

Fiche guide – Formation des images

Cette fiche guide « Formation des images » vous sera utile pour les TP O1 et O2. Elle contient l'essentiel de ce que vous devez savoir **et** savoir-faire. Vous n'y aurez pas le droit lors de l'examen de TP final. Les TP et les TP-cours de présentation sont destinés à vous permettre d'assimiler par l'expérience cette fiche.

QUELQUES RÉFÉRENCES :

- ⊗ « Optique expérimentale », Sextant. Excellent ouvrage concis, clair et précis sur toute l'optique par l'expérience.
- ⊗ « Optique géométrique », Bernard Balland (2007). Très bon ouvrage récent pour ceux qui cherche des détails exhaustifs sur l'imagerie et l'instrumentation optique classique.

1 Savoir monter un banc optique de qualité

Afin de réaliser un montage optique de qualité, qui fournit une image bien éclairée avec le minimum de distortions, il est nécessaire de bien comprendre les tenants et aboutissants, les limitations et les compromis imposés par les inévitables défauts des instruments optiques.

1.1 Objet, image : bien éclairer son montage

1.1.1 Faire un bel objet

a) Objet étendu

De façon générale, un « bon objet » est tel que de chaque point de cet objet émerge un faisceau lumineux suffisamment large de telle sorte que quelque soit la direction d'observation, il apparaisse toujours aussi lumineux. Souvent, sur un banc optique, on dispose d'objet transparents ou peu diffusant (par exemple la lettre P). Pour en faire un bon objet, il existe deux solutions très simples (voir figure 1) :

- ⊗ Élargir la source lumineuse afin d'augmenter la largeur du faisceau passant par chaque point de l'objet.
- ⊗ Placer un écran diffusant juste avant l'objet. Celui-ci jouera le rôle de source secondaire large pour l'objet car il va diffuser la lumière dans toutes les directions.

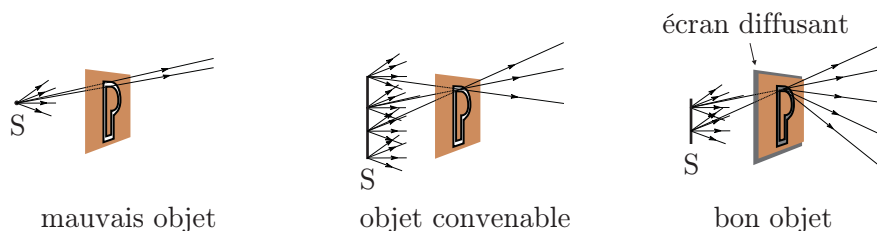


FIG. 1: Qu'est-ce qu'un bon objet.

La combinaison de ces deux techniques permet de faire un bel objet, mais il faut aussi savoir faire preuve de bon sens et de pragmatisme car tout est histoire de compromis : si par exemple l'assombrissement provenant de l'écran diffusant est trop important pour l'expérience désirée, il faut alors l'enlever...

b) Point source

Pour réaliser un point source suffisamment lumineux, il faut focaliser le faisceau issu de la source sur un trou (voir figure 2). L'écran diffusant peut être ajouté pour améliorer la qualité et l'ouverture

du faisceau. Si la luminosité n'est pas un problème, on peut gagner un peu de place sur le banc en rapprochant le trou de la source lumineuse.

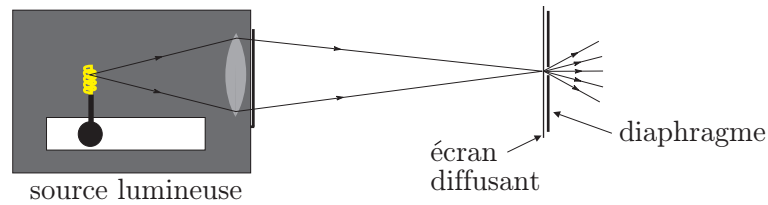


FIG. 2: Comment faire un point source.

1.1.2 Faire une belle image

Lorsque l'on veut former une image, on n'emploiera pas le même montage selon que l'objet est diffusant ou peu diffusant (transparent), comme cela est expliqué sur la figure 3. Dans le TP O1, nous construisons des objets diffusants, pour les raisons suivantes : *i*) nous n'aurons plus à toucher au réglage de la tirette lorsque nous placerons des lentilles, *ii*) nous pourrions placer la lentille aussi proche que l'on veut de l'objet, et enfin *iii*) le champ est plus grand (pour un objet peu diffusant, il faudrait coller l'objet au condenseur, comme dans le cas du rétroprojecteur, pour avoir un champ maximal). L'inconvénient est qu'il y a davantage de rayons non paraxiaux, donc il faut utiliser une bonne lentille pour former l'image (mais ce défaut peut être corrigé dans une certaine mesure en diaphragmant la lentille).

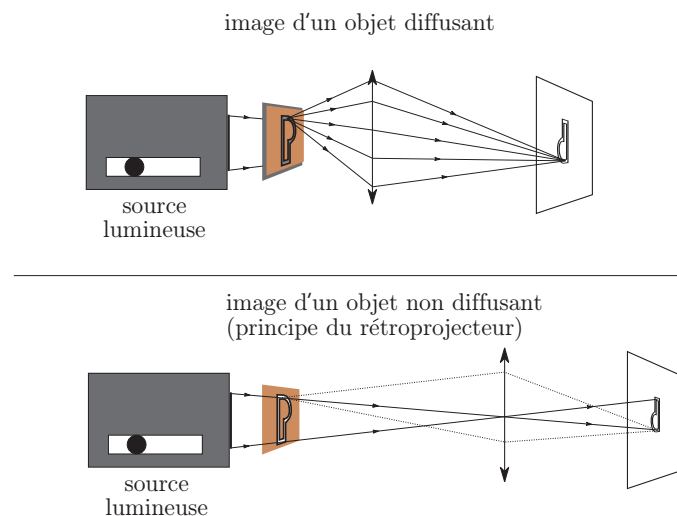


FIG. 3: Comment faire une belle image.

Retenez que pour faire une belle image, il faut au préalable avoir un objet et un système optique bien aligné et rappeler-vous des règles suivantes :

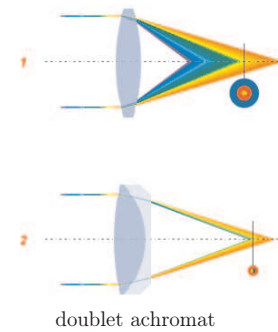
- ⊗ Une lentille convergente de focale f' ne peut pas former l'image d'un objet réelle sur un écran si la distance objet-écran est plus petite que $4f'$.
- ⊗ Pour maximiser la luminosité de l'image, régler la tirette de la source lumineuse pour que toute la lumière passe à travers la lentille et (si possible) le plus près possible de son centre pour maximiser le nombre de rayons paraxiaux (voir plus loin les aberrations géométriques). En règle générale, on fera l'image de l'ampoule de la lampe sur la lentille. Attention cependant aux compromis : ce réglage peut dégrader en partie la qualité de l'objet (en diminuant sa zone éclairée par exemple). Noter que ce réglage est particulièrement important si l'objet est peu diffusant mais l'est beaucoup moins dans le cas d'un objet diffusant.

1.2 Aberrations des lentilles minces

Les systèmes optiques ne sont jamais parfaits, ils présentent plusieurs défauts dont vous devez être conscient, que vous devez savoir identifier (en partie) et corriger au mieux. On distingue deux grandes classes de défauts¹, appelés aussi aberrations : les aberrations chromatiques et les aberrations géométriques. Notons que de façon générale, tous les défauts coexistent à plusieurs, mais leur importance relative varie.

1.2.1 Aberrations chromatiques

Elles proviennent du fait que l'indice d'un milieu dispersif (comme celui qui constitue une lentille) dépend de la longueur d'onde. Ainsi, la distance focale d'une lentille dépend de la longueur d'onde et si on l'éclaire en lumière polychromatique (en lumière blanche par exemple), l'image ne sera pas un point mais une tâche irisée. On corrige ces défauts à l'aide de plusieurs lentilles accolées fabriquées dans des verres différents de telle sorte que leur pouvoir dispersif se compense sur une partie du spectre (le cas le plus courant est celui du doublet achromat).



1.2.2 Aberrations géométriques

Les aberrations géométriques dépendent fortement de la géométrie du système considéré : forme des dioptrés (ou miroirs), position de l'objet par rapport à l'axe optique, étendue de l'objet, inclinaison des rayons par rapport à l'axe optique. On va regarder qualitativement l'influence de ces différents paramètres.

a) Aberration de sphéricité

C'est la plus importante des aberrations géométriques, elle provient du fait qu'un rayon éloigné de l'axe optique converge davantage qu'un rayon proche de l'axe optique. Pour limiter ces aberrations, reprenez ces règles générales :

- ⊗ Limiter les rayons non paraxiaux, en diaphragmant la lentille si nécessaire (ou encore en faisant l'image de la source sur la lentille).
- ⊗ Placer le côté le plus bombé d'un dioptré du côté des rayons les moins inclinés sur l'axe optique. C'est la règle dite de l'opticien (ou encore règle des 4P : Plus Plat, Plus Près), voir figure 4.

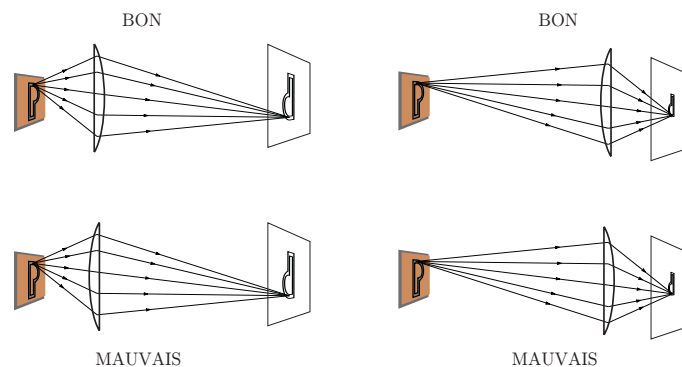


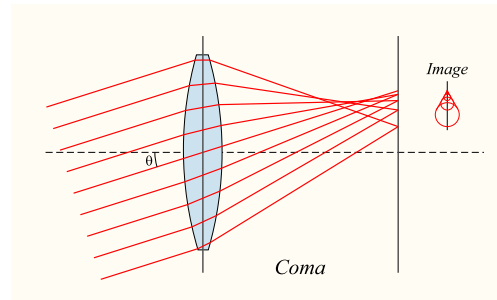
FIG. 4: Aberration de sphéricité : règle des 4P.

¹Notons pour être complet qu'un troisième phénomène est à l'origine d'un brouillage de l'image : il s'agit de la diffraction, qui n'est pas lié à la qualité des optiques, mais à la nature ondulatoire de la lumière et à la taille finie des optiques.

b) Coma

Cette aberration se manifeste lorsque les rayons sont inclinés par rapport à l'axe optique de la lentille. L'image d'un point devient une tâche qui prend une forme allongée (comme une queue de comète, d'où le nom de coma). Pour limiter cette aberration, retenez qu'il faut :

- ⊗ Réduire l'inclinaison des rayons par rapport à l'axe optique.



c) Distortions

Le défaut de distortion est dû à une variation du grandissement avec la distance à l'axe optique. Deux cas de figure se distinguent (voir figure 5) :

- ⊗ Distortion en barrillet : le grandissement diminue quand on s'éloigne de l'axe.
- ⊗ Distortion en coussinet : le grandissement augmente quand on s'éloigne de l'axe.

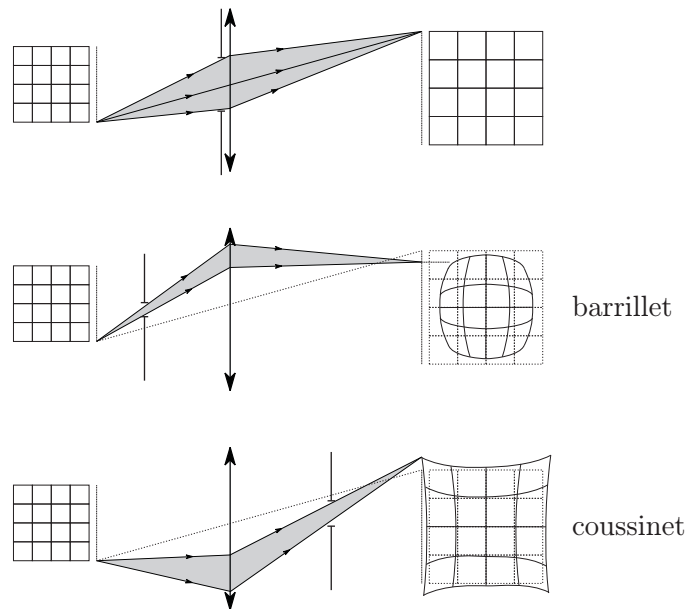


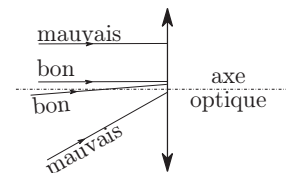
FIG. 5: Distortions.

d) Conditions de Gauss

Les conditions de Gauss sont des conditions définies pour limiter au maximum les effets d'aberrations géométriques (et donc utiliser le système optique dans un domaine de stigmatisme approché) :

- ⊗ Rayons proches de l'axe optique,
- ⊗ Rayons peu inclinés par rapport à l'axe optique.

Les rayons vérifiant ces conditions sont aussi qualifiés de paraxiaux. Il faudra d'autant plus respecter les conditions de Gauss que la vergence des optiques est grande.



2 Savoir mesurer des distances focales

Lors de mesures sur le banc optique, deux principales sources d'incertitudes interviennent :

- ⊗ La mise au point, c'est-à-dire le positionnement de l'écran donnant l'image la plus nette possible.

- ⊗ La mesure de la distance entre deux éléments (par exemple objet-lentille ou encore écran-lentille). Pour ces mesures de distance, il faudra utiliser les indications d'abscisses figurant sur le banc et toujours disposer les lentilles de la même façon dans leur pied.

En outre, il y a une source d'erreur systématique, qui provient du fait que la lentille n'est pas positionnée au centre de son support, et donc l'indication sur la règle du banc optique ne donne pas la position réelle de la lentille. On verra comment la méthode d'autocollimation permet de mesurer ce petit écart afin d'en tenir compte par la suite.

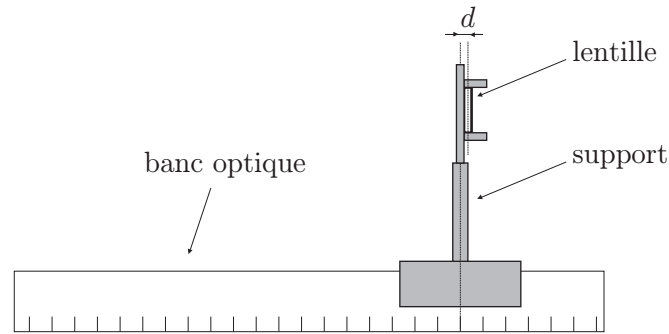


FIG. 6: Erreur systématique lors de la détermination de la position d'une lentille sur le banc.

2.1 Préliminaires et premières mesures

Pour reconnaître si une lentille est convergente ou divergente, vous disposez de plusieurs méthodes :

- ⊗ Essayer de faire l'image d'une source lointaine, telle qu'un néon, sur votre main. Si vous y arrivez, la lentille est convergente, et vous obtenez l'ordre de grandeur de la distance focale grâce à la distance {lentille-main}.
- ⊗ Placer la lentille près d'une source de lumière et regarder si le faisceau devient plus divergent quelque soit la position de la lentille ou bien si le faisceau commence par converger puis seulement diverge.
- ⊗ Vous pouvez également comparer les épaisseurs au bord et au centre de la lentille, mais attention de ne pas la salir (utiliser un mouchoir).
- ⊗ Enfin, vous pouvez également coller la lentille à un texte, puis l'éloigner légèrement : si le texte grossit, la lentille est convergente, sinon elle est divergente. Cet effet se voit aisément à l'aide des hyperboles de conjugaison car le grandissement vaut $\gamma = p'/p$.

La méthode d'autocollimation permet une bonne estimation de la focale. Elle consiste à faire accoler un miroir plan derrière la lentille et d'ajuster la position du système {lentille + miroir accolé} pour que l'image par ce système se forme sur le plan de l'objet (voir figure 7).

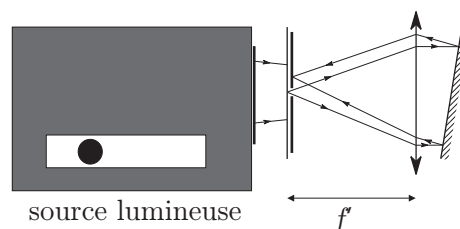


FIG. 7: Méthode d'autocollimation.

La méthode d'autocollimation permet de mesurer l'erreur systématique que l'on fait lorsque l'on mesure des distances entre une lentille et un plan. Pour cela, une fois la position d'autocollimation déterminée, il suffit de faire tourner le support de la lentille de 180° le long de son axe vertical. ainsi,

puisque la lentille n'est pas centrée à la verticale du pied, on aura changé la distance entre l'objet et la lentille. Donc l'image ne se forme plus sur le plan de l'objet et il faut décaler la lentille d'une distance $2d$ pour ramener l'image sur le plan de l'objet, où d est le décalage entre le centre de la lentille et l'indication du pied du support.

2.2 Exploiter une série de mesures : utilisation des relations de conjugaison

2.2.1 Relations de conjugaison

On rappelle la relation de conjugaison des lentilles minces :

$$-\frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OA}'} = \frac{1}{\overline{OF}'}$$

On note souvent $p = \overline{OA}$, $p' = \overline{OA}'$ et $f' = \overline{OF}'$ (voir figure 8). On peut représenter la relation de conjugaison dans le plan (p, p') (voir figure 9 pour une lentille convergente et divergente)

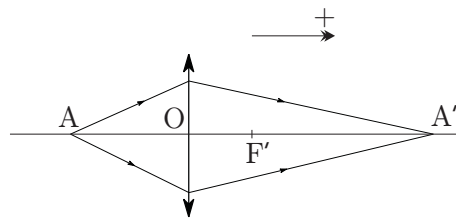


FIG. 8: Notations.

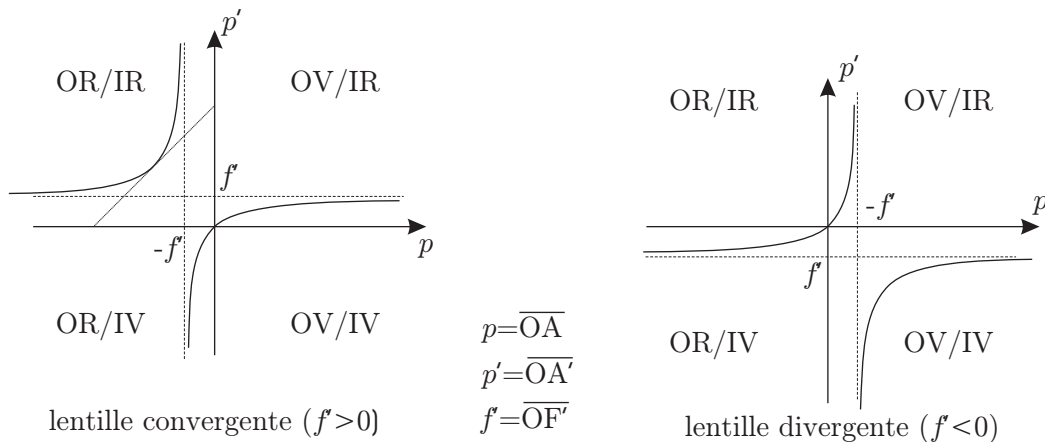


FIG. 9: Hyperboles de conjugaison.

- ⊗ Savoir faire un objet virtuel (figure 10) : utiliser une lentille convergente auxiliaire pour faire une image réelle de la lettre P et noter sa position. Positionner ensuite la lentille convergente dont on cherche la focale entre la lentille auxiliaire et la précédente image réelle. Noter que la connaissance de la focale de la lentille auxiliaire n'est pas nécessaire.
- ⊗ Mesurer p' dans le cas où l'image est virtuelle : utiliser une lentille convergente auxiliaire pour former une image réelle sur un écran et mesurer la distance {lentille auxiliaire - écran}. Enlever la lentille dont on cherche la focale puis, tout en gardant la distance de l'ensemble {lentille auxiliaire - écran} constante, déplacer cette ensemble jusqu'à ce que se forme une image nette de l'objet sur l'écran. La distance p' recherchée est alors donnée par la distance {objet - lentille auxiliaire}.

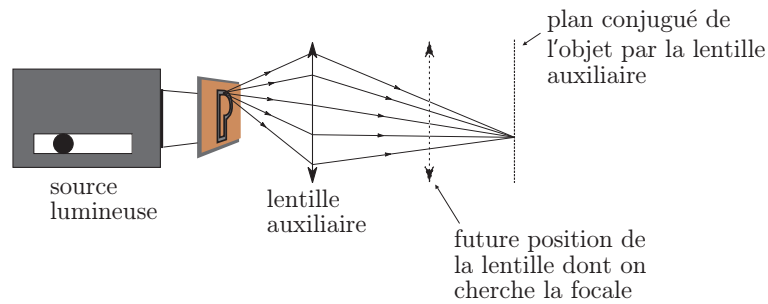


FIG. 10: Faire un objet virtuel.

2.3 Méthode de Bessel et Silbermann

Lorsqu'un objet et un écran sont espacés d'une distance $D > 4f'$, il existe deux positions pour une lentille permettant de former l'image de l'objet sur l'écran. Pour le voir à partir des hyperboles de conjugaison, il suffit de constater que $D = \overline{AA'} = \overline{OA'} - \overline{OA} = p' - p$. Ainsi, il suffit de tracer la droite $p' = p + D$ (en pointillé sur le graphe 9) et de chercher les intersections avec les hyperboles. On voit immédiatement que D doit être plus grand que $4f'$ et qu'en outre ça ne marche qu'avec des lentilles convergentes. Si on note d l'écart entre les deux positions de la lentille faisant une image nette sur l'écran, on a

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$$

La méthode de Silbermann consiste à rechercher expérimentalement la distance D telle que $d = 0$. On a alors $D = 4f'$.