


## FOCOMETRIE

*Le but de ce TP, d'une durée de 4 heures, est la mise en oeuvre et l'étude de diverses méthodes focométriques, permettant la détermination de la distance focale de lentilles ou de miroirs.*

*Durant l'ensemble du TP, le recours à des simulations informatiques, rendant compte des situations optiques étudiées, permettra de visualiser le trajet des rayons lumineux dans le système. Il est donc conseillé de laisser allumé l'ordinateur pour toute la séance. Le logo  est placé en regard des parties demandant une préparation théorique.*

### INTRODUCTION

#### 1°) Conjugaison à travers une lentille mince

Ouvrir le fichier *lentconv* dans le dossier PCSI se trouvant sur la partie E: du disque dur de l'ordinateur. Observer la simulation pour diverses positions de l'objet. Noter en particulier les évolutions observées quand l'objet atteint et dépasse les positions du foyer et du centre de la lentille.

Un interrupteur permet de commander le tracé d'un seul ou de plusieurs rayons.

#### 2°) Stigmatisme

Rappelons que l'on aura stigmatisme rigoureux lorsque que tous les rayons lumineux issus d'un point-objet vont converger (réellement ou virtuellement) en un même point-image. Les systèmes réels ne sont pas parfaitement stigmatiques.

Ouvrir le fichier *biconvexe*. Examiner l'influence de la largeur du diaphragme sur le faisceau émergent du système lentille-diaphragme. Déplacer l'écran en divers points de l'axe optique.


Ouvrir le fichier *senslent*. Ce fichier présente l'influence du sens de la lentille (cas d'une lentille plan-convexe) sur le stigmatisme du système. Interpréter en comparant les angles d'incidence ou d'émergence sur les dioptries. Tracer un schéma montrant le trajet des rayons lumineux dans la lentille, selon que la face d'entrée de la lentille soit le dioptré plan ou le dioptré convexe.

### A- FOCOMETRIE DES LENTILLES CONVERGENTES

*On envisage diverses méthodes pour la mesure de la focale d'une lentille convergente. On emploiera pour chacune des démarches proposées une même lentille de focale  $f' \approx +200$  mm (valeur donnée par le fabricant).*

*On prendra soin de vérifier la cohérence des diverses mesures obtenues, compte tenu de leur incertitude.*

#### I- Méthode de Bessel :

 A une condition que l'on exprimera plus loin, il est possible pour une position donnée A de l'objet et A' de l'écran de déterminer deux positions O et O' du centre optique de la lentille pour lesquelles on forme une image nette de l'objet sur l'écran.

Posons :  $\overline{AA'} = D$  ;  $\overline{OO'} = l$ . A l'aide de la relation de conjugaison (seconde formule de Descartes), établir la condition d'existence de deux positions O et O' :  $D > 4f'$ .

Puis, montrer que l'on peut exprimer  $f'$  par : 
$$f' = \frac{D^2 - l^2}{4D}$$

Effectuer diverses mesures de  $f'$  pour la lentille de distance focale nominale de 200 mm.

Etablir l'expression de l'incertitude absolue  $\Delta f' = \frac{2l}{4D} \Delta l$  et justifier que  $\Delta D$  est négligeable dans ce calcul.


En déduire un encadrement de la valeur mesurée pour  $f'$ .

Discuter des conditions amenant à une plus grande précision des mesures.

#### II- Méthode de Silbermann (ou "montage 4f'") :

Cette méthode correspond, dans la situation précédente, à envisager le cas limite où  $\overline{OO'} = l = 0$ .

Ceci conduit alors à l'expression de la focale par : 
$$f' = \frac{D}{4}$$

 Représenter graphiquement cette situation, et montrer par une construction géométrique que le grandissement  $\gamma$  est alors nécessairement égal à -1. Réciproquement, montrer à l'aide de la relation de conjugaison que la condition  $\gamma = -1$  implique nécessairement la disposition :  $p' = \overline{OA'} = 2f'$  et  $p = \overline{OA} = -2f'$ .

La mise en oeuvre expérimentale de cette méthode présente l'inconvénient de demander un déplacement simultané de l'objet et de l'écran.

Lorsque l'image (nette !) et l'objet apparaissent de même taille, la condition  $D = 4f'$  est alors vérifiée. On décalquera l'objet lumineux, puis on cherchera la disposition amenant à l'obtention d'une image de même taille que l'objet, et l'on relèvera alors les distances  $p'$ ,  $p$  et  $D$ . Effectuer plusieurs fois la même mesure, de façons indépendantes. En effet, une mesure donnée comporte une part d'erreur aléatoire, que l'on va limiter en moyennant sur plusieurs résultats.

Discuter de la précision des résultats. Proposer une valeur acceptable de la distance focale.


### III- Méthode d'autocollimation :

Cette méthode nécessite l'emploi d'un miroir plan en sus du système convergent dont on cherche la focale.

On peut d'abord visualiser cette simulation sur la simulation (fichier *autocoll*).

En déplaçant le centre optique de la lentille, constater que la situation d'autocollimation, pour laquelle l'objet et son image à travers le système lentille → miroir → lentille apparaissent dans un même plan, (mais renversée), n'est obtenue que lorsque l'objet est au foyer-objet de la lentille.

Noter qu'un déplacement du miroir n'a aucune incidence ; une légère rotation du miroir amène un déplacement de l'image dans le plan orthogonal à l'axe du système.

 Commenter la figure ci-dessous. Montrer qu'en situation d'autocollimation, la distance  $\overline{TO}$  entre l'objet et le centre optique de la lentille est égale à la distance focale de la lentille :

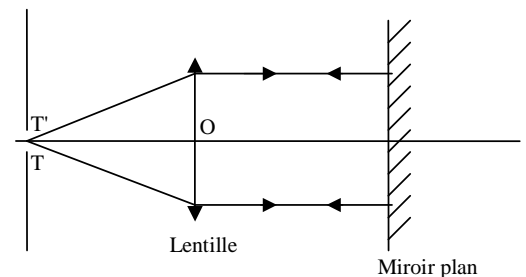
Construire graphiquement l'image d'un objet AB disposé dans le plan de T et montrer que l'image définitive A'B' est dans le plan de AB, renversée et de même taille que AB.

Manipulation : disposer successivement l'objet (fente en forme de 1), la lentille et le miroir sur le banc.

Déplacer la lentille, de façon à ce que l'image T' formée à travers le système catadioptrique lentille-miroir se trouve dans le même plan que l'objet T. Concrètement, l'image nette de l'objet apparaît alors projetée à proximité de cet objet.

Utiliser cette méthode pour mesurer la focale de la lentille fournie.

*Remarque :* on imposera un léger décalage des rayons réfléchis par rapport à l'axe optique, pour des raisons pratiques évidentes en prenant toutefois garde à ce que les rayons réfléchis par le miroir traversent effectivement la lentille.



## **B- FOCOMETRIE DES LENTILLES DIVERGENTES**

### I- Focométrie par association en doublet accolé :

Les méthodes envisagées dans la partie précédente ne peuvent être utilisées que pour des systèmes convergents, puisqu'elles nécessitent la formation d'images réelles à partir d'un objet réel.

Il est a priori possible de les employer pour la détermination de la focale d'une lentille divergente en associant celle-ci à une lentille convergente, d'assez forte vergence, de façon à constituer ainsi un système convergent.

Les deux premières méthodes nécessitent en pratique d'accoler à la lentille divergente une lentille convergente de focale connue. Nous allons montrer que leur mise en pratique ne présente pas d'intérêt.

L'association de deux lentilles minces constitue ce que l'on appelle un **doublet**. Si les deux centres optiques des deux lentilles peuvent être considérés comme confondus, le doublet est dit **accolé**. (il est dit **non accolé** dans le cas contraire).

Pour un doublet accolé, les centres optiques  $O_1$  et  $O_2$  des deux lentilles sont donc considérés comme confondus en un seul point O. Un objet AB donnera une image  $A_1 B_1$  à travers la première lentille  $L_1$ ,  $A_1 B_1$  jouera le rôle d'objet pour la seconde lentille  $L_2$ , qui en donnera une image définitive A'B'. Soient  $f_1$  et  $f_2$  les distances focales images des deux

lentilles. Les relations de conjugaison s'écrivent :  $\frac{1}{OA_1} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f_1}$  et  $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA_1} = \frac{1}{f_2}$

Les grandissements transversaux s'expriment par :  $\gamma_1 = \frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA}}{\overline{OA_1}}$  et  $\gamma_2 = \frac{\overline{A' B'}}{\overline{A_1 B_1}} = \frac{\overline{OA_1}}{\overline{OA'}}$

D'où l'on déduit : 
$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} \quad \text{et} \quad \gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2 = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

Cette situation dite de "doublet accolé" amène donc à un système équivalent à une seule lentille, dont la vergence

totale est la somme des vergences de chacune des lentilles : 
$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2}$$

Dans la situation mise en jeu dans le cadre du T.P. ,  $f'_1$  représente la focale de la lentille convergente et  $f'_2$  représente la focale de la lentille divergente.

On vérifie alors aisément que  $f' > 0$  si  $\left| \frac{1}{f'_1} \right| > \left| \frac{1}{f'_2} \right|$ .

La mesure de  $f'$  permet donc de remonter à  $f'_2$  connaissant  $f'_1$ .

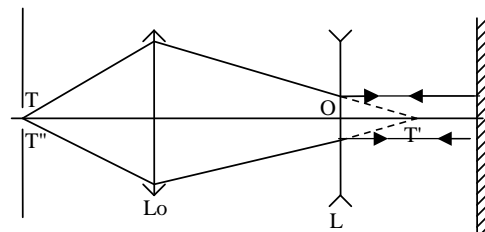
Application : accoler une lentille  $L_1$  de focale  $f'_1 = +333$  mm et une lentille  $L_2$  de focale  $f'_2 = -500$  mm, ainsi qu'un miroir plan. Par autocollimation, mesurer la distance focale  $f'$  de l'ensemble. En déduire la focale  $f'_2$  de la lentille divergente  $L_2$ . Comparer la valeur obtenue à la valeur  $-500$  mm donnée par le fabricant.

Cette situation de doublet accolé ne peut être obtenue qu'approximativement, puisqu'elle supposerait des lentilles infiniment minces.

**L'utilisation d'un doublet accolé, dans le but d'une mesure précise de la focale d'une lentille divergente n'est envisageable qu'avec des lentilles suffisamment minces (en pratique de focale grande).**

## II- Focométrie par autocollimation :

Nous sommes amenés à associer à la lentille divergente dont on cherche la focale une lentille convergente de distance focale connue. Cependant, il n'est ici pas nécessaire d'accoler les deux lentilles.



Au moyen de la lentille convergente  $L_0$ , on forme de l'objet  $T$  (fente en forme de 1) l'image  $T'$ . En avant de  $T'$ , on dispose l'ensemble lentille étudiée  $L$  et miroir plan et on le déplace de façon à ce que l'image retour  $T''$  se forme en  $T$ . Montrer que la distance  $OT'$  représente alors la distance focale de la lentille divergente. (algébriquement,  $\overline{OT'} = -f'$ )

Utiliser cette méthode pour mesurer la focale de la lentille divergente de focale nominale  $f' = -333$  mm en employant la lentille de focale  $f' = +200$  mm.

*Remarque : On accolera directement le miroir contre la lentille divergente afin d'éviter les problèmes liés à la limitation du champ du miroir.*

## **C- VISEUR OU LUNETTE A FRONTALE FIXE**

Le principe de fonctionnement et l'emploi d'une lunette de visée à l'infini ont été décrits lors du TP-cours sur le goniomètre.

Une lunette à frontale fixe, ou viseur, donnera une image nette d'un objet situé à distance finie. Elle permettra des pointés longitudinaux, c'est à dire qu'elle sera utilisée pour déterminer la position d'un objet le long de l'axe du système optique.

Il est possible d'obtenir un viseur à partir d'une lunette de visée à l'infini de deux façons :

- soit en déréglant la lunette pour la mettre au point sur un objet à distance finie (figure 1),
- soit par l'emploi d'une lentille additionnelle (bonnette) placée devant l'objectif de la lunette (figure 2).

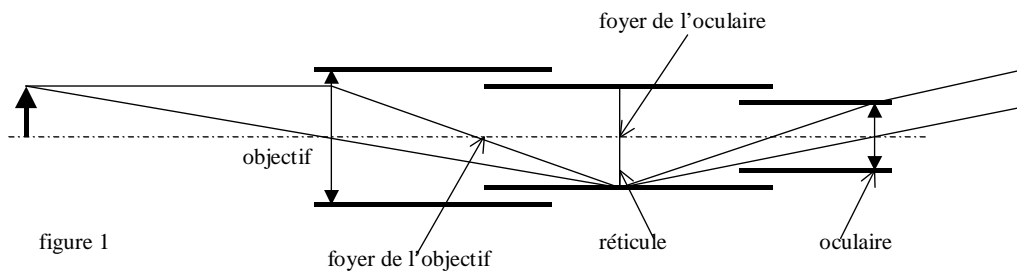


figure 1

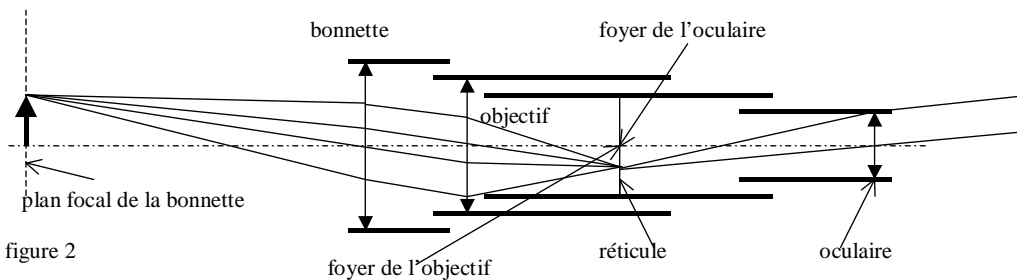


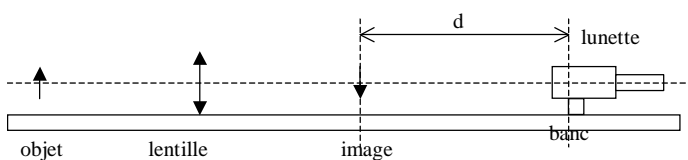
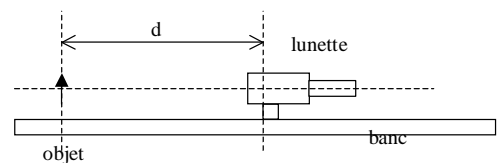
figure 2

### Expériences :

1°) Régler la lunette à l'infini, en l'absence de la bonnette. La lunette fournie n'étant pas autocollimatrice, on la mettra au point en visant un objet éloigné : antenne de télévision d'un bâtiment par exemple. L'objet et le réticule doivent apparaître nets dans l'oculaire.

2°) Ajouter la bonnette, constituée ici d'une lentille de diamètre 40 mm, de focale  $f' = + 200$  mm.

3°) La mise au point sur un objet réel placé sur le banc, en déplaçant le viseur (et sans dérégler la lunette !!) permet l'étalonnage du viseur. Relever alors la distance  $d$  entre lunette et objet, mesurée par exemple entre le plan de l'objet et le pied de la lunette.



4°) Observation d'une image réelle : placer l'objet lumineux à une position  $p = -400$  mm par rapport à une lentille de focale  $f' = + 200$  mm. Situer la position  $p'$  de l'image au moyen du viseur. Comparer la valeur de position d'image  $p'$  résultant du calcul théorique à la mesure expérimentale de  $p'$ .

5°) Observation d'une image virtuelle : placer l'objet lumineux à une position  $p = -90$  mm par rapport à une lentille de focale  $f' = + 200$  mm. Situer la position  $p'$  de l'image au moyen du viseur. Comparer les valeurs de position d'image  $p'$  calculée théoriquement et mesurée expérimentalement.

6°) Image virtuelle donnée par une lentille divergente : placer l'objet lumineux à une position  $p = -120$  mm par rapport à une lentille de focale  $f' = - 100$  mm. Situer la position  $p'$  de l'image au moyen du viseur. Comparer les valeurs de position d'image  $p'$  calculée théoriquement et mesurée expérimentalement.

7°) Focale d'une lentille divergente : former un faisceau parallèle en plaçant l'objet lumineux au foyer de la lentille convergente de focale  $f' = +200$  mm ; on procédera par autocollimation.

Puis éclairer la lentille divergente de focale  $f' = -100$  mm au moyen de ce faisceau. La position de l'image, relevée au moyen du viseur, doit vérifier en principe :  $p' = f' = -100$  mm.

## D- EXEMPLE D'ASSOCIATION DE DEUX LENTILLES :


### D – 1 PRINCIPE DU TELEOBJECTIF

*Le principe du téléobjectif consiste à associer une lentille convergente et une lentille divergente, de façon à réaliser un système de grande distance focale image, tout en réduisant l'encombrement par rapport à celui que l'on obtiendrait avec une lentille simple, de grande focale.*

*On entend ici par encombrement, la distance séparant la face d'entrée du système et l'image formée par celui-ci d'un objet éloigné.*

Nous allons employer ici une lentille  $L_1$  convergente de focale  $f'_1 = +100$  mm et une lentille  $L_2$  divergente de distance focale  $f'_2 = -100$  mm.

On dispose les deux lentilles avec un écartement  $d = 50$  mm, la lumière traversant  $L_1$  puis  $L_2$ . L'ensemble constitue un doublet non accolé.

 Réaliser une épure à l'échelle 1:1 sur papier millimétré, pour un rayon incident faisant un angle d'environ  $10^\circ$  avec l'axe optique (l'objet est supposé être placé à l'infini).

On fera la construction dans le cas du doublet non accolé précédemment défini et pour une lentille convergente de focale  $f' = 200$  mm, placée au niveau de la face d'entrée du doublet.

Les deux schémas seront tracés l'un au dessus de l'autre, sur la même feuille, pour confrontation.

Comparer la taille et la position de l'image obtenue dans chacun des cas. L'encombrement est-il diminué dans le cas du doublet ?

Expérimentalement, reprendre la disposition précédemment décrite. L'objet réel (fente éclairée) sera renvoyé à l'infini en le plaçant dans le plan focal d'une troisième lentille (au choix, de focale  $f' = +50$  mm ou  $+200$  mm).

Placer les lentilles  $+100$  et  $-100$  avec un écart de  $50$  mm, à une distance objet-face d'entrée raisonnable. Obtenir l'image à l'aide d'un écran. Mesurer ses caractéristiques (position, taille) ?

Permuter l'ordre des deux lentilles dans le doublet non accolé. Qu'obtient-on ? Le doublet peut-il être assimilé à une lentille mince ?

Remplacer les deux lentilles du doublet non accolé par une unique lentille de focale  $+200$  mm. Obtenir l'image de l'objet renvoyé à l'infini. Donner ses caractéristiques : position, taille. Conclusions ?

## D-2 LUNETTE DE GALILEE

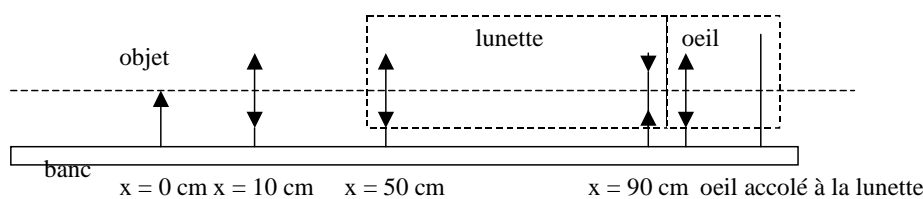
*Galilée (1564 – 1642) conçoit en 1609 une lunette permettant l'observation des astres, en particulier des planètes. Il découvre ainsi les taches du Soleil, le relief de la Lune, les satellites de Jupiter et les phases de Venus.*

*La lunette de Galilée est constituée d'une association de deux lentilles (ou doublet) la première étant convergente et la seconde divergente. Utilisée pour observer des objets très lointains, la lunette est réglée en visée à l'infini (doublet afocal). L'image qu'elle donne est envoyée à l'infini, ce qui correspond à une observation confortable pour un œil emmétrope.*


Le modèle proposé emploie une lentille  $L_1$  de focale  $f_1 = +500$  mm et une lentille  $L_2$  de focale  $f_2 = -100$  mm. L'observation d'un objet éloigné se fera en séparant les deux lentilles d'une distance  $d = 400$  mm.

Pour des raisons pratiques, l'objet lumineux sera disposé à distance finie et renvoyé à l'infini en le plaçant dans le plan focal d'une lentille  $L_0$  de focale  $f_o = +100$  mm. L'image sera récupérée au moyen d'un « œil artificiel » constitué d'une lentille  $L_3$  de focale  $f_3 = 125$  mm et d'un écran placé dans son plan focal.

L'objet sera constitué d'un trou de diamètre  $3$  mm, muni d'un dépoli assurant un éclairage uniforme (papier calque).



Réaliser le montage en positionnant préalablement la lentille  $L_0$  par autocollimation. Comparer la taille de l'image obtenue sur l'écran en présence et en l'absence de la lunette (lentilles  $L_1$  et  $L_2$ ).

 Tracer un schéma présentant la marche des rayons lumineux dans la lunette.

$\alpha$  étant l'angle entre un rayon incident et l'axe optique du système et  $\alpha'$  l'angle entre un rayon émergent et l'axe optique établir l'expression du grossissement  $G = \alpha' / \alpha = -f_1 / f_2$ .

## E- FOCOMETRIE DES MIROIRS SPHERIQUES

*La focométrie est la recherche des foyers d'un système optique. Dans le cas d'un miroir sphérique, la détermination de la position de son foyer, outre la distance focale, permet de préciser son caractère concave ou convexe (voire plan) et donne accès à son rayon de courbure.*

### I- Autocollimation sur un miroir concave :

Cette méthode, la plus évidente, s'appuie sur les mêmes principes que ceux envisagés dans le cas des lentilles, le miroir jouant ici à la fois le rôle de système convergent ou divergent (dont on cherche la distance focale) et de surface réfléchissante.

On dispose sur le banc optique un objet lumineux, puis on déplace le miroir de façon à ce que l'image se forme dans le plan de l'objet.

Montrer par une construction géométrique que l'image est alors renversée et de même taille que l'objet ; le grandissement  $\gamma = -\frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}} = -1$ , et que les points A, A' et C (le centre du miroir) sont confondus. (A et A' étant respectivement point objet et image sur l'axe optique).

En mesurant la distance objet-miroir sur le banc, on obtient donc le rayon de courbure du miroir, dont on déduit la distance focale et la position du foyer.


Estimer l'incertitude sur la mesure de la distance focale.

## II- Méthode de conjugaison pour un miroir concave :

Cette méthode repose sur l'exploitation de la formule de conjugaison avec origine au centre :

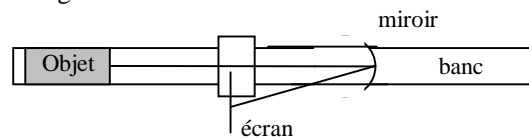
$$\frac{1}{\overline{SA}} + \frac{1}{\overline{SA'}} = \frac{2}{\overline{SC}} = \frac{1}{f} \quad \text{où S est le sommet du miroir, C son centre et f sa distance focale;}$$

A et A' étant respectivement les positions de l'objet et de l'image.

 Donner une construction géométrique des rayons dans le montage utilisé.

Pour des raisons pratiques, on est amené à décaler légèrement l'écran de l'axe du banc afin qu'il n'obture pas la marche des rayons lumineux.

De même, on dévie légèrement l'axe optique du miroir de l'axe du banc.



On place l'objet, fixe, en bout du banc optique. Puis on relève successivement les distances  $\overline{SA'}$  et  $\overline{SA}$  correspondant à diverses positions du miroir.

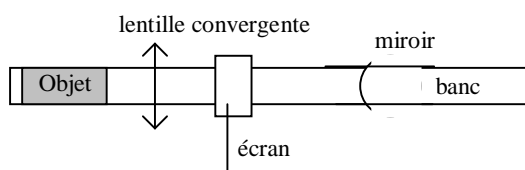
On détermine alors la distance focale  $f = \frac{\overline{SC}}{2}$ , algébrique, par application de la relation de conjugaison.

## III- Focométrie sur un miroir convexe :

Un miroir convexe ne fournissant une image réelle qu'à partir d'un objet virtuel, les méthodes précédentes ne sont pas directement applicables.

Nous allons d'abord obtenir un objet virtuel en formant à l'aide de l'objet réel dont on dispose une image réelle par une lentille convergente. Cette image tiendra ensuite le rôle d'objet virtuel dans les deux méthodes envisagées.

### a)- Méthode de conjugaison :




L'objet virtuel, obtenu à l'aide d'une lentille convergente est situé en arrière du miroir. Ceci conduit alors à une image réelle fournie par le miroir convexe, dont la position peut être mesurée en utilisant un écran.

La latitude de mise au point de l'image sur l'écran étant très importante, cette méthode présente cependant peu d'intérêt. On ne la mettra pas en œuvre dans ce TP.

### b)- Méthode d'autocollimation :

Placer l'objet à une extrémité du banc. Disposer une lentille de focale  $f' = +200$  mm selon le montage 4f'. Vérifier la taille et la position attendue pour l'image.

Interposer le miroir divergent de façon à ce que l'image définitive se forme dans le plan de l'objet. Mesurer alors la position du miroir et en déduire son rayon puis sa focale. Evaluer l'incertitude sur cette mesure.

 Faire une construction géométrique des rayons dans les deux situations et montrer que l'image intermédiaire  $A_1$  à travers la lentille doit se former au centre C du miroir, donc que  $\overline{SA_1} = \overline{SC}$ .

*Un schéma construit à partir d'un objet ponctuel est suffisant.*

