

Projection de l'image d'une ouverture

par Pierre COLIN
Lycée Alain Fournier - 18000 Bourges
e-mail : Pierre.Colin@wanadoo.fr

RÉSUMÉ

L'objet de cet article est de fournir des outils pratiques permettant la réalisation de projections optiques de qualité dans les salles de cours. Après quelques rappels théoriques, on verra l'importance toute particulière qu'a le système d'éclairage et le soin que l'on doit apporter à son réglage. On abordera également les problèmes posés par les systèmes à plusieurs lentilles de projection. Enfin, on évoquera la possibilité d'utiliser une caméra vidéo pour visualiser les phénomènes peu lumineux.

1. INTRODUCTION

Dans ce texte, on appellera «trou» une ouverture de forme quelconque découpée dans un écran opaque. Dans la pratique, ce terme désignera donc aussi bien un trou circulaire qu'une fente ou une grille.

La formation de l'image d'un trou sur l'écran d'une salle de classe est un problème courant qui se pose au professeur de sciences physiques. Réaliser un spectre de lumière blanche, montrer le fonctionnement d'un microscope ou projeter une figure de diffraction à l'infini sont autant d'exemples où le montage réalisé devra, en premier lieu, permettre la projection d'une image nette et lumineuse d'une ouverture découpée dans un écran (le plus souvent une fente). Pourtant, la démarche expérimentale permettant d'aboutir à un bon résultat visible de plusieurs mètres n'est que très rarement décrite dans les livres d'optique. Le but de ce texte est de fournir quelques éléments permettant d'aboutir à ce résultat.

2. RAPPELS THÉORIQUES

Il ne s'agit ici que de rappeler les quelques résultats nécessaires à la compréhension du reste et d'en tirer immédiatement les conséquences pratiques concernant la

réalisation d'un montage. Tout ce qui est dit sur les lentilles minces se transposera sans difficultés particulières aux miroirs sphériques.

2.1. Objet, image, lentilles minces, plans conjugués.

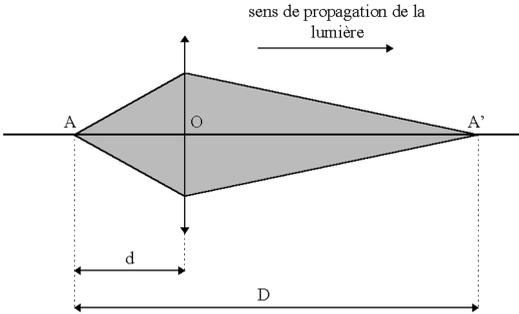


Figure 1

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'} \quad \text{avec} \quad p' = \overline{OA'} \quad \text{et} \quad p = \overline{OA}$$

f' est la distance focale image (ou plus simplement la focale) de la lentille utilisée. Il faut noter que, dans cette équation, les distances sont algébriques. Le sens positif généralement adopté est celui de propagation de la lumière ce qui permet de rendre positive la focale d'une lentille convergente et négative celle d'une lentille divergente. Ainsi, sur le dessin de la figure 1 où la lumière se propage de gauche à droite, p' est positif mais p est négatif.

Dans la pratique, les positions de A et de A' sont souvent imposées : l'objet dont on veut faire l'image (le point A) et l'écran sur lequel on veut projeter cette image (le point A') sont fixes ou relativement peu mobiles. De plus, lorsque l'on veut projeter l'image d'un trou (l'objet) sur un écran (l'image), on se trouve dans le cas d'un objet réel et d'une image réelle. Cherchons comment se traduisent ces contraintes sur le choix de la lentille :

1 - L'objet étant réel ($p < 0$) et l'image elle aussi réelle ($p' > 0$), il faut que la lentille soit convergente ($f' > 0$).

2 - Si l'on note D la distance entre l'objet et l'image (figure 1) et d la distance entre l'objet et la lentille, la formule de conjugaison avec origine au centre s'écrit :

$$\frac{1}{D-d} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f'} \quad \text{ou encore} \quad d^2 - Dd + f'D = 0$$

Lorsqu'elle est utilisée dans les conditions de Gauss (voir plus loin § 2.2.), une lentille mince peut former l'image A' d'un point A situé sur son axe. On dit alors que A et A' sont conjugués par la lentille. La position de A' se calcule à partir de celle de A grâce aux relations de conjugaison de la lentille mince (origine au centre) :

Cette équation n'admet des solutions en d que si $D \geq 4f'$. Autrement dit :

Avec une lentille convergente, on ne peut faire l'image d'un objet réel sur un écran distant de D de cet objet que si la focale de la lentille est plus petite que $D/4$.

Dans ce cas, deux positions de la lentille sont possibles :

$$d_1 = \frac{D}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4f'}{D}} \right]$$

$$d_2 = \frac{D}{2} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4f'}{D}} \right] = D - d_1$$

On peut remarquer que ces deux solutions correspondent à des positions symétriques de la lentille par rapport à $D/2$. Ce résultat était prévisible puisqu'il s'agit d'une conséquence directe du principe de retour inverse de la lumière (on place l'objet en A' et l'écran en A). On va voir que ces deux positions ne sont toutefois pas équivalentes.

Lorsque les points A et A' sont conjugués par une lentille mince, on montre que tous les points au voisinage de A et appartenant au plan passant par A orthogonal à l'axe (plan «de front»), possèdent un conjugué appartenant au plan orthogonal à l'axe (plan «de front») et passant par A' . Les plans orthogonaux ainsi définis sont dit plans conjugués par la lentille. Comme B' est dans le même plan méridien que B , l'image du segment AB orthogonal à l'axe est un segment $A'B'$ aussi orthogonal à l'axe (figure 2).

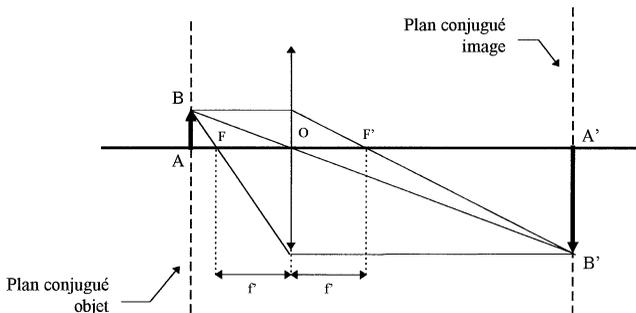


Figure 2

Le **grandissement transversal** γ est défini par :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -\frac{D-d}{d}$$

Il est intéressant de comparer le grandissement transversal γ_1 obtenu avec la première position correspondant à $d = d_1$ et le grandissement transversal γ_2 correspondant à la deuxième position $d = d_2$:

$$\gamma_1 = -\frac{D - d_1}{d_1}$$

$$\gamma_2 = -\frac{D - d_2}{d_2} = \frac{D - (D - d_1)}{D - d_1} = \frac{1}{\gamma_1}$$

Ainsi, la première position ($d = d_1$) correspond à celle donnant l'image la plus grande. Ce sera elle que l'on utilisera généralement dans une salle de cours.

2.2. Conditions de Gauss

Pour qu'un système optique puisse former des images nettes d'objets lumineux, il est dans la plupart des cas nécessaire que ce système soit utilisé dans les «conditions de Gauss». Cela signifie que les rayons lumineux qui traverseront chaque dioptre ou miroir composant le système devront le faire à une distance du sommet petite devant le rayon de courbure de ce dioptre ou de ce miroir et qu'ils devront rester peu inclinés par rapport à l'axe optique du système. Dans le cas contraire, l'image ne sera pas nette. Lorsque des rayons lumineux satisfont à ces deux conditions, on dit qu'ils sont paraxiaux. Pour une lentille mince, constituée de deux dioptries très rapprochés, les rayons doivent traverser la lentille au voisinage de son centre en restant peu inclinés sur l'axe.

Cette règle souffre quelques exceptions :

- Certains systèmes optiques sont rigoureusement stigmatiques pour quelques points de leur environnement. Cela signifie que tous les rayons lumineux (et pas seulement les paraxiaux) issus de l'un de ces points «convergeront¹» exactement en un autre point. C'est le cas, par exemple, du miroir elliptique : si l'on place une source lumineuse rigoureusement ponctuelle au niveau d'un des foyers de l'ellipsoïde de révolution constituant le miroir, tous les rayons issus de cette source viendront converger au niveau de l'autre foyer.

1. Ce sont seulement les prolongements des rayons qui passeront par une image virtuelle.

Ces systèmes sont rares et présentent généralement peu d'intérêt pratique car les points rigoureusement stigmatiques sont peu nombreux (deux dans la plupart des cas) ce qui est très insuffisant pour former l'image d'un objet étendu. Il faut néanmoins signaler trois applications importantes :

- Le miroir parabolique utilisé dans les télescopes quand il s'agit de ne former que l'image d'un objet ponctuel, comme une étoile (son diamètre apparent étant généralement très inférieur à la limite de résolution intrinsèque de l'instrument), pour des mesures de position par exemple.
- Le dioptre sphérique utilisé pour ses points de Weierstrass W et W' comme première lentille de l'objectif d'un microscope : les points de Weierstrass étant en plus aplanétiques (au sens d'Abbe), l'image d'un objet étendu au voisinage de W et dans le plan de front reste satisfaisante même si celle-ci est formée de rayons traversant le dioptre avec une grande inclinaison par rapport à son axe (ce ne serait pas le cas du foyer d'un miroir parabolique).
- Le miroir plan : tout couple de points symétriques par rapport au plan de ce type de miroir forme un ensemble rigoureusement stigmatique. Le miroir plan est ainsi un instrument d'optique capable de former une image rigoureusement nette de n'importe quel objet à trois dimensions. Cette image a malheureusement exactement les mêmes caractéristiques que l'objet dont elle est issue, ce qui limite l'intérêt de ce miroir en tant qu'instrument d'optique.

Plus généralement, le théorème de Maxwell montre que si les milieux d'entrée et de sortie ont des indices égaux, les seuls systèmes rigoureusement stigmatiques pour un domaine à trois dimensions sont équivalents à un miroir plan ou à une combinaison de miroirs plans.

- Une autre circonstance permet d'accepter des rayons qui s'écartent des conditions de Gauss dans un instrument d'optique : c'est le cas où l'image et l'objet sont confondus dans le plan d'une lentille mince ou d'un miroir sphérique. L'expérience montre en effet qu'un objet placé dans le plan d'un système mince voit son image confondue avec lui, même si les rayons définissant ce couple objet-image s'écartent notablement des conditions de Gauss (figure 3). Nous verrons que cette propriété peut être mise à profit pour, entre autres, augmenter le champ d'observation d'un instrument.

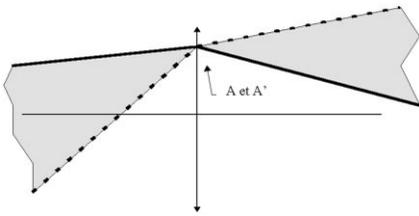


Figure 3 : L'objet (A) et l'image (A') sont confondus bien que les rayons définissant ces deux points ne traversent pas la lentille dans les conditions de Gauss.

Dans les montages d'optiques couramment mis en œuvre dans l'enseignement, il est souvent facile d'avoir des rayons peu inclinés sur l'axe (il suffit d'utiliser des objets pas trop étendus et pas trop proches de la première lentille) et plus difficile de les faire passer au voisinage du centre optique de chaque lentille ou miroir. C'est le non-respect de cette dernière condition qui engendre généralement la mauvaise qualité d'une image.

3. FORMATION DE L'IMAGE D'UN TROU À L'AIDE D'UNE LENTILLE MINCE

3.1. Construction de l'image géométrique

Le dessin de la figure 2 montre que la connaissance de la position du centre O de la lentille et de la position de ses foyers (F et F') permet de construire la marche de trois rayons particuliers issus de B :

- un rayon issu de B et parallèle à l'axe ressort en passant par le foyer image F',
- un rayon issu de B et passant par le foyer objet F ressort parallèlement à l'axe,
- un rayon issu de B et passant par le centre O de la lentille n'est pas dévié.

Il faut noter que la construction de deux de ces trois rayons suffit à déterminer l'image B' du point B et donc l'image A'B' de l'objet AB. Si la position des plans conjugués est connue (on sait où se trouve l'objet et où se trouve l'écran), alors la construction d'un seul rayon suffit. On utilise généralement dans ce cas le rayon passant par le centre optique de la lentille.

Il est important de signaler à ce niveau que les rayons servant à la construction géométrique de l'image sont purement théoriques. Ils peuvent très bien ne correspondre à aucun rayon réel, c'est-à-dire à aucun faisceau transportant réellement de l'énergie lumineuse. Pourtant, ce sont ces derniers qui sont responsables de la formation de l'image sur l'écran. Ce sont eux, en particulier, qui doivent traverser le système optique dans les conditions de Gauss.

Pour bien faire la distinction entre les rayons servant à la construction géométrique des images et ceux réellement responsables de la formation de celles-ci, on adoptera dorénavant la convention suivante au niveau des figures :

- les rayons servant à la construction géométrique seront représentés en traits fins pointillés,
- les rayons appartenant à un faisceau lumineux réel seront représentés en traits pleins. Les faisceaux de lumière correspondront aux zones ombrées.

3.2. Le problème de l'éclairage

Tout objet qui n'émet pas de la lumière par lui-même doit être éclairé pour que l'on puisse en faire une image visible. C'est bien sûr le cas des trous. L'éclairage utilisé doit être tel que :

- la source lumineuse soit puissante. Inutile d'essayer de projeter à une classe un spectre de lumière blanche avec une lampe de 10 W ! Pour une lampe à incandescence, il faut une ampoule «quartz iode» d'au moins 50 W équipée d'un miroir de renvoi (voir plus loin figure 9). Lorsque l'on utilise une lampe à décharge, on préférera un tube «haute pression» beaucoup plus lumineux qu'un tube «basse pression» que l'on réservera aux observations individuelles (travaux pratiques) ;
- l'objet soit éclairé le plus uniformément possible sur la partie dont on veut former l'image ;
- l'objet soit éclairé le plus intensément possible pour obtenir une image lumineuse. Cette condition n'est pas automatiquement remplie en utilisant une lampe puissante. Encore faut-il que la plus grande partie de l'énergie lumineuse émise traverse le trou !
- l'éclairage soit compatible avec le système optique utilisé en aval de l'objet. En particulier, dans le cas d'un trou, les rayons lumineux en provenance de la source lumineuse traverseront l'objet sans déviation². La source lumineuse jouera donc un rôle important pour que les rayons traversant le système optique de projection soient paraxiaux. L'incompatibilité de l'éclairage avec le système optique est la source de la majorité des échecs (images floues et peu lumineuses).

3.2.1. Éclairage sans condenseur

La première idée qui vient à l'esprit pour éclairer un trou dont on veut réaliser l'image sur un écran est d'utiliser le montage de la figure 4. Le trou, la lentille et

2. En toute rigueur, une petite proportion de l'énergie lumineuse se retrouvera dans des rayons déviés du fait des phénomènes de diffraction. Étant donné la très faible énergie qu'ils transportent, on ne tient pas compte de leur effet.

l'écran sont disposés selon les lois de l'optique géométrique (le plan de l'écran et celui contenant le trou sont conjugués par la lentille). Le trou est éclairé à l'aide d'une simple ampoule à incandescence. On utilise généralement une ampoule dite «quartz-iode» (QI) en raison de sa luminosité et de la petite taille de son filament. On évoquera plus loin le problème posé par l'utilisation des tubes à décharge.

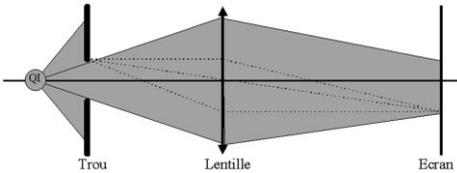


Figure 4

totale de la lentille. Celle-ci n'est donc pas utilisée dans les conditions de Gauss. Il en résulte une image plus ou moins floue (halo), souvent irisée et présentant, lorsque le trou est étendu, une forte déformation sur les bords (aberration de sphéricité).

Il est important de rappeler ici que, pour les projections utilisées dans l'enseignement, les conditions de Gauss ne sont le plus souvent pas respectées parce que les rayons passent loin du centre de la lentille. Il est très rare que l'inclinaison soit en cause.

- Le champ objet, c'est-à-dire la partie de l'objet dont l'image sera visible sur l'écran, peut se trouver plus petit que la partie éclairée, car des rayons passant par les bords de l'objet peuvent aussi passer à l'extérieur de la lentille (cf. § 4.1).
- Seule une petite partie de l'énergie lumineuse émise par la lampe traverse le système et se retrouve donc sur l'écran. Plus l'ampoule sera éloignée du trou et moins l'image sera lumineuse.

Pour utiliser plus correctement la lentille, on peut alors essayer de réduire la surface éclairée de celle-ci en diminuant l'ouverture du faisceau lumineux traversant l'ensemble du système. Pour une dimension de trou donnée, on peut y parvenir soit en reculant la source de lumière, soit en plaçant un diaphragme devant la lentille. Dans les deux cas, la qualité géométrique de l'image est améliorée mais sa luminosité est fortement diminuée. Ainsi, l'utilisation de ce montage ne permet pas d'obtenir une image à la fois lumineuse et géométriquement correcte. Pour y parvenir, on utilise un condenseur.

En supposant que l'ampoule émette une lumière d'égale intensité dans toutes les directions, ce système permet d'éclairer quasi-uniformément le trou. Il présente, en revanche, de graves inconvénients :

- Le faisceau lumineux issu de la lampe et qui traverse le système optique (partie ombrée de la figure 4) «éclaire»

3.2.2. Utilisation d'un condenseur

Un condenseur est un système optique de grande surface et fortement convergent. Son rôle est triple :

- capter un maximum d'énergie lumineuse en provenance de la source afin d'obtenir le plus de lumière possible dans l'image, surtout en augmentant la surface du champ objet,
- éclairer le plus uniformément possible l'ensemble de la surface du trou,
- assurer une utilisation dans les conditions de Gauss de la lentille de projection.

Dans ce texte, un condenseur sera schématisé par un ensemble de deux lentilles accolées.

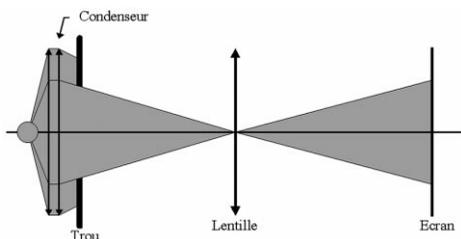


Figure 5

Son utilisation correspond au schéma de la figure 5 pour lequel on a supposé la source ponctuelle :

- Les rayons issus de la source sont «rabattus» vers l'axe optique par le condenseur de manière à converger au centre de la lentille. Celle-ci est ainsi utilisée dans les conditions de Gauss et ne limite plus le champ objet.

- Si le condenseur est de grande surface et pas trop éloigné de la source, il

capte une grande partie de l'énergie lumineuse émise, permettant aux rayons qui passent sur toute la surface d'un grand trou de traverser aussi la lentille.

- Pour être éclairé en totalité, le trou ne doit pas avoir une ouverture plus grande que la surface du condenseur et être placé au voisinage immédiat de celui-ci.

Remarque : Il est important de comprendre ici que le condenseur n'est pas une lentille de projection. Son rôle n'est pas de former une image de bonne qualité d'un objet quelconque mais de modifier la forme d'un faisceau de lumière. Il ne faut donc pas s'étonner qu'il ne soit pas utilisé dans les conditions de Gauss ni que sa forme s'éloigne parfois beaucoup des formes habituellement étudiées dans les traités d'optique (figure 7).

Les condenseurs se présentent sous des formes variées suivant les utilisations. Les plus courants sont réalisés :

- soit en accolant deux lentilles convergentes, généralement plan-convexes, dans une même monture (d'où la schématisation adoptée) : ce type de condenseurs se rencontre fréquemment dans les collections d'optique des établissements d'enseignement (figure 6),
- soit avec une seule lentille mais qui s'éloigne généralement fortement du modèle de la lentille mince (figure 7). On trouve ces condenseurs dans les projecteurs de diapositives ou sur les «lanternes de projection»,
- soit en utilisant une «lentille de Fresnel». L'exemple typique d'une telle utilisation est le rétroprojecteur pour lequel la «glace» sur laquelle on pose le transparent constitue le condenseur. On peut facilement s'en convaincre en la démontant et en observant la face normalement dirigée vers l'intérieur de l'appareil.

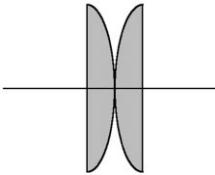


Figure 6

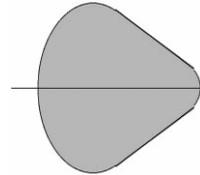


Figure 7

3.2.3. Position du condenseur

Pour que le trou soit éclairé en totalité, il faut que le faisceau de lumière le frappant ait une section plus grande que la plus grande dimension de l'ouverture. En examinant le dessin de la figure 5, on se rend compte facilement que le faisceau est le plus large au niveau du condenseur. C'est donc là qu'il faut positionner le trou. On retiendra donc que :

Le trou et le condenseur doivent être accolés.

Remarque : Le condenseur n'étant pas une lentille de projection éclairée dans les conditions de Gauss, le faisceau lumineux qu'il engendre n'est généralement pas de très bonne qualité sur sa périphérie. En particulier, il présente souvent des phénomènes d'irisation. Il est donc important que le trou diaphragme franchement ce faisceau de manière à être éclairé uniformément sur toute sa surface.

3.2.4. Position de la source de lumière

Considérons le système formé par le condenseur et la source lumineuse (le filament de l'ampoule ou la partie lumineuse du tube à décharge). La source n'étant jamais

rigoureusement ponctuelle, il est intéressant de visualiser le faisceau de lumière en amont et en aval du condenseur (figure 8).

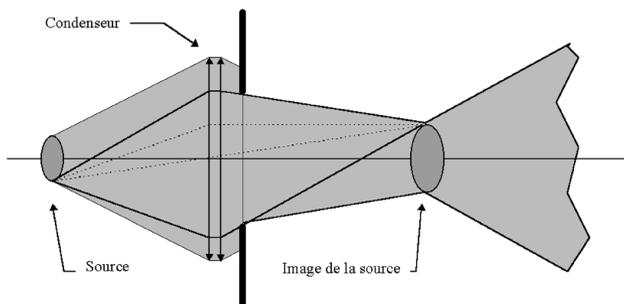


Figure 8

La figure 8 montre clairement que la partie la plus étroite du faisceau correspond à l'image de la source par le condenseur³. C'est donc à cet endroit que doit se situer la lentille pour être éclairée de manière optimale. On retiendra donc :

Le centre de la source lumineuse et le centre de la lentille doivent être conjugués par le condenseur.

3.2.5. Utilisation d'une source de lumière étendue

Le schéma de la figure 8 montre que la lentille sera d'autant mieux utilisée que la source sera plus ponctuelle (plus la source sera ponctuelle, plus son image le sera). C'est la raison pour laquelle on cherche souvent dans les montages d'optique en lumière blanche à utiliser des ampoules à incandescence dont le filament, pour une puissance donnée, est le plus petit possible (ampoule «quartz iode»).

Cette condition n'est malheureusement pas toujours possible à respecter. C'est le cas en particulier des tubes à décharge dont la partie lumineuse correspond toujours à un cylindre dont le diamètre peut être petit mais dont la hauteur ne l'est jamais. Dans ce cas, l'image de la source par le condenseur restera toujours la zone de l'espace où le faisceau sera le plus étroit, mais la taille de cette image ne sera plus compatible avec un éclairage de la lentille dans les conditions de Gauss. Il est alors nécessaire de limiter

3. Pour construire l'image de la source par le condenseur, on suppose que celui-ci se comporte comme une lentille mince. Ce n'est évidemment qu'une approximation grossière, l'image de la source obtenue dans ces conditions étant généralement de très mauvaise qualité. Par contre, la conséquence sur la localisation de la section minimale du faisceau reste correcte.

la dimension la plus grande de cette image en plaçant un diaphragme contre la lentille. On peut aussi limiter directement la zone «éclairante» du tube à décharge en plaçant un cache convenable dessus. On retiendra donc que :

Dans le cas d'une source de lumière étendue, la source et la lentille doivent toujours être conjuguées par le condenseur, mais la plus grande dimension de l'image de la source doit être limitée par un dispositif annexe.

Remarque : On comprend ainsi pourquoi il ne sert à rien de chercher à utiliser des ampoules à incandescence de forte puissance mais dont le filament est très étendu et donc la luminance⁴ médiocre (genre ampoule de «lampadaire halogène»). Pour obtenir une image de bonne qualité, il faudrait en effet nécessairement limiter la taille de l'image du filament et donc la puissance lumineuse recueillie sur l'écran.

3.3. Réglage du système d'éclairage

3.3.1. Procédure de réglage du montage complet

Pour mettre en œuvre correctement l'ensemble des réglages définis précédemment, on peut proposer la procédure systématique suivante :

1 - Positionner tous les éléments (trous, lentilles, lampe, condenseur, etc.) à la même hauteur. Pour cela, il est pratique d'en prendre un et un seul en référence et d'aligner les autres dessus.

2 - Disposer sur le banc ou la table d'expérience les seuls éléments nécessaires à la formation de l'image conformément au schéma du montage de la figure 5. Les aligner. On ne placera les éléments complémentaires tels que réseau, prisme à vision direct, lames cristallines, filtres, etc., qu'après avoir obtenu une image parfaitement nette du trou.

3 - Placer de manière définitive :

– le trou et l'écran. On veillera bien sur à ce que la distance trou - écran soit supérieure à quatre fois la distance focale de la lentille de projection utilisée (voir § 2.1.) ;

– le condenseur contre le trou.

4 - Allumer la source de lumière. Positionner la lentille de projection de manière à obtenir l'image la moins mauvaise possible. Dans le cas d'utilisation d'une source de

4. La luminance d'un pinceau émis par une source est la puissance rayonnée par unité d'angle solide du pinceau émis et par unité de surface de cette source, divisée par le cosinus de l'angle d'émission du pinceau. La luminance dépend généralement de la direction d'émission du pinceau.

lumière étendue (tube à décharge), on disposera contre la lentille et centré sur son axe un diaphragme circulaire.

5 - Régler la position de la source de lumière de manière à en faire l'image par le condenseur au centre de la lentille de projection. Cette opération doit être faite sans bouger le condenseur mais en déplaçant la source. Pour réaliser ce réglage, il est commode :

- de disposer un papier blanc sur la lentille pour visualiser l'image de la source de lumière (le filament de l'ampoule ou le tube de la lampe à décharge) ;
- dans le cas d'un trou de dimension réglable (fente ou diaphragme à iris), d'ouvrir au maximum celui-ci pour avoir une image lumineuse sur la lentille.

Dans les «lanternes de projection», la source et le condenseur sont intégrés dans le même boîtier. Pour régler la position de la source (c'est-à-dire de l'ampoule à incandescence dans ce cas) par rapport au condenseur, on déplace généralement une «tirette» située à l'arrière du boîtier et qui est solidaire de la source (figure 9). Lorsque le réglage est terminé, il ne faut pas oublier de fixer cette tirette (vis de blocage). On ne doit pas déplacer le boîtier de la lanterne, le condenseur devant rester fixe, contre le trou.

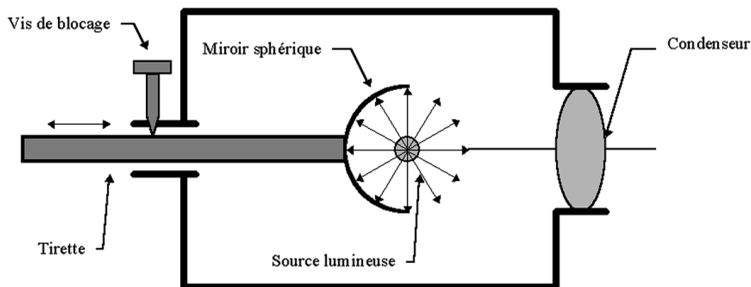


Figure 9 : Schéma d'une lanterne de projection ; le miroir sphérique permet de renvoyer vers le condenseur l'énergie lumineuse émise par la source vers l'arrière. Pour que la source vue par le condenseur reste unique, le filament est placé au centre du miroir sphérique. Il est ainsi confondu avec son image dans ce miroir.

6 - Retoucher la position de la lentille de projection pour obtenir une image absolument nette. Si le point 4 a été correctement fait, le déplacement correspondant doit être faible. Il n'est alors pas nécessaire de reprendre le point 5.

3.3.2. Mise en évidence des conséquences d'un mauvais réglage du système d'éclairage

Il peut être intéressant de réaliser un mauvais réglage du système d'éclairage pour montrer aux élèves certains effets des aberrations d'une lentille. Pour cela, il est commode d'utiliser comme objet une grille métallique formée de fils rectilignes orthogonaux :

- Si on règle la position de la source lumineuse de manière à faire converger le faisceau en avant de la lentille, on obtient une image de la grille déformée telle que celle de la figure 10. Cette déformation est appelée «distorsion en barillet» car elle ressemble à une barrique.
- Si on règle la position de la source lumineuse de manière à faire converger le faisceau en arrière de la lentille, on obtient une image de la grille déformée telle que celle de la figure 11. Cette déformation est appelée «distorsion en coussinet» car l'image obtenue est semblable à celle que l'on observerait sur un coussin recouvert d'un tissu à carreaux.

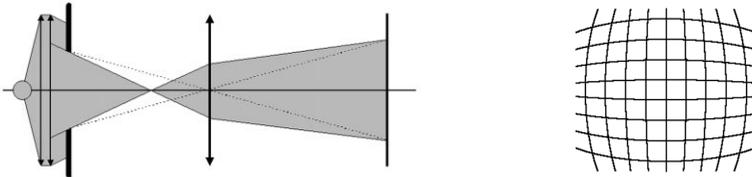


Figure 10 : Distorsion en barillet due à la convergence du faisceau en avant de la lentille de projection.

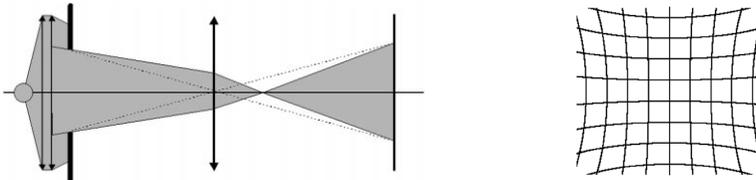


Figure 11 : Distorsion en coussinet due à la convergence du faisceau en arrière de la lentille de projection.

Remarque : Si l'on souhaite effectivement montrer ces effets à une classe, il convient de prendre les précautions suivantes pour qu'ils soient facilement identifiables :

- Il faut choisir une lentille de «mauvaise qualité», c'est-à-dire présentant de fortes aberrations géométriques. On choisira par exemple une lentille dont une face au moins présente un fort bombé (petit rayon de courbure par rapport à ses dimensions). Contrairement à ce qu'il faut faire normalement, on orientera cette face bombée du côté où les rayons sont les plus inclinés, c'est-à-dire généralement du côté de l'objet.

– On forcera le faisceau lumineux à converger en un point de l'axe en plaçant à ce niveau un diaphragme.

3.4. Positionnement des dispositifs complémentaires

Former l'image d'un trou est rarement le seul but recherché pour un montage d'optique. C'est plus généralement la première étape pour aller plus loin :

- réalisation d'un spectre à l'aide d'un prisme ou d'un réseau,
- observation d'une figure de diffraction à l'infini,
- observation d'un phénomène de diffusion de la lumière,
- etc.

Toutes ces manipulations conduisent à placer sur le faisceau lumineux un dispositif complémentaire (prisme, réseau, lame cristalline, etc.) qui produira l'effet désiré. La question est alors de savoir où le placer pour obtenir un bon résultat.

Les contraintes sont les suivantes :

- Dans la pratique, il suffit de veiller à ne pas limiter transversalement le faisceau de lumière entre le trou et l'écran. Les diamètres des montures des éléments complémentaires étant quelquefois assez faibles, il faut donc choisir de placer ceux-ci dans une zone où le faisceau lumineux a une section la plus faible possible. L'examen de la figure 5 montre à l'évidence que ces dispositifs doivent être placés au voisinage immédiat de la lentille de projection.
- Pour certains dispositifs (prisme, réseau, lame uniaxe, etc.), l'étude théorique est faite dans le cas d'un éclairage en lumière parallèle et avec une observation «à l'infini». Cette configuration nécessite normalement un système composé d'un trou source (source ponctuelle) et deux lentilles de projection (figure 12).

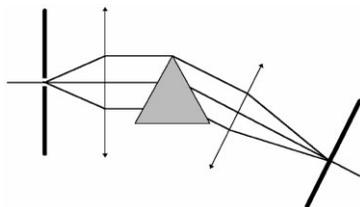


Figure 12

Ce schéma que l'on retrouve dans tous les traités d'optique géométrique correspond à un montage «idéal» effectivement réalisé dans des appareils d'optique tels que les goniomètres ou les spectrographes à prisme utilisés en travaux pratiques ou dans les laboratoires de recherche (à ceci près que le trou source est remplacé par une fente source). Pour un montage en salle de cours,

celui-ci convient mal pour au moins deux raisons :

- D'une part, il est très difficile d'éclairer les deux lentilles à la fois dans les conditions de Gauss. Dans la pratique, si on règle la position de la source pour que le faisceau lumineux converge au centre de la première lentille, la deuxième lentille est mal éclairée et nécessite d'être équipée d'un diaphragme pour fournir une image correcte. Le montage perd donc une grande partie de sa luminosité (ce qui n'est pas obligatoirement un défaut dans un appareil d'observation individuel).
- D'autre part, la mise au point d'un tel montage est relativement délicate. Il est en effet nécessaire non seulement de positionner deux lentilles pour obtenir une image nette, mais aussi de s'assurer du parallélisme du faisceau au niveau du prisme et de la bonne direction de l'arête de ce dernier. Ces réglages déjà minutieux sur un goniomètre (réglage de la lunette, du collimateur et de l'horizontalité du plateau porte prisme) deviennent très difficiles à réaliser correctement sur une paillasse de cours.

Pour pallier ces inconvénients, on peut réaliser un montage à une seule lentille en partant des constatations suivantes :

- La distance séparant les deux lentilles de la figure 12 ne joue aucun rôle dans l'analyse théorique du montage. On peut réduire cette distance autant que l'on veut jusqu'à accoler le système formé par les deux lentilles et le prisme.
- On ne fait que rajouter quelques aberrations (de l'astigmatisme essentiellement) si on place le prisme contre les deux lentilles accolées au lieu de le laisser entre celles-ci. Dans un montage de cours, on peut alors remplacer cet ensemble de deux lentilles par une seule.

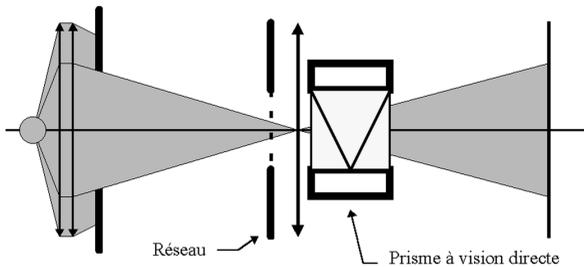


Figure 13 : Utilisation d'un prisme à vision direct ou d'un réseau par transmission.

On arrive ainsi à un schéma comme celui de la figure 13. Ce dessin montre ainsi comment utiliser pratiquement un réseau ou un prisme (ici à vision directe) pour un montage simple de cours.

Plus généralement, on pourra retenir que :

Pour utiliser un dispositif complémentaire, on doit le placer contre la lentille de projection. Dans ces conditions on assure un champ objet et une luminosité maximum.

4. FORMATION DE L'IMAGE D'UN TROU À L'AIDE D'UN SYSTÈME À PLUSIEURS LENTILLES

Lorsque l'on veut modéliser un instrument d'optique sur une paillasse de cours, on ne peut pas toujours se contenter d'un système à une seule lentille de projection. Nous allons voir ici, à l'occasion de l'étude du microscope réduit, quels problèmes se posent à l'utilisation d'un système à plusieurs lentilles.

4.1. Analyse d'un système simple à deux lentilles : le microscope réduit

Supposons que nous voulions réaliser le montage correspondant au «microscope réduit». Le schéma théorique de ce montage est rappelé sur la figure 14. L'objectif réalise une première image agrandie de l'objet dite «image intermédiaire». Cette image intermédiaire est observée «à la loupe» par l'oculaire.

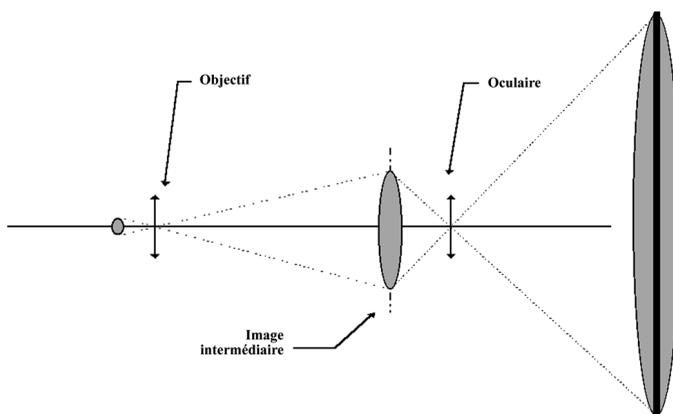


Figure 14

Remarque : Pour représenter fidèlement un microscope réel, l'image fournie par l'oculaire devrait être rejetée à l'infini de manière à être observée sans accommodation par un œil normal. On se contente bien souvent d'une image à distance finie qui peut être facilement observée par la classe entière sur un écran. C'est ce qui a été fait sur la figure 14.

On a représenté sur la figure 15 le montage pratique incluant la source de lumière et le condenseur. Sur ce schéma, on a réglé la position de la source pour éclairer correctement l'objectif. Ce dessin montre immédiatement le défaut du montage :

– Si la source est positionnée de manière à engendrer un faisceau de section minimale au niveau de l'objectif, l'oculaire est alors éclairé sur toute sa surface. Il ne peut donc pas fonctionner dans de bonnes conditions. Si la source est réglée de manière à éclairer correctement l'oculaire, c'est alors l'objectif qui fonctionne dans de mauvaises conditions.

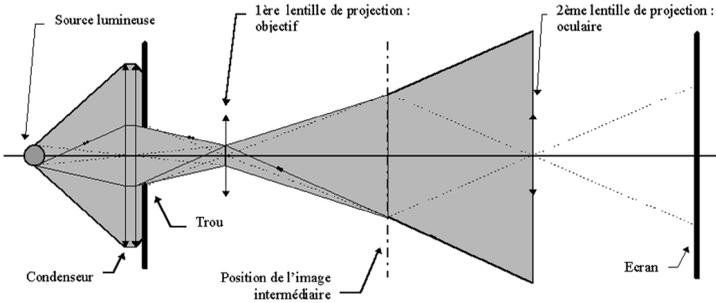


Figure 15

Lorsque l'on réalise le montage, on obtient effectivement sur l'écran une image déformée et souvent irisée. Mais cette image présente également un autre défaut important : on n'observe sur l'écran qu'une toute petite partie du trou (figure 16, image centrale). Autrement dit, le champ d'observation de l'instrument est très faible. Pour comprendre ce phénomène, examinons le schéma de la figure 17.

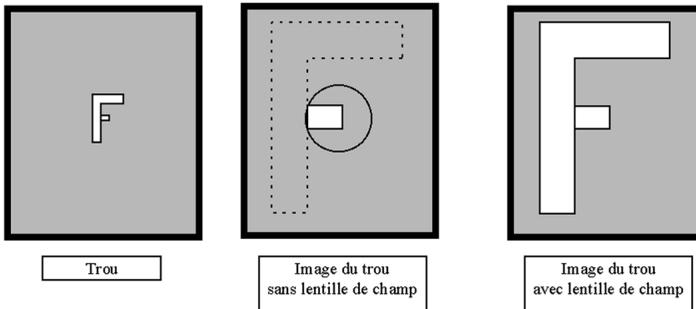


Figure 16

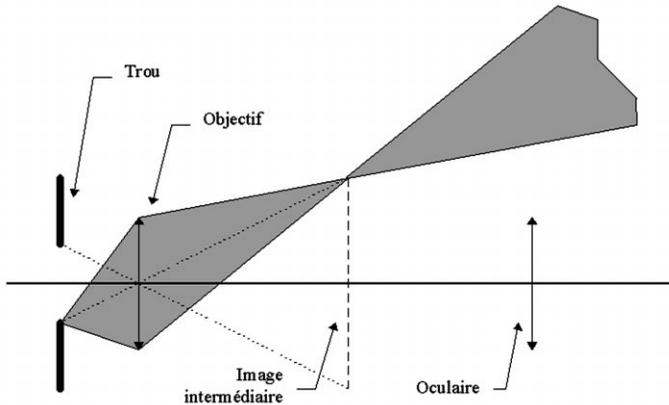


Figure 17

On a représenté en gris l'ensemble des rayons lumineux pouvant⁵ traverser la première lentille de projection, c'est-à-dire l'objectif, en provenant du bord du trou. La figure montre clairement qu'aucun de ces rayons ne traverse l'oculaire. Autrement dit, l'image de cette partie du trou ne peut pas être visible sur l'écran. On comprend facilement que pour être visible, un point du trou doit appartenir à une zone suffisamment rapprochée de l'axe du système. C'est cette zone que l'on a représentée par un cercle sur l'image centrale de la figure 16.

Remarque : On devrait en fait distinguer trois zones sur le trou :

- Les points totalement invisibles sur l'écran. Ce sont ceux pour lesquels aucun rayon traversant l'objectif ne traverse l'oculaire.
- Les points parfaitement visibles sur l'écran. Ce sont ceux pour lesquels tous les rayons traversant l'objectif traversent l'oculaire.
- Les points visibles sur l'écran mais pour lesquels une partie seulement des rayons traversant l'objectif traversent aussi l'oculaire. Ces points forment une zone de pénombre située entre la première et la seconde.

La détermination précise de ces trois zones dépend du système d'éclairage utilisé.

Pour éliminer ces deux défauts, on va introduire une troisième lentille au niveau de l'image intermédiaire : la lentille de champ.

5. L'ensemble des rayons représentés sur la figure 17 n'existe pas obligatoirement dans la réalité. Cela dépend du système d'éclairage qui n'est pas représenté ici. Mais on peut affirmer que les rayons issus du bord du trou appartiennent obligatoirement au faisceau indiqué. Si aucune partie de ce faisceau ne traverse l'oculaire, alors le bord ne sera pas visible.

4.2. Introduction d'une lentille de champ

Reprenons le schéma du microscope réduit et ajoutons une lentille convergente dans le plan de l'image intermédiaire (figure 18).

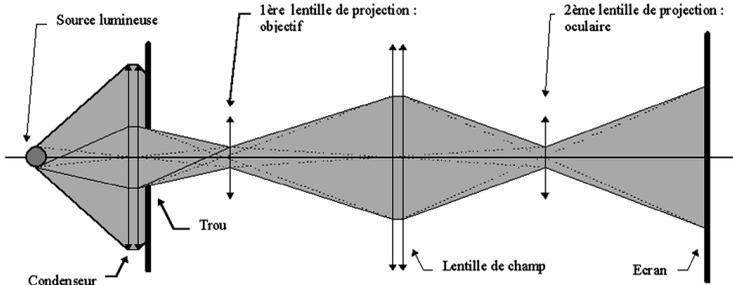


Figure 18 : Utilisation d'une lentille de champ avec le «microscope réduit».

L'effet de cette lentille va être double :

- Elle va permettre de «rabattre» les rayons lumineux vers l'axe du système. En la choisissant convenablement, on peut engendrer un faisceau de section minimale au niveau de l'oculaire et donc l'éclairer dans les conditions de Gauss.
- L'examen de la figure 18 montre que, cette fois-ci, tous les rayons issus du trou traversent l'oculaire. Le trou est totalement visible. Il faut néanmoins noter que pour que cette condition soit remplie, le diamètre de la lentille de champ doit être plus grand que la plus grande dimension de l'image intermédiaire.
- Notons enfin que cette lentille ne change rien aux caractéristiques de l'image intermédiaire parce qu'elle est positionnée justement sur cette image. La présence de la lentille de champ ne modifie donc pas la position de l'oculaire ni celle de l'écran. L'image intermédiaire est sa propre conjuguée par la lentille de champ, et cela bien que les rayons définissant cette image ne traversent pas la lentille de champ dans les conditions de Gauss (voir remarque du § 2.2.).

L'introduction de la lentille dans le montage est spectaculaire. Non seulement l'image est de meilleure qualité mais le champ de l'appareil est fortement augmenté (figure 16, image de droite).

4.3. Critères de choix de la lentille de champ

La lentille de champ doit satisfaire à deux critères principaux :

- Elle doit avoir une taille suffisante pour «intercepter» toute l'image intermédiaire. Ses dimensions conditionnent directement la largeur du champ d'observation de l'instrument complet.

– Elle doit faire en sorte que le faisceau lumineux ait une section minimale au niveau de l'oculaire. Autrement dit, on doit retrouver au centre de l'oculaire l'image de la source de lumière. Puisque cette image est également présente au centre de l'objectif, on en conclut que l'objectif et l'oculaire doivent être conjugués par la lentille de champ.

On peut remarquer que les caractéristiques de la lentille de champ sont semblables à celles du condenseur. Ici aussi, la lentille de champ n'est pas une lentille de projection (voir remarque du § 3.2.2.). Son rôle, comme celui du condenseur, est de rediriger correctement le faisceau lumineux sans modifier les caractéristiques géométriques du montage. Pour cela, elle est placée sur l'image intermédiaire, comme le condenseur est placé contre le trou.

4.4. Exemple de mise en œuvre

Pour illustrer ce qui vient d'être dit, cherchons comment réaliser un montage de cours du type «microscope réduit» en partant des contraintes suivantes :

- L'objet est un trou en forme de F comme celui de la figure 16 (il est souvent intéressant d'utiliser des objets permettant de voir facilement si l'image correspondante est renversée ou non). La hauteur de cette lettre est de 2 cm.
- On dispose de lentilles convergentes de focale $f' = 12, 20$ ou 25 cm.
- Les seules lentilles convergentes de grand diamètre dont on dispose pour réaliser une lentille de champ ont une focale de 20 cm ou 25 cm. Leur diamètre est 10 cm.
- Le montage devra tenir en entier sur un banc d'optique de 2 m de longueur.

1 - On commence par choisir l'objectif. Celui-ci devant avoir un grandissement transversal le plus grand possible (il s'agit de modéliser un microscope), on choisit la lentille de plus petite focale : $f'_1 = 12$ cm.

2 - Il faut ensuite se préoccuper immédiatement du diamètre de la lentille de champ. Celui-ci doit être plus grand que la grande dimension de l'image intermédiaire. Le diamètre des lentilles étant au maximum 10 cm choisissons par exemple une image intermédiaire de 9 cm. L'objectif doit donc avoir un grandissement transversal $\gamma = -9/2 = -4,5$.

Les formules de Newton permettent alors de déterminer la distance d' entre l'image intermédiaire et le foyer image de l'objectif et la distance d entre le trou et le foyer objet.

$$d' = \gamma f' = 54 \text{ cm} \quad d = -f/\gamma = 2,67 \text{ cm}$$

Finalement, l'objectif et l'image intermédiaire sont respectivement à 2,67 cm + 12 cm = 14,67 cm et à 2,67 cm + 24 cm + 54 cm = 80,67 cm du trou.

3 - Choisissons maintenant la lentille de champ. Si l'on veut réaliser le montage le plus compact possible (il doit tenir sur le banc), il faut choisir la lentille de plus courte focale : $f'_2 = 20$ cm. On la positionne sur l'image intermédiaire, c'est-à-dire à $80,67$ cm - $14,67$ cm = 66 cm de l'objectif. L'oculaire, qui doit être conjugué de l'objectif par la lentille de champ, doit être à :

$$\frac{1}{\frac{1}{20 \text{ cm}} - \frac{1}{66 \text{ cm}}} = \frac{1320 \text{ cm}}{86} = 28,70 \text{ cm}$$

de la lentille de champ, c'est-à-dire à $80,67$ cm + $28,70$ cm = $109,37$ cm du trou.

4 - Il ne reste plus qu'à choisir l'oculaire. Dans l'esprit du montage, on cherchera à obtenir sur l'écran une image la plus grande possible, et pour cela à positionner l'écran le plus loin possible, c'est-à-dire vers l'extrémité du banc. Cherchons donc quel devrait être la focale f'_3 de l'oculaire si l'écran était à 2 m du trou.

$$f'_3 = \frac{1}{\frac{1}{200 \text{ cm} - 109,37 \text{ cm}} + \frac{1}{28,70 \text{ cm}}} = 21,80 \text{ cm}$$

On choisit donc une lentille convergente de 20 cm de focale pour réaliser l'oculaire.

5 - Finalement, on peut déterminer la distance entre l'écran et l'oculaire :

$$\frac{1}{\frac{1}{20 \text{ cm}} - \frac{1}{28,70 \text{ cm}}} = 65,98 \text{ cm}$$

ce qui place l'écran à $109,37$ cm + $65,98$ cm = $175,35$ cm du trou.

La disposition des différents éléments est résumée sur le schéma de la figure 19 pour lequel on n'a pas représenté le dispositif d'éclairage (source + condenseur).

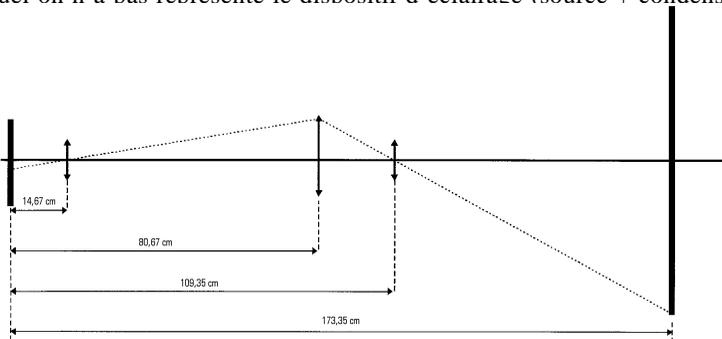


Figure 19

5. UTILISATION D'UN APPAREIL DE PRISE DE VUE

Lorsque les phénomènes optiques sont très peu lumineux, il peut être intéressant de les filmer à l'aide d'une caméra vidéo pour que la classe les observe sur un écran de télévision. Supposons par exemple que l'on veuille présenter la figure de diffraction de Fraunhofer (diffraction à l'infini) d'une ouverture rectangulaire allongée (fente).

Le montage théorique suppose que la fente diffractante soit éclairée par un faisceau de lumière parallèle et que l'observation se fasse dans le plan focal d'une lentille convergente (observation «à l'infini»). Dans la pratique, on considérera la fente diffractante comme un «dispositif complémentaire» que l'on placera contre la lentille de projection (voir § 3.4.).

Le montage est ainsi celui représenté sur la figure 20 : on réalise l'image de la fente source sur l'écran à l'aide de la lentille de projection. On place ensuite la fente diffractante contre cette lentille. Si la fente source est suffisamment fine, la figure observée dans ces conditions est alors très proche de la figure théorique. Malheureusement, pour pouvoir observer sur l'écran des franges de diffraction à l'œil nu, il faut utiliser une fente diffractante tellement étroite que très peu de lumière traverse le système : la figure de diffraction n'est pas suffisamment lumineuse pour être présentée telle quelle à une classe.

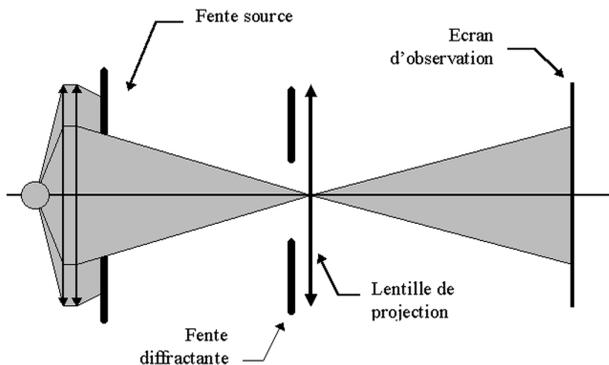


Figure 20 : Le plan de la figure est celui contenant le grand côté de chacune des deux fentes.

Plusieurs solutions s'offrent au professeur pour présenter le phénomène à ses élèves :

- La plus courante consiste à utiliser un LASER. On utilise alors la propriété de ces sources de générer un faisceau de lumière parallèle puissant. L'avantage est évidemment l'extrême simplicité de mise en œuvre de la manipulation : il suffit de disposer une fente diffractante sur le faisceau et d'observer le phénomène sur un écran éloigné.

L'inconvénient d'un tel montage est double. D'une part, il est généralement impossible d'étudier l'influence de la longueur d'onde sur la figure d'interférence (il faudrait disposer de plusieurs LASERS de «couleurs» différentes). D'autre part, en utilisant un LASER, on peut laisser penser aux élèves que la diffraction est un phénomène marginal lié à cette source très particulière alors, qu'au contraire, la diffraction est un phénomène très général qui dépasse largement le domaine de l'optique.

Accessoirement, l'utilisation d'une source LASER ne permet pas d'explorer sur la figure de diffraction l'influence des orientations respectives de la fente source et de la fente diffractante (il n'y a plus de fente source !). L'interrogation des élèves de classes préparatoires sur ce sujet montre que les idées correspondantes ne sont pas toujours très claires !

- Une autre solution consiste à filmer la figure de diffraction à l'aide d'une caméra vidéo. La très bonne sensibilité de ces appareils (caméscope du commerce) permet de présenter à une classe une image parfaitement visible. Reste à savoir où placer cette caméra et comment l'utiliser pour obtenir les meilleurs résultats.

- La solution qui apparaît la plus simple consiste à filmer directement la figure de diffraction sur un écran par réflexion (écran blanc) (figure 21).

Cette solution est difficile à mettre en œuvre car, très généralement, le coefficient de réflexion des écrans est trop faible. L'énergie lumineuse reçue par la caméra est alors si petite qu'il faut opérer dans un noir absolu si l'on veut distinguer quelque chose (et à condition que la sensibilité de la caméra soit suffisante). Ces conditions sont généralement incompatibles avec une salle de classe.

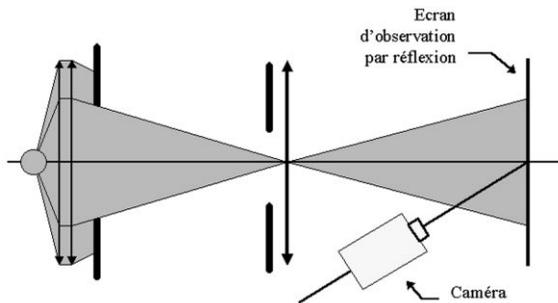


Figure 21

- Une meilleure solution consiste à utiliser un écran par transmission (écran diffusant). La caméra est maintenant placée dans l'axe du montage, derrière l'écran (figure 22). L'énergie lumineuse transmise est alors beaucoup plus importante que l'énergie

lumineuse réfléchi par un écran blanc. La surface dépolie de l'écran permet de rediriger vers la caméra une partie des rayons lumineux transmis.

Ce type de montage est tout à fait satisfaisant pour observer les figures de diffractions (fente, bifentes d'Young, etc.) lorsque la source lumineuse est suffisamment puissante (lampe blanche type QI, lampe spectrale à haute pression).

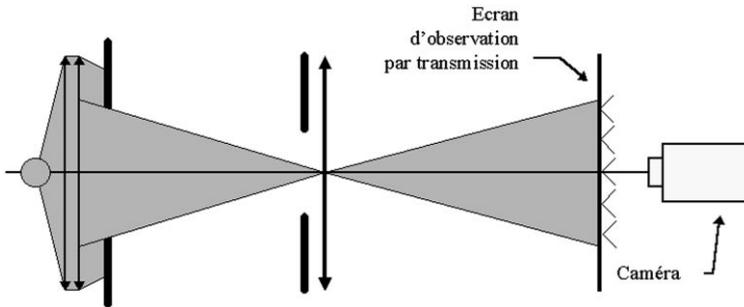


Figure 22

– Si la source est peu lumineuse, les résultats dépendent beaucoup de la qualité de l'écran diffusant utilisé et de la sensibilité de la caméra. En cas d'échec à ce niveau, on peut encore augmenter la quantité de lumière reçue par la caméra en utilisant un moyen ultime : on enlève l'écran ! Pour garder un champ d'observation suffisant, il faut disposer à la place de l'écran une lentille de champ qui cette fois redirigera tous les rayons lumineux reçus vers la caméra. Cette lentille devra donc avoir un diamètre suffisant pour englober la totalité de l'image à observer. Le choix de ses caractéristiques se fera comme au § 4.4., la caméra jouant ici le rôle de l'oculaire. La mise au point de la caméra doit bien entendu se faire sur l'image intermédiaire, c'est-à-dire sur le plan de la lentille de champ.

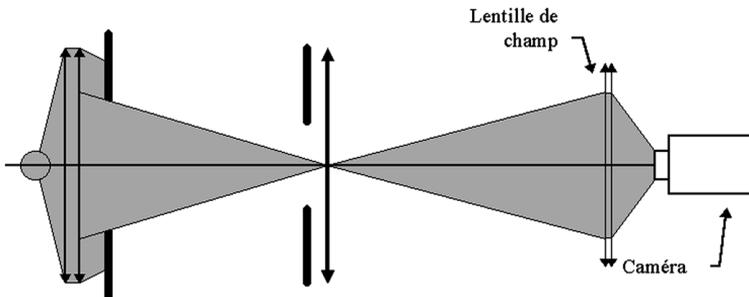


Figure 23

Il faut être très prudent en utilisant ce montage. Il y a en effet un risque non négligeable de «brûler» le capteur CCD de la caméra si on envoie par mégarde un faisceau lumineux trop énergétique (en enlevant brusquement la fente diffractante par exemple). D'autre part, il peut être utile de déconnecter le dispositif «autofocus» pour bloquer la mise au point qui peut autrement devenir instable.

Pour terminer ce paragraphe sur l'utilisation d'une caméra vidéo, il faut indiquer quelques défauts liés à ses caractéristiques :

- Les ensembles (caméscope + télévision) disponibles dans le commerce ne sont pas très performants lorsque qu'il s'agit de filmer des phénomènes avec beaucoup de couleurs différentes. Ainsi, si l'on essaie de projeter un spectre de lumière blanche sur un écran de télévision avec un montage du type de celui de la figure 22 (en remplaçant la fente diffractante par un prisme à vision directe), on obtient quelque chose qui ressemble plus à un drapeau tricolore (rouge - vert - bleu) qu'à un spectre !
- Les capteurs CCD transcrivent mal les brusques variations spatiales de luminosité. Si une série de pixels est fortement éclairée, les pixels voisins seront excités même s'ils reçoivent peu de lumière (phénomène de débordement). Pour comprendre les conséquences pratiques de ce défaut, considérons la figure de diffraction de Fraunhofer correspond une ouverture rectangulaire éclairée en lumière blanche.

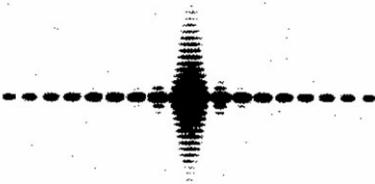


Figure 24 : Figure de diffraction à l'infini d'une ouverture rectangulaire filmée avec une caméra vidéo. Le centre de la figure est ici saturé et ne permet pas l'observation des détails correspondants.

mais on ne distingue plus les franges centrales (figure 24).

Si l'on veut montrer la frange centrale (très lumineuse) et les franges immédiatement voisines, il faut diminuer la sensibilité de la caméra pour que les pixels correspondant au centre de la figure ne «débordent pas» sur les pixels voisins. La sensibilité globale de la caméra est alors trop faible pour reproduire les franges éloignées.

Si on veut montrer celles-ci (par exemple pour bien voir l'influence de la longueur d'onde), il faut alors sacrifier le centre de la figure en augmentant la sensibilité. Les phénomènes colorés apparaissent alors clairement,

Cet exemple montre par ailleurs qu'il est important de pouvoir disposer d'une caméra dont on puisse régler manuellement la sensibilité (vitesse d'obturation et/ou diaphragme d'ouverture).

6. CONCLUSION

Pour terminer, voici quelques extraits de rapports de jury de concours concernant la formation des images :

«En optique, le jury a constaté cette année, en plus d'une inaptitude fréquente à effectuer des projections, de sérieuses lacunes sur la production et l'analyse d'une lumière polarisée».

Extrait du rapport du jury de l'agrégation externe, 1991.

«D'une manière générale, les candidats maîtrisent mal les projections. Pour obtenir une image lumineuse et de bonne qualité, il faut concentrer la lumière sur la fente ou le trou source et éclairer les lentilles dans leur région centrale et suivant leur axe. Rappelons aussi qu'il est inutile de chercher à faire l'image d'un objet sur un écran lorsque la distance qui les sépare est inférieure à quatre fois la distance focale de la lentille utilisée».

Extrait du rapport du jury de l'agrégation externe, 1992.

«La formation des images, l'éclairage des fentes, l'utilisation des diaphragmes sont de moins en moins bien maîtrisés, mettant en péril la visualisation et pire la mesure».

Extrait du rapport du jury de l'agrégation externe, 1994.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma femme, Marie-Monique LEBRUN, Françoise MARCADET et pour les relectures attentives qu'elles ont bien voulu faire de ce texte.