

TP1 - LENTILLES MINCES CONVERGENTES

Etude de la formation d'une image – Focométrie

PRESENTATION	2
0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP	2
1- FAISCEAU LUMINEUX LORS DE LA FORMATION D'UNE IMAGE.....	3
2- METHODES PAR RELATION DE CONJUGAISON	5
3- METHODE DE BESSEL.....	7
4- CONCLUSION : ANALYSE CRITIQUE	8
ANNEXES.....	9
Annexe A1- LISTE DU MATERIEL UTILISE.....	9
Annexe A2- SIMULATION PAR TRACAGE DES RAYONS DE LUMIERE EN 3D AVEC OPTICS-LAB.....	10

Ouvrir une session sur l'ordinateur :

Utilisateur : **etmp**
Mot de passe : **mesures**

TP1- LENTILLES MINCES CONVERGENTES

Etude de la formation d'une image – Focométrie

PRESENTATION

Sujet

Etudier la formation d'une image à l'aide d'une lentille convergente. En mesurer la distance focale.

Objectifs

- Visualiser en 3D le faisceau de rayons lumineux lors de la formation d'une image
- Approche expérimentale et par simulation
- Apprentissage de méthodes de mesure de distance focale
- Analyse critique de méthodes de mesures sur la base du nombre d'actions à réaliser et de la facilité des réglages

Consignes et sécurité

- **Au démarrage du PC** : un utilitaire rafraîchit et ouvre le répertoire de travail « E:\MesDocs ». Ce dossier contient le texte complet du TP en couleur avec ses annexes.
- **Le matériel optique ne DOIT jamais tomber !**
- **Eteindre la lampe en fin de TP**

Plan du TP

- 1- Faisceau lumineux lors de la formation d'une image p 3
- 2- Méthodes par relation de conjugaison p 3
- 3- Méthode de Bessel p 7
- 4- Conclusion : analyse critique p 8

Annexes :

Version en couleur dans E:\MesDocs

A1- Liste du matériel utilisé p 9

A2- Simulation par traçage des rayons de lumière en 3D avec Optics-lab p 10

0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

Le texte du TP en couleur, ses annexes complètes dont A2, le logiciel et les applets de simulation sont accessibles sur Internet par <http://mpsn.free.fr>

- Lire attentivement le texte de TP.
- Réaliser **avant le TP**, l'expérience virtuelle décrite §1.1- . Il n'y a pas de temps pour cela pendant le TP car le logiciel ne sera pas disponible.
- Lire et apprendre les éléments théoriques du § 1.2
- Réaliser **avant le TP**, l'expérience virtuelle décrite §1.3- . Attention : un plugin « Flash » à jour doit être installé dans votre navigateur et vous devez lui donner l'autorisation de s'exécuter. Cette démarche est possible dans Mozilla Firefox.

Il n'y a pas de temps pour ce travail pendant le TP car les applets ne seront pas disponibles.

- Lire la justification §3.2- .
Vous l'étudierez en détail dès que le cours / TD correspondant sera fait.

1- FAISCEAU LUMINEUX LORS DE LA FORMATION D'UNE IMAGE

1.1- Représentation en 3D d'un faisceau lors de la formation d'une image

Simulations demandées en préparation

L'annexe A2- et le logiciel sont disponibles sur la page Internet du TP.

- La page 1 explique le minimum à savoir pour expérimenter simplement et rapidement avec la version de démonstration du logiciel Optics-Lab qui s'exécute sans installation.
- Reproduire les trois situations caractéristiques présentées dans les pages 2, 3 et 4.

A l'aide des outils de déplacement, vous chercherez à mettre en évidence que **le faisceau de lumière issu d'une source ponctuelle se propage dans l'espace dans des volumes de forme conique.**

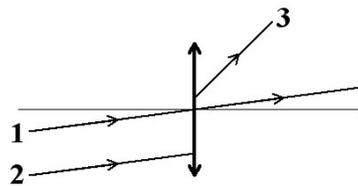
Sinon, au début du TP (à faire sans traîner : 3 mn max)

Ouvrir le pdf couleur de l'annexe A2- disponible dans E:\MesDocs et analyser les trois copies d'écran.

- Reconnaître les trois cas de formation d'une image à partir d'une source « réelle » de lumière (« objet réel ») dont les rayons de lumière sont physiquement issus.
- Noter que les rayons forment un faisceau de lumière occupant des volumes de forme conique.

1.2- Modélisation et notations

Approximation de Gauss



Les prévisions de ce modèle ne sont correctes que si la lentille mince (d'épaisseur faible devant son diamètre) « travaille » dans les **conditions de Gauss** :

Les rayons lumineux qui tombent sur la lentille ou qui en sont issus sont, à la fois, **peu éloignés, peu inclinés et peu écartés de l'axe de la lentille.**

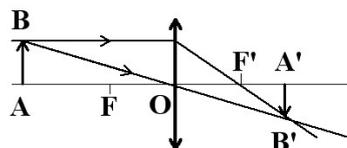
Le rayon 1- satisfait aux conditions, 2 et 3 n'y satisfont pas.

Ceci est réalisé en pratique quand la lentille est éclairée par un petit objet plan AB perpendiculaire à l'axe optique. La lentille en donnera alors une image A'B' perpendiculaire à l'axe.

Relation de conjugaison des lentilles minces

Les positions de l'objet et de l'image sont dites « conjuguées ». Ainsi tous les rayons issus de B et traversant la lentille passent aussi par B'. pour la construction graphique, on « privilégie » ces deux rayons particuliers mais il faut garder en tête qu'il faut raisonner sur l'ensemble des rayons concernés regroupés en faisceaux coniques.

Convention : la lumière vient de la gauche vers la droite.



lentille convergente : $f' > 0$

O est le centre optique de la lentille. F est son foyer objet et F' son foyer image. f' est la distance focale image.

Soient $\overline{OA} = x$ $\overline{OA'} = x'$ $\overline{OF'} = f' = -\overline{OF}$

Pour un objet « réel », c'est à dire situé en avant de la lentille, $x < 0$. Pour une image « réelle », située après la lentille, $x' > 0$; pour une image « virtuelle », située en avant de la lentille, $x' < 0$

La position de l'image x' est fonction de la position de l'objet x et de la longueur focale.

Remarque : cette relation est aussi vraie pour une lentille divergente (avec $f' < 0$)

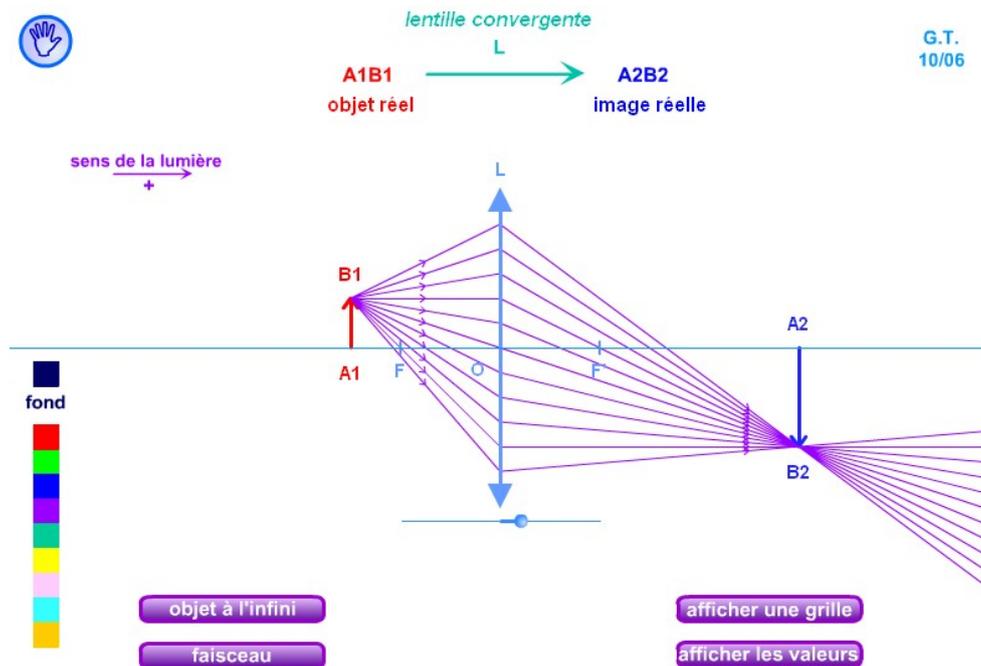
Relation de grandissement latéral des lentilles minces

Convention : sur cette figure \overline{AB} est positif (car au-dessus de l'axe optique) mais $\overline{A'B'}$ négatif (car au dessous...)

$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ est le grandissement latéral, on montre que $\gamma = \frac{x'}{x}$ (grandeur algébrique)

On a $\gamma > 0$ si l'image est « droite » et $\gamma < 0$ si l'image est « inversée » (c'est le cas de cette figure).

1.3- Simulation de la relation de conjugaison



L'applet FLASH due à G. Tulloue (Université de Nantes) a été choisie pour la simplicité de son usage. Un écran d'aide est disponible.

Attention : un plugin « Flash » à jour doit être installé dans votre navigateur et vous devez lui donner l'autorisation de s'exécuter. Cette démarche est possible dans Mozilla Firefox.

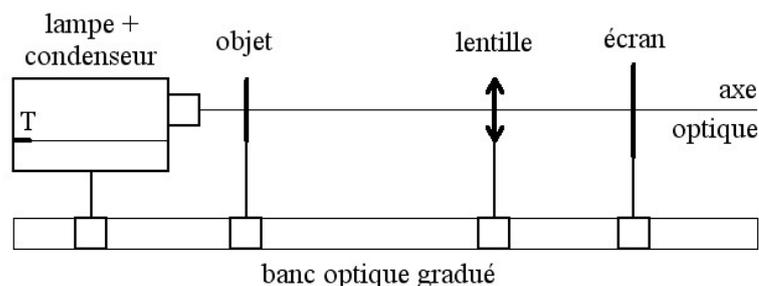
Travail expérimental demandé (à faire avant le TP, pas pendant le TP !) :

Après avoir lancé la simulation par le raccourci de l'applet « Lentille mince » placé sur le bureau :

- Visualiser le faisceau lumineux avec le bouton « **faisceau** » (« **XX** » désigne le bouton XX sur lequel cliquer)
- Prendre connaissance dans l'aide du rôle de la souris pour les réglages. Régler une situation similaire à la figure proposée.
- Commencer par obtenir un « **objet à l'infini** » et visualiser le rôle du plan focal image contenant F'
- Rechercher les cas décrit au §1.1- où l'objet est « réel » (en avant de la lentille) en déplaçant l'objet le long de l'axe à longueur focale fixe. Faire le lien avec la relation de conjugaison.
- Recommencer la recherche des trois cas avec un objet fixe mais en changeant la longueur focale (en la gardant cependant positive car la lentille est convergente !).
- Faire varier la taille de l'objet. Faire le lien avec la relation de grandissement.

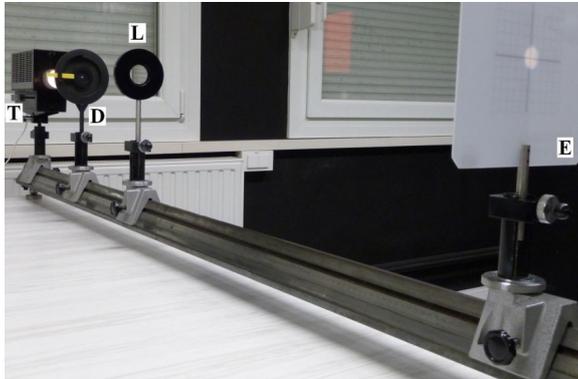
Q1.3- Quel reproche (fréquent pour ce genre de figures au vu des livres publiés) peut-on faire aux schémas tracés par cette applet ? Quelle(s) qualité(s) peut-on aussi lui reconnaître ?

1.4- Observations sur le banc optique

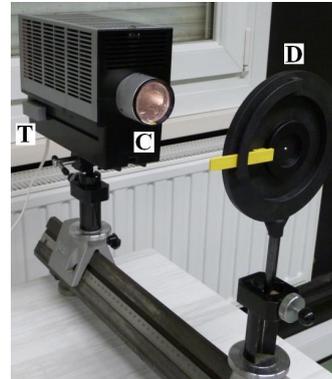


Travail expérimental demandé (à faire sans traîner : 10 mn max)

- Mettre en place le matériel correspondant aux simulations du §1.1- : utiliser comme **objet** le diaphragme D « **trou circulaire** » fermé au maximum et l'écran quadrillé E qui sera **regardé par transmission** pour plus de facilité d'observation.



Montage expérimental



Réglages de la lampe

- **Augmenter au maximum le tirage** de la lampe en éloignant le curseur **T** vers la fenêtre. Eloigner de la lampe le support de l'objet D jusqu'à le mettre à l'endroit où le condenseur **C** de la lampe forme l'image du filament de l'ampoule. Faire en sorte que cette image soit projetée bien nette sur l'arrière du diaphragme fermé noir tout en recouvrant entièrement le trou : ainsi on dispose pour la suite du montage d'un objet bien lumineux et ponctuel.
- Placer la lentille **L** à 30/40 cm de D et l'écran au bout du banc.
- **Veiller au bon alignement**. Pour cela il faudra non seulement régler la hauteur des supports mais aussi ajuster l'horizontalité du faisceau.
- Reproduire les situations simulées au §1.1- **en visualisant la conicité des faisceaux** avec un morceau de papier blanc. Terminer en produisant un faisceau de lumière parallèle à l'axe.

Q1.4- Comment vérifier que le faisceau produit à la fin est bien composé de rayons « parallèles » ?

2- METHODES PAR RELATION DE CONJUGAISON**2.1- Mesure rapide par projection « à l'infini optique »****Travail expérimental demandé**

- Utiliser maintenant l'**objet « étalon »**
- **Diminuer le tirage** de la lampe pour que le condenseur produise un cône de lumière tel que la surface de l'objet soit éclairée par l'arrière quasi uniformément.
- Enlever l'écran du banc.
- Régler le système en **projection** de l'image sur le mur opposé de la salle.
- Le repère de lecture du pied d'un cavalier correspond à l'axe de la tige.



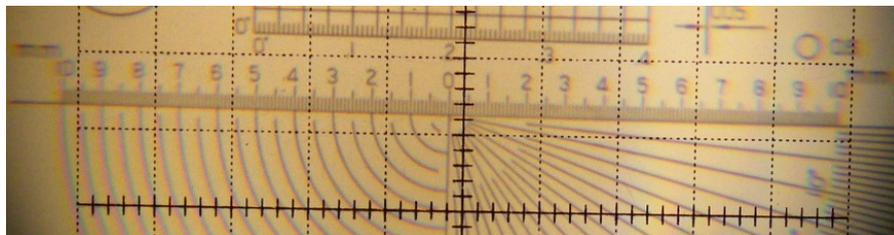
Q2.1- Obtenir une image formée sur le mur opposé de la salle bien nette. En déduire une première estimation de la longueur focale image de la lentille, soit f_1' . Justifier l'usage de l'expression « à l'infini optique »

2.2- Réalisation expérimentale de la série de mesures

- Remettre l'écran quadrillé sur le banc.
- Régler le système en **projection** de l'image sur l'écran.
- L'objet « étalon » porte des gravures dont les dimensions feront référence. Positionner l'objet de sorte que la petite règle graduée soit projetée bien horizontalement et que les indications soient bien lisibles sur l'écran **observé en transparence** (on regarde en direction de la source).

Travail expérimental demandé

- Mettre l'objet sur une position p_o dont la graduation est simple à lire. Ne plus le déplacer après.
- Positionner la lentille puis l'écran de sorte que l'image y soit la plus nette possible. Constaté qu'il y a une latitude de mise au point sur la position de l'écran, quantifiable par la petite distance Δp_E dont on peut déplacer l'écran tout en restant net. Centrer l'écran au milieu de cette zone de « netteté », soit p_E sa position.
- Pour **8** couples différents de positions de la lentille et de l'écran (qui doit évidemment rester sur le banc), relever les positions p_o de l'objet, p_L de la lentille, p_E de l'écran et Δp_E . Mesurer aussi la taille de l'image H' directement sur l'écran quadrillé gradué en cm, correspondant à la taille maximale de la petite règle-étalon servant d'objet, soit $0 < H < 20.0$ mm.



Horizontalité insuffisante : affiner un peu la position de l'étalon
Réglage de l'écran en limite de netteté.

Q2.2- - Créer un tableau de mesures et de calculs regroupant p_o , p_L , p_E , Δp_E , H , H' , x , x' , $1/x$, $1/x'$, f' , H'/H et x'/x (attention aux notations et aux signes ! cf. §1.2)

2.3- Exploitation de la série de mesures

Focométrie

Remarque : l'utilisation du tableur est une option personnelle supplémentaire facultative **qui ne vous dispense en aucun cas** de votre travail sur graphe papier (avec tracé et lecture de taux d'accroissement) et d'une régression avec votre calculette. Si vous utilisez le tableur, vérifier la cohérence de votre ensemble de résultats.

Q2.3a- Un des deux étudiants réalise un graphe du modèle **sur papier millimétré**, c'est à dire de $1/x'$ en fonction de $1/x$. Il exploite le tracé de la « meilleure droite » pour confirmer le modèle et estimer la longueur focale, soit f_2' .

Q2.3b- L'autre étudiant réalise la régression linéaire de $1/x'$ et $1/x$ à la calculette pour confirmer lui aussi le modèle en évaluant la pente. Il estime la longueur focale, soit f_3' ...

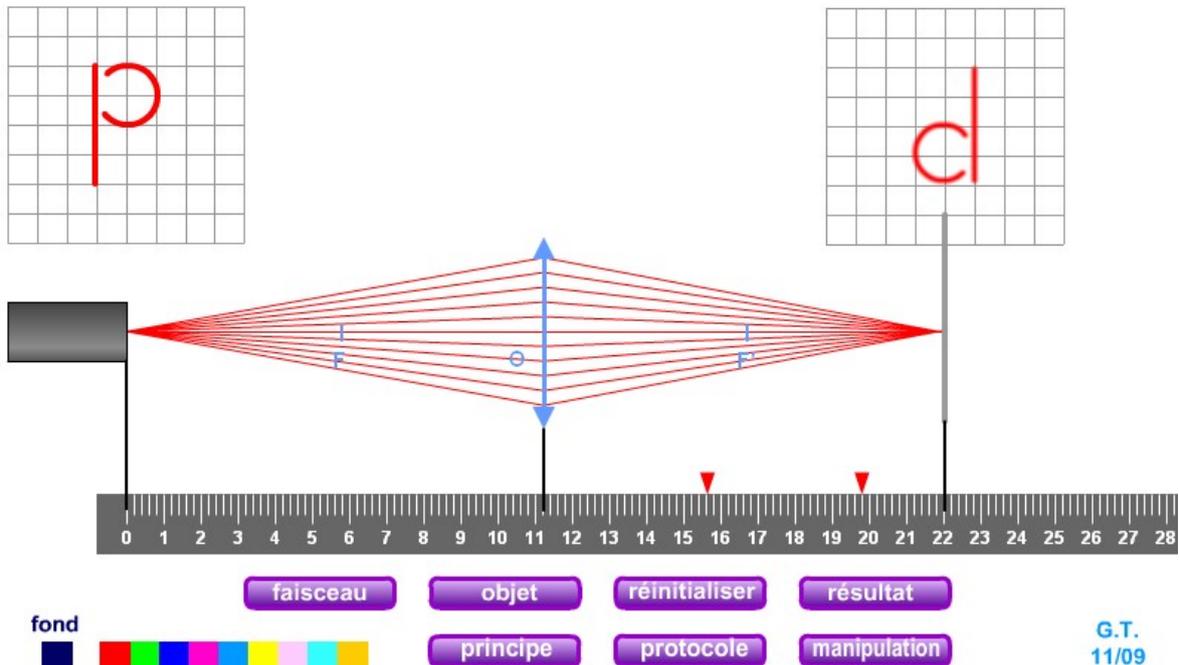
Q2.3c- Estimer la longueur focale à partir d'une moyenne sur la série des valeurs de f' calculées dans le tableau (méthode de réduction non pondérée), soit f_4' .

Grandissement transversal

Q2.3d- Par une étude graphique **sur papier millimétré** du tracé de H'/H en fonction de x'/x , vérifier la cohérence des valeurs obtenues par les deux méthodes de mesures du grandissement latéral.

3- METHODE DE BESSEL

3.1- Approche de la méthode par simulation



L'applet FLASH due à G. Tulloue (Université de Nantes) a été choisie pour la simplicité de son usage.

Un écran d'aide est disponible.

Travail demandé :

Après avoir lancé la simulation par le raccourci de l'applet « Méthode de Bessel » sur le bureau :

- Visualiser le faisceau lumineux avec le bouton « **faisceau** » (« XX » désigne le bouton XX sur lequel cliquer)
- Prendre connaissance des étapes du « **protocole** »
- Revenir à la « **manipulation** » et « **réinitialiser** ».
- Mettre en œuvre le protocole et repérer successivement les deux positions de la lentille pour les deux images recherchées avec les marqueurs rouges.
- Mesurer sur la figure la distance D entre l'image et l'écran puis la distance d entre les deux positions repérée.

- Calculer $f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$ (vraie si $D > 4f'$) et comparer avec le « **résultat** » donné par la simulation.

3.2- Justification théorique

(vous étudierez cette partie en détail après le TP si le TD correspondant n'a pas encore été fait)

Notation

Soient O le centre optique de la lentille et F' le foyer image tel que $f' = \overline{OF'}$. Soient A le point objet et A' le point image correspondant, avec $\overline{OA} = x$ et $\overline{OA'} = x'$. Rappelons que l'origine de x et x' est au centre O de la lentille ; la lecture des graduations de l'axe de la figure §4.1 n'indique donc pas directement x .

Equation vérifiée par x (distance objet-lentille)

Dans cette expérience l'objet et l'écran restent fixes.

La distance entre l'objet et l'écran est $D = \overline{AA'} = \overline{AO} + \overline{OA'} = x' - x$ (attention aux signes)

La relation de conjugaison de la lentille donne $\frac{1}{x'} = \frac{1}{x} + \frac{1}{f'}$ soit $x' = \frac{f'x}{f' + x}$

x est donc solution de l'équation $D = \frac{f'x}{f'+x} - x = \frac{f'x - x(f'+x)}{f'+x}$

qui devient après simplification $x^2 + Dx + df' = 0$

Condition sur D et f'

La méthode de Bessel fonctionne s'il existe deux positions effectives O_1 et O_2 donnant les deux images indiquées, soit donc deux valeurs réelles et distinctes de x .

Le trinôme précédent n'admet deux racines réelles distinctes que si son discriminant $\Delta = D^2 - 4f'D$ est strictement positif, soit la condition pratique $D > 4f'$

On a alors $x_1 = \frac{-D + \sqrt{\Delta}}{2}$ et $x_2 = \frac{-D - \sqrt{\Delta}}{2}$

Equations en d et D

On obtient d'une part directement $x_1 + x_2 = -D$ et

d'autre part $d = O_1O_2 = O_1A + AO_2 = x_1 + (-x_2) = x_1 - x_2 = d$

Ces deux équations donnent par addition $d - D = 2x_1$ et par soustraction $d + D = -2x_2$

Donc $(D - d)(D + d) = D^2 - d^2 = 4x_1x_2$ (attention aux signes)

Or d'après la forme des solutions obtenues précédemment et la définition de Δ

$$4x_1x_2 = (-D + \sqrt{\Delta})(-D - \sqrt{\Delta}) = (-D)^2 - (\sqrt{\Delta})^2 = D^2 - \Delta = D^2 - (D^2 - 4f'D) = +4f'D$$

soit encore $D^2 - d^2 = 4f'D$

Au final $f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$ avec la condition si $D > 4f'$

3.3- Réalisation expérimentale de la mesure

Préréglages

- Utiliser l'objet « d » à la place de l'objet étalon.
- Régler la distance objet / écran quadrillé à une valeur D vérifiant $D > 4f'$

Travail demandé

Q3.3- Rechercher les deux positions de la lentille pour obtenir une image nette sur l'écran qui sera encore regardé par transmission pour une meilleure visibilité. Calculer l'écart entre ces deux positions, soit d . En déduire la distance focale.

Chacun des deux étudiants réalise sa mesure. Calculer la moyenne des deux mesures, soit f_3' .

4- CONCLUSION : ANALYSE CRITIQUE

Q4.1- Résumer les résultats focométriques obtenus et examiner leur cohérence.

Q4.2- Faites en une analyse critique (non superficielle) en tenant compte par exemple du nombre de réglages ou de lectures nécessaires ainsi que des latitudes de mise au point constatées.

ANNEXES

Annexe A1- LISTE DU MATERIEL UTILISE

Matériel utilisé

- un banc optique de 2m et quatre supports « cavalier »
- une lanterne d'éclairage en lumière blanche (alimentation 12V)
- un objet « trou circulaire » : diaphragme de diamètre réglable
- un objet « étalon »
- une lentille convergente f' environ 100 à 200 mm de focale et son support
- un porte-lentille
- un écran plexi quadrillé
- deux textes de TP avec Annexes et fiches techniques

Matériel informatique et logiciels utilisés

- un ordinateur PC (a priori « MP-Optique6 » ?)
- navigateur avec plugin FLASH à jour et autorisé.
- accès à l'imprimante réseau

Logiciels et applets disponibles sur <http://mpsn.free.fr>

Logiciel de simulation Optic-lab

La version de démonstration (version bridée) est disponible sur <http://www.optics-lab.com/>

Applets de simulation de lentille mince

http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/lentilles/lentille_mince.html

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/focometrie/bessel.html>

Ces applets sont dues à Geneviève Tulloue (Université de Nantes)

Annexe A2- SIMULATION PAR TRACAGE DES RAYONS DE LUMIERE EN 3D AVEC OPTICS-LAB

Logiciel optics-lab

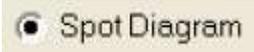
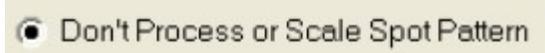
Optics-lab est un logiciel de simulation optique par traçage des rayons (« ray tracing ») sur la base des lois de l'optique géométrique.

La version de démonstration (version limitée) est disponible sur <http://www.optics-lab.com/> ou sur la page Internet de ces TP.

A l'ouverture du logiciel de démo, on dispose d'un unique scénario exploitant une lentille convergente de distance focale $f' = 150$ mm.

CONSEIL : conserver les choix par défaut et n'utiliser dans un premier temps que les possibilités de réglage suivants :

Menus utiles

Source / Numbers of ray	Choix du nombre de rayons calculés (choix d'une valeur dite « 2D » pour les écrans d'observations)
Source / Color	Choix de la couleur de la lumière pour la source sélectionnée
Source / Add light source	Permet d'ajouter une source de lumière. Dans l'écran de définition, accepter tous les paramètres par défaut, choisir la couleur puis OK. Positionner la source à la souris
Optics / Observation screen	Permet d'ajouter un écran d'observation (4 maxi). Travailler a priori en mode  Accepter les options par défaut mais CHOISIR : spot diagram options / 
Zoom	Permet d'agrandir ou diminuer la figure. Utiliser avec modération car on peut perdre de vue le faisceau.
Mode / Normal ray trace	Mode conseillé

Avec la souris

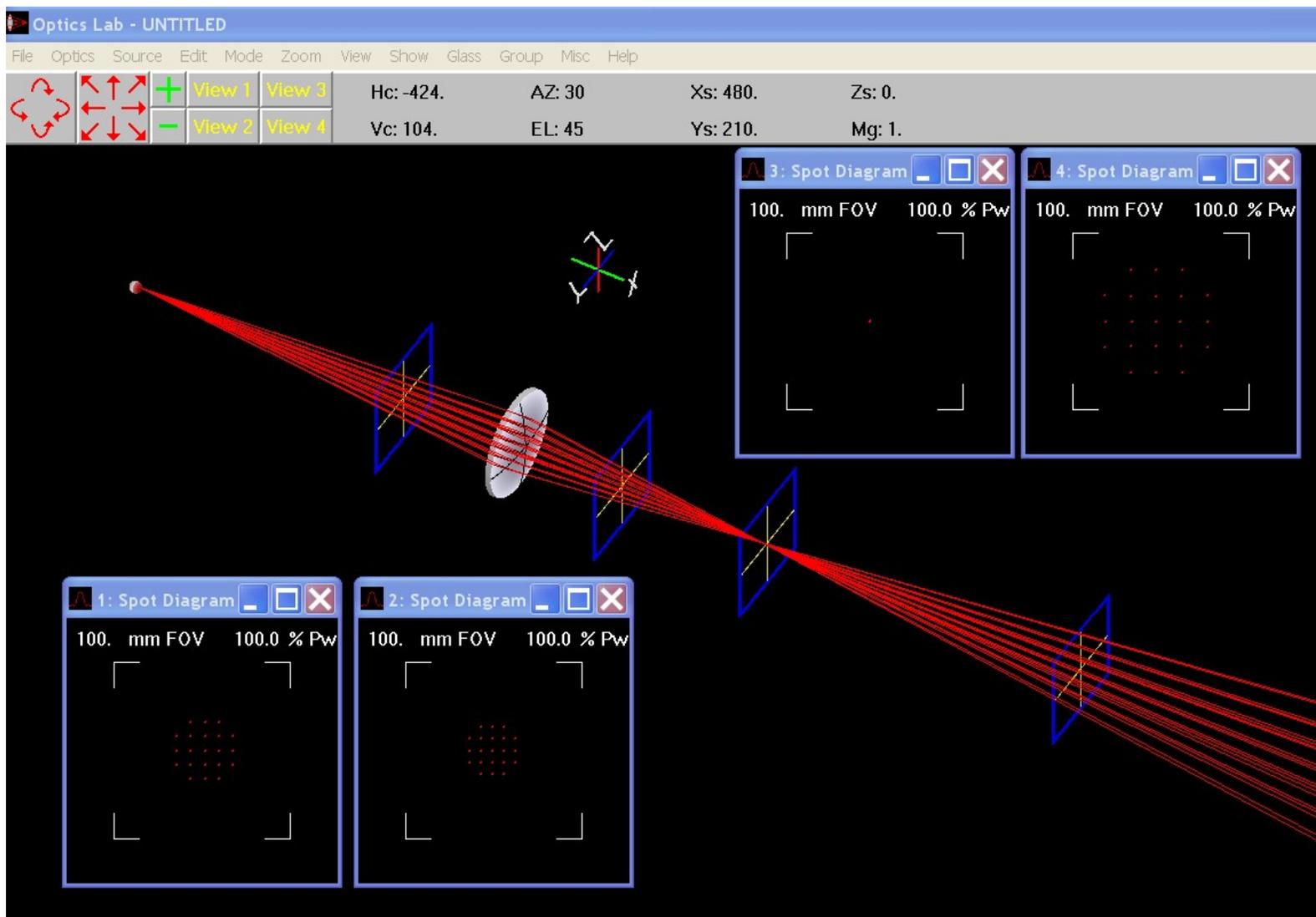
La lentille se déplace avec la souris (pointer la lentille, maintenir le bouton gauche enfoncé pendant le déplacement)

Les écrans d'observation se déplacent aussi à la souris de la même façon.

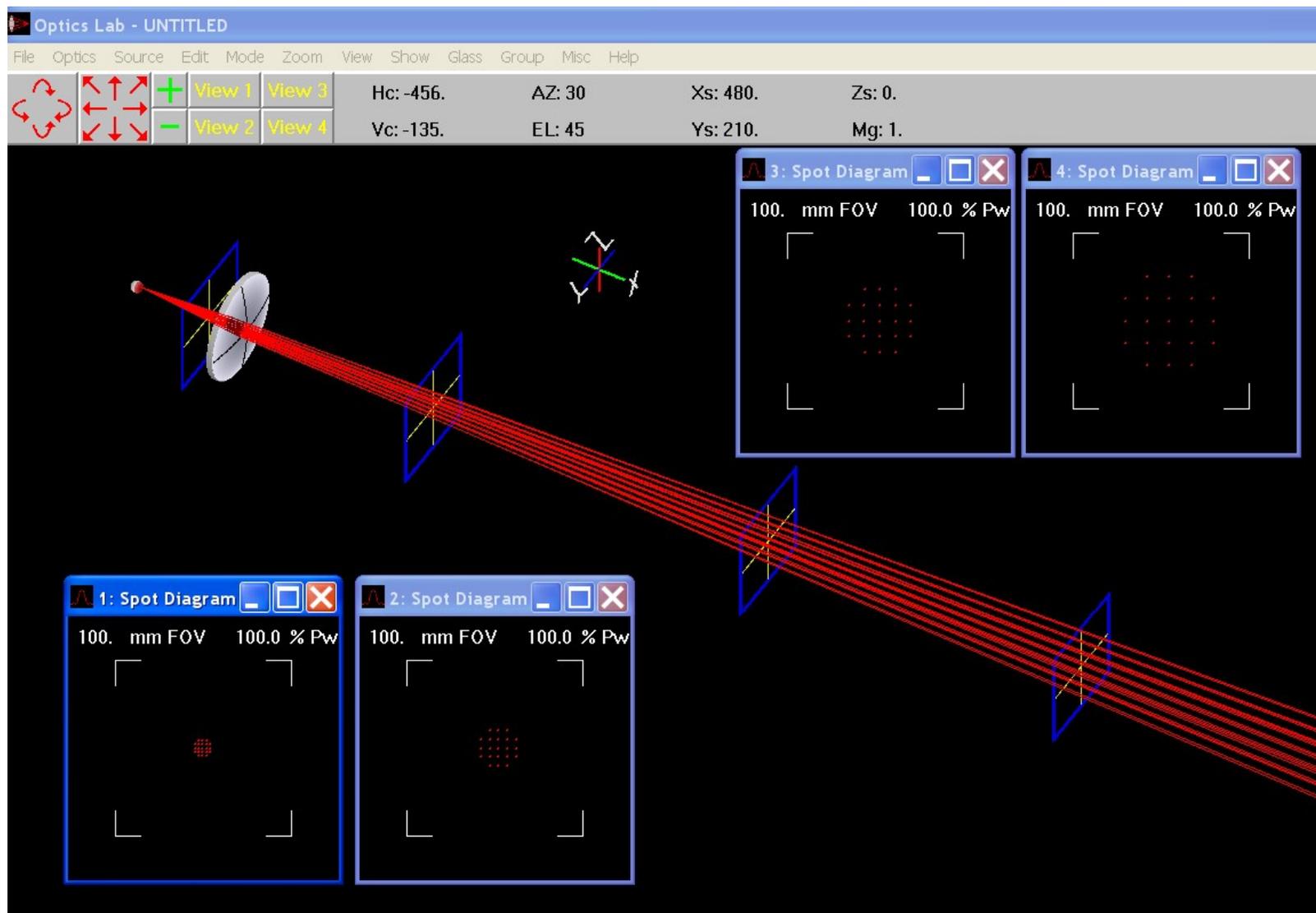
Un click droit sur l'angle inférieur de l'écran ouvre sa fenêtre d'options pour les réglages (voir « menu »). Le bouton « delete » permet la suppression éventuelle de l'écran.



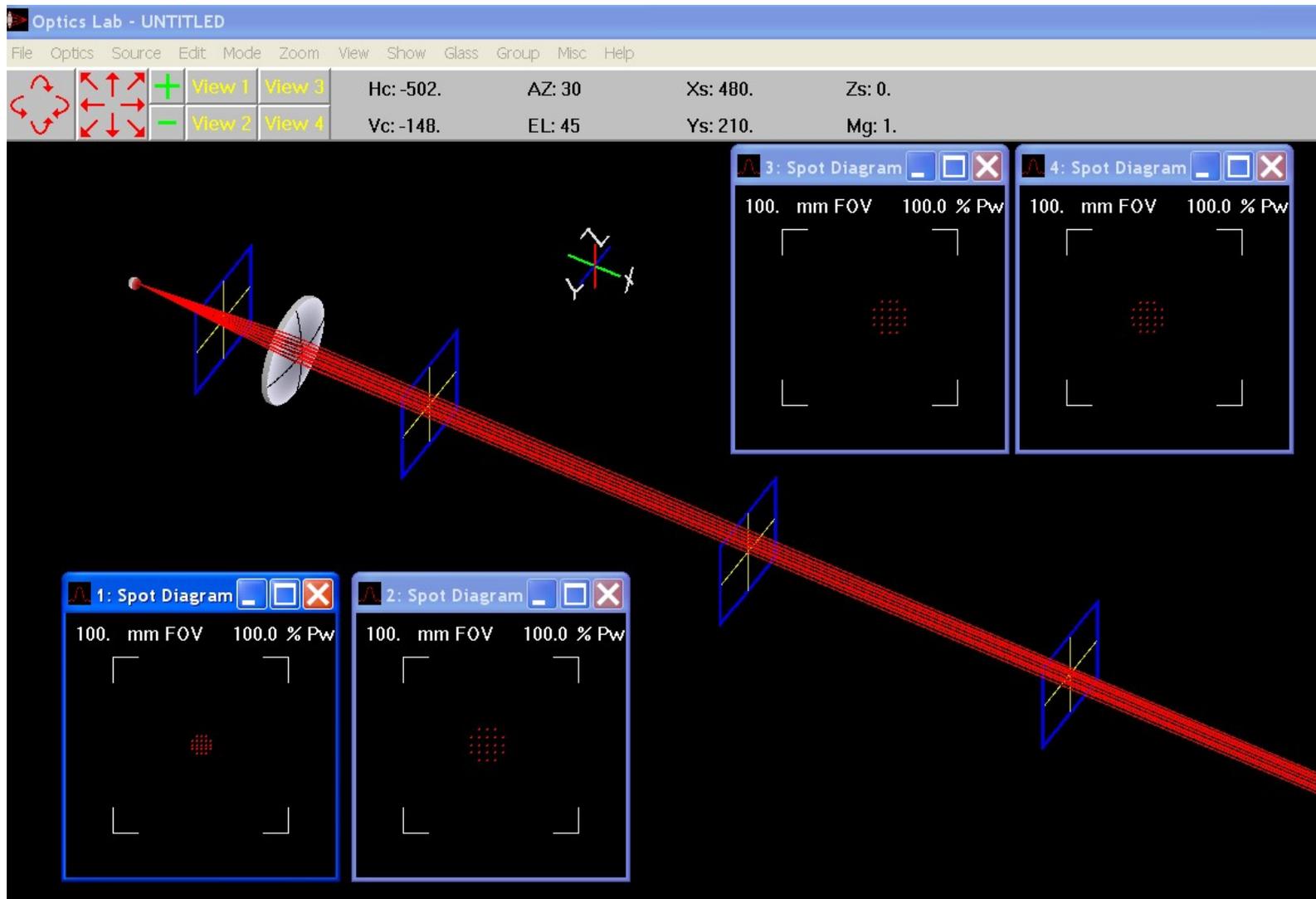
Rotation en bloc de la figure (4 choix) ou **Translation** en bloc de la figure (8 choix)
Coupler éventuellement ces déplacements avec un zoom léger.



L'objet est plus éloigné de la lentille que sa distance focale. Les faisceaux sont coniques.
 Le faisceau après la lentille converge vers une image réelle à distance finie, puis diverge après celle-ci. :



L'objet est moins éloigné de la lentille que sa distance focale. Le faisceau après la lentille est divergent.
Il semble provenir d'un point situé en avant de la lentille : l'image est virtuelle



L'objet est au foyer objet de la lentille, éloigné de celle-ci exactement d'une distance focale.
Le faisceau émergent de la lentille est alors composé de rayons parallèles : il y a formation d'une image réelle située à l'infini optique.

