objet et de l'image est la suivante :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad \text{appelée formule de conjugaison}$$

10. À partir de cette formule, exprimer la valeur théorique attendue $\overline{OA'}_{th}$ en fonction de \overline{OA} et f' . [*« exprimer » veut dire démontrer une expression littérale et non pas donner l'application numérique.*]
11. On cherche à estimer l'incertitude sur $\overline{OA'}_{th}$. Remarquez que sa formule n'est pas suffisamment simple pour appliquer les formules à connaître sur les incertitudes types composées¹. On suppose que l'incertitude-type de f' est de 0,2 cm. Proposer une méthode de type Monte-Carlo pour estimer l'incertitude sur $\overline{OA'}_{th}$.
12. Calculer la valeur attendue $\overline{OA'}_{th}$ et son incertitude et la comparer à la valeur mesurée $\overline{OA'}_{exp}$ en calculant l'écart normalisé.

4 Mesure de distance focale par une série de mesure

Dans cette partie, on souhaite mesurer la distance focale d'une lentille convergente de manière plus précise qu'avec une seule configuration. L'objet AB est ici fixe, on mesure la position A' de l'image nette pour différentes positions du centre optique O de la lentille convergente (+100 mm ou +200 mm).

Mesures :

13. Pour au moins 7 positions différentes de la lentille, mesurer \overline{OA} et $\overline{OA'}$ avec leurs incertitudes.

Exploitation graphique des résultats :

La relation donnant $\overline{OA'}$ en fonction de \overline{OA} n'est pas affine (comme vu précédemment). Or, il est plus facile de juger qualitativement de la qualité d'un ajustement numérique si les points sont bien représentés par une droite.

14. En exploitant la relation de conjugaison, proposer un jeu de données à tracer qui donnerait a priori une droite.
15. Dans **Regressi**, créer les colonnes de valeurs de \overline{OA} et $\overline{OA'}$ (définir par exemple des grandeurs nommées **OA** et **OAprime**). Puis créer de nouvelles grandeurs **invOA** et **invOAprime** permettant a priori la visualisation d'une droite. Afficher le graphe.

1. Du type somme, différence, produit ou quotient.

16. On souhaite afficher les incertitudes prépondérantes de préférences sur l'axe vertical. Créer une colonne de valeurs d'incertitudes sur OA' : `u0Aprime`. Puis créer une autre grandeur `uinv0Aprime`.
17. Afficher les incertitudes verticales et effectuer un ajustement linéaire à un seul paramètre. En déduire qualitativement si le modèle est compatible avec la relation de conjugaison. Exploiter en particulier la valeur du paramètre d'ajustement.

Exploitation statistique des résultats :

18. À l'aide de vos mesures, utiliser un traitement statistique adapté pour estimer la mesure de f' avec son incertitude.

Deuxième partie

Construction d'une lunette astronomique

Objectifs :

- Optimiser la qualité d'une image (alignement, orientation, limitation des aberrations, ...).
- Modéliser expérimentalement à l'aide de plusieurs lentilles un dispositif optique d'utilisation courante.

Vous disposez d'un banc d'optique, d'une source lumineuse associée à une flèche (objet), d'un écran, d'un jeu de lentilles convergentes (+100 mm, +150 mm, +200 mm, +250 mm ou 300 mm ou 500 mm selon les groupes) et d'un miroir.

5 Avant-propos théoriques

5.1 Rappel : notion de grossissement

La capacité de l'œil à distinguer des détails d'un objet est déterminée par la comparaison entre d'une part, l'angle θ sous lequel est vu l'objet, et d'autre part l'angle limite de résolution θ_{res} de l'œil. Certains systèmes optiques permettent alors de résoudre des objets plus petits que cette limite de résolution si l'angle d'émergence θ' est supérieur à l'angle incident θ , voir figure 1. On définit alors le grossissement du système par le rapport $G = \theta'/\theta$.

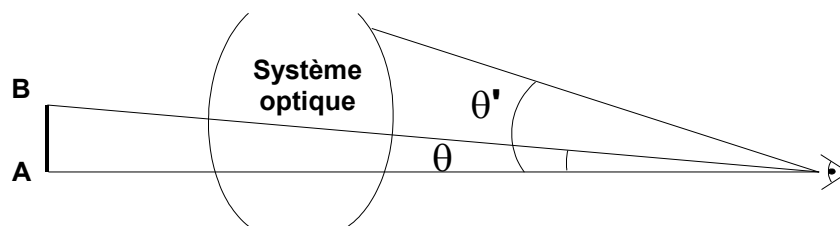


FIGURE 1 – Grossissement d'un système optique avec l'angle θ sans instrument, et l'angle θ' vu à travers l'instrument.

5.2 Rappel : la lunette astronomique

But : Objet éloigné (modélisé « à l'infini »), en faire une image à l'infini pour observation par un œil normal au repos.

Construction : Soit AB à l'infini. Une première lentille convergente L_1 donne une image $A_1'B_1'$ dans son plan focal image (contenant F_1'), voir figure 2. Pour envoyer ceci à l'infini, placer une lentille dont le plan foyer objet (contenant F_2) est confondu avec le plan de l'image intermédiaire $A_1'B_1'$. Remarquer que cette deuxième lentille a quasiment un rôle de loupe.

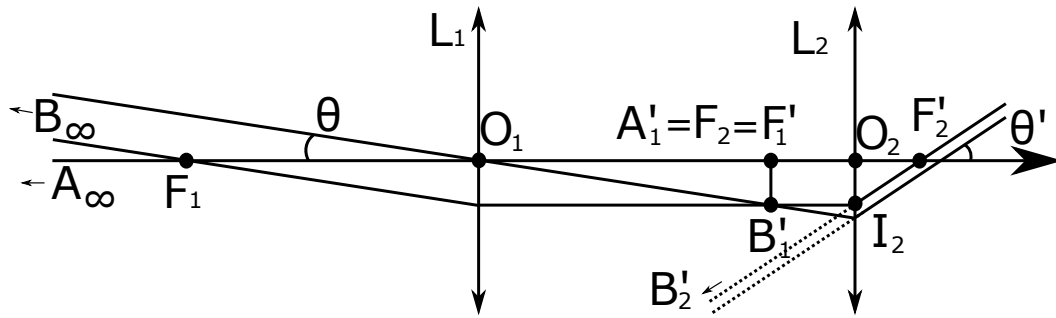


FIGURE 2 – Modélisation d'une lunette astronomique.

Pour un tel système optique, on montre que le grossissement vaut dans les conditions de Gauss :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} \simeq -\frac{f_1'}{f_2'} \quad (1)$$

Noter que le grossissement est négatif, l'image est donc inversée. Un grossissement de valeur absolue supérieure à 1 nécessite ainsi $f_1' > f_2'$

6 Méthode d'auto-collimation

La méthode d'auto-collimation permet de mesurer la distance focale f' d'une lentille convergente. À partir d'un système {objet-lentille} bien agencé, elle permet aussi de simuler un objet placé à l'infini.

6.1 Principe de la méthode d'auto-collimation

Considérons un miroir plan placé derrière une lentille convergente de distance focale $f' = 200$ mm et formons l'image d'un objet lumineux par ce système.

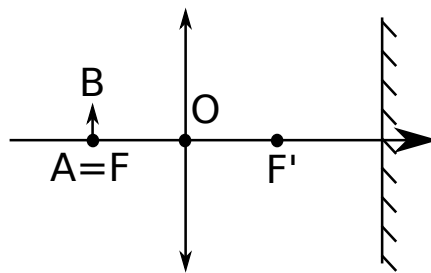


FIGURE 3 – Méthode d'auto-collimation.

1. 🏠 Reproduire le schéma de la figure 3 en gardant de la place en bas du schéma. Déterminer (sans calcul) la position de l'image de l'objet AB après traversée de la lentille, puis après réflexion sur le miroir puis après nouvelle traversée de la lentille vers la gauche.
2. 🏠 Donner alors sans calcul le grandissement de ce système optique.
3. Ces résultats dépendent-ils de la distance entre le miroir et la lentille ?
4. 🏠 Conclure en proposant un protocole expérimental de mesure de distance focale par cette méthode.

6.2 Réalisation d'un objet à l'infini

5. En utilisant la méthode d'autocollimation, placer la lentille L_0 de distance focale $f'_0 = 200$ mm de manière à réaliser une image de l'objet à l'infini.

On ne touchera plus dans la suite à l'ensemble {objet+ L_0 } qui nous permet de simuler un objet à l'infini.

7 Observation directe à l'œil

Le but de cette partie est de modéliser le fonctionnement d'un œil.

6. Réalisation de l'œil : l'œil est modélisé par une lentille +100 mm (cristallin) et un écran (rétine). Placer l'ensemble à la suite de la première lentille et obtenir l'image nette sur l'écran. La netteté dépend-elle de la distance entre L_0 et l'œil ?
7. Mesurer la taille de l'image sur l'écran et estimer l'incertitude associée.

Repousser provisoirement l'œil artificiel en bout de banc. Mais ne surtout pas le défaire, il servira dans la suite.

8 Observation par une lunette astronomique

Pour construire la lunette, on utilisera deux lentilles de distances focales qui diffèrent au moins d'un facteur 2 parmi celles à votre disposition, par exemple (+500 et +150 mm), ou bien (+300 et +100 mm).

8. Placement de l'objectif : Pour grossir l'objet ($|G| > 1$), quelle lentille L_1 choisir pour servir d'objectif d'après la formule 1 ? Vérifier rapidement que l'image intermédiaire $A'_1B'_1$ se forme bien au foyer image de cette lentille.
- Placement de l'oculaire : placer la lentille L_2 à la suite de L_1 de telle sorte que $F'_1 = F_2$.
 9. Décaler alors le modèle d'œil à la suite de L_2 , en plaçant la lentille de l'œil là où le faisceau émergent de la lunette est le plus concentré (c'est pour récolter le plus de lumière). Mesurer alors la taille de l'image sur l'écran et estimer l'incertitude de mesure.
 10. Calculer alors le grossissement de la lunette optique et présenter-le sous la forme $G = G_{\text{mesure}} \pm \Delta G$ [et évidemment comparer à la valeur attendue].

On rappelle que pour une relation $A = BC$ ou $A = B/C$, l'incertitude sur A est donnée par :

$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2} \quad (2)$$

9 Pour aller plus loin

Dans cette section, les questions précédées par (🏠) peuvent être travaillées à la maison.

9.1 Sur la lunette

11. (🏠) Démontrer la relation 1.
12. (🏠) Il est possible de produire une image non renversée en prenant comme oculaire une lentille divergente. Quel seraient les avantages d'une telle lunette ? Comment placer l'oculaire divergent ? Faire un schéma.
13. Demander alors une lentille divergente de focale adaptée pour réaliser l'expérience.

9.2 Sur la loupe

14. (🏠) Diamètre apparent minimal : connaissant l'angle limite de résolution de l'œil $\theta_{\text{res}} = 3.10^{-4}$ rad et le punctum proximum $d_{PP} = 25$ cm, déterminer le diamètre apparent minimal AB_{min} résolu par l'œil.
15. (🏠) Considérons une loupe de distance focale f' produisant une image à l'infini. Relier f' et l'angle θ' sous lequel un objet AB est vu.
16. (🏠) Calculer alors le grossissement de la loupe comme le rapport entre θ' et l'angle sous lequel l'objet est vu par l'œil à une distance d_{PP} . En déduire une contrainte sur f' pour que la loupe grossisse effectivement l'image.

9.3 Sur le microscope

But : Objet petit à distance finie, en faire une image à l'infini pour observation par un œil normal au repos.

Construction : Une première lentille convergente donne une image réelle agrandie, voir figure 4. Pour envoyer ceci à l'infini, placer une lentille dont le plan foyer objet est confondu avec le plan de cette image intermédiaire. $\Delta = F'_1F_2$ est appelé l'intervalle optique.

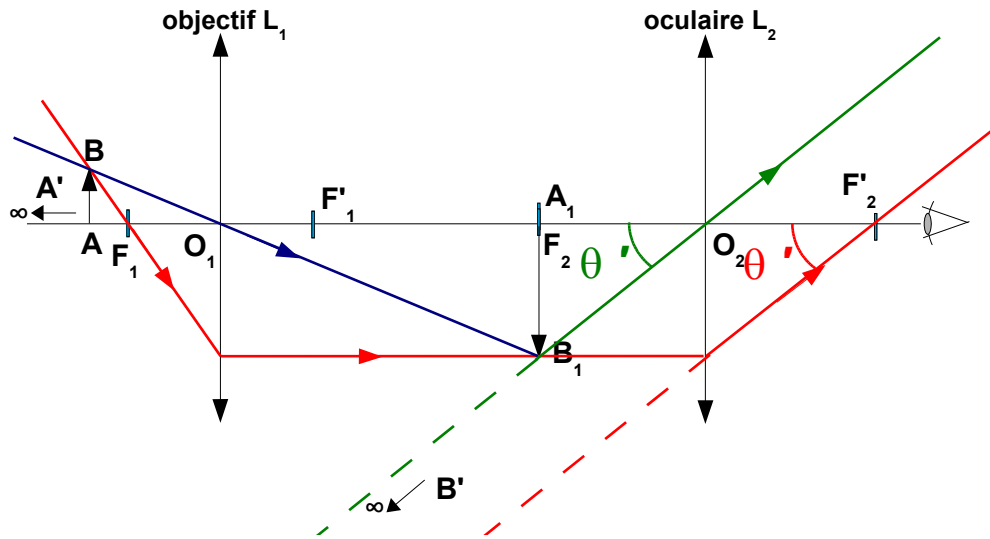


FIGURE 4 – Modélisation d'un microscope.

17. (🏠) Montrer que le grandissement de l'objectif $\gamma = \overline{A_1B_1}/\overline{AB}$ vaut $\gamma = -\Delta/f'_1$.
18. (🏠) Montrer que le grossissement de l'oculaire (défini comme le grossissement de la loupe) vaut $G_{oc} = d_{PP}/\overline{A_1B_1}$.
19. (🏠) En déduire une expression du grossissement du microscope $G = |\gamma|G_{oc}$.
20. Réaliser ce modèle de microscope.