

# Techniques de projection

Le but de la projection est de donner d'un objet relativement petit une image assez grande et assez lumineuse pour qu'elle soit visible de toute une classe. Il s'agit donc d'éclairer fortement l'objet et de former à l'aide d'une lentille convergente son image agrandie sur un écran éloigné.

## I Conjugaison et éclairage

Dans la projection d'un objet, il importe de distinguer d'une part la *conjugaison* entre l'objet et son image, et d'autre part l'*éclairage* de l'objet à projeter qui est effectué à l'aide d'une source lumineuse intense (arc électrique, lampe, ...) dont les détails de fonctionnement sont décrits dans une autre série de notes.

La *conjugaison objet-image* est effectuée par une lentille convergente dont la distance focale  $f$  est choisie en fonction du grandissement souhaité et de la distance objet-image  $D$  disponible sur la paillasse. Compte-tenu du fait que l'on ne peut obtenir d'un *objet réel* une *image réelle* que si  $D \geq 4f$ , on utilise en pratique des lentilles de focale comprise entre 100 et 300<sup>1</sup>. Puisqu'on cherche en général à obtenir un grandissement  $G \geq 1$ , la portion utile de l'axe optique se limite au segment HF entre le point focal objet F et le point principal objet H situé à une distance  $2f$  de la lentille (fig.1). Il est donc inutile de déplacer la lentille tout le long de la paillasse entre l'objet et l'écran, ce qui fait toujours très mauvaise impression devant le jury...

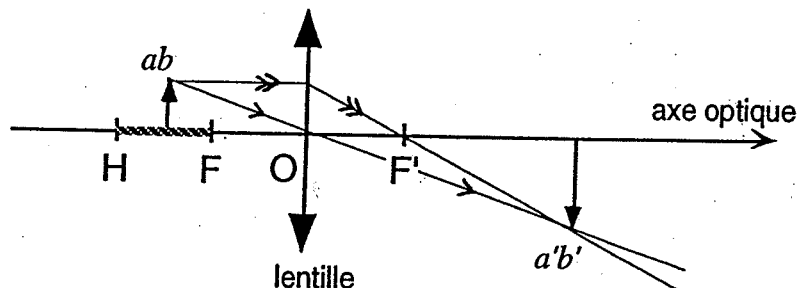


Figure 1: Formation d'une image réelle d'un objet réel. La fraction utile de l'axe optique se limite à une distance comprise entre  $f$  et  $2f$  de la lentille.

Par contre, le problème de l'*éclairage* est rarement abordé dans les cours théoriques où, comme représenté sur la figure 1, on considère toujours des objets *lumineux* qui diffusent la lumière dans toutes les directions. Par contre, dans les montages, l'objet à projeter n'est généralement pas lumineux. Il est donc nécessaire de l'éclairer

<sup>1</sup>Les valeurs des focales sont par convention données en mm.

en utilisant une source de lumière associée à un *condenseur*. Celui-ci est souvent constitué d'un ensemble de deux lentilles plan-convexe de grande ouverture, dont les sommets sont accolés.

## II Projection d'un petit trou source

### II.1 Eclairage d'un diaphragme

Réaliser l'expérience décrite sur la figure 2 en plaçant un trou au point de convergence du faisceau qui est aussi l'image du filament de la lampe <sup>2</sup>.

En déplaçant le trou de part et d'autre de ce point, visualiser les aberrations chromatiques du condenseur à l'aide des irisations de la tâche sur l'écran. Placer évidemment le trou à la position optimale pour laquelle l'éclairage obtenu est le plus uniforme possible.

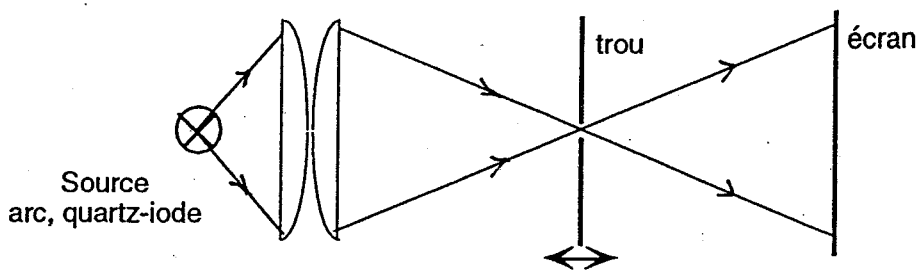


Figure 2: Eclairage d'un petit trou servant de diaphragme. Le condenseur permet de rabattre les rayons vers l'objet afin qu'il soit plus lumineux.

### II.2 Image du trou par une lentille

Former l'image du trou sur un écran placé à grande distance ( $D \approx 2$  m) à l'aide d'une lentille de type plan-convexe (fig.3). Puisque le grandissement est quasiment inversement proportionnel à la focale pour ces valeurs, réaliser qu'il nécessaire de faire un compromis entre grandissement et éclairage.

La lentille étant dans ces conditions largement recouverte par le faisceau, elle ne travaille plus exactement dans l'approximation de Gauss. Vérifier que son fonctionnement n'est plus symétrique et que son orientation optimale est obtenue en suivant la *règle mnémotechnique des 4-P*, qui consiste à placer la face plane de la lentille du côté où le faisceau est le plus convergent, comme représenté sur la fig.4. La figure 5 permet de se rendre compte que, dans ce cas, le montage respecte mieux les critères de l'approximation de Gauss.

Règle des 4-P :      Plus Plat, Plus Près
---

<sup>2</sup>On pourra par exemple s'aider de la diffusion de la lumière par la poussière contenue dans l'air afin de visualiser la forme du pinceau lumineux !

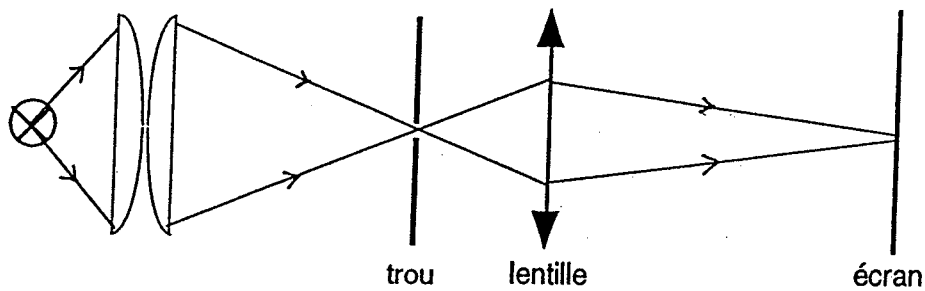


Figure 3: Formation de l'image du trou à l'aide d'une lentille. On peut remarquer que si le diaphragme est trop ouvert, l'image de la source (filament de la lampe) vient se superposer à l'image du trou.



Figure 4: Utilisation optimale d'une lentille plan-convexe suivant la règle des 4-P.

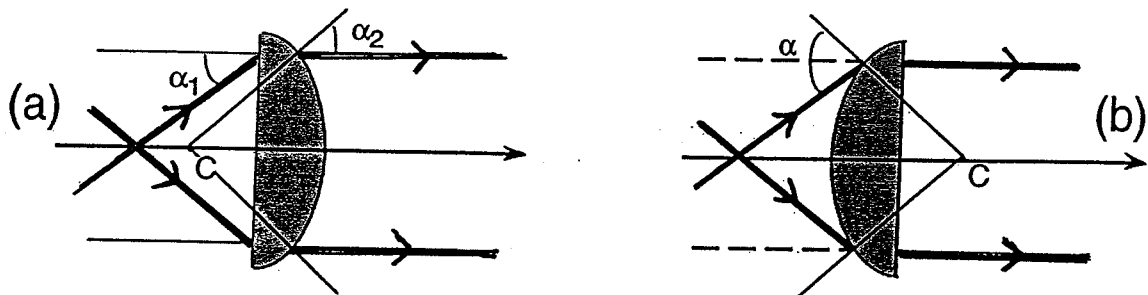


Figure 5: Dans l'utilisation correcte de la lentille (a), les angles d'inclinaison  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  par rapport aux dioptries sont plus faibles que l'angle d'inclinaison  $\alpha$  qu'on aurait dans le cas d'une utilisation incorrecte (b).

### II.3 Faisceau collimaté et images à l'infini

Une idée très répandue mais fautive est que, pour obtenir un faisceau collimaté (lumière parallèle), il suffit de placer un objet lumineux dans le plan focal objet d'une lentille (fig.6). On obtient dans ce cas une image à l'infini telle que chaque point de l'objet donne effectivement un faisceau parallèle. Par contre, les directions de ces faisceaux dépendent de la position du point dans le plan focal et le résultat est un faisceau quelconque au-delà de la lentille.

Pour obtenir un faisceau rigoureusement parallèle à l'axe, il faut placer un petit trou au foyer objet de la lentille.

- Réglage par auto-collimation :

On place un miroir plan derrière la lentille (fig.7). On ajuste la position de la lentille pour que l'image du trou obtenue par retour de la lumière soit nette dans le même plan que le diaphragme. On est alors assuré que le trou est bien dans le plan focal objet de la lentille. Après avoir ôté le miroir, vérifier qu'on obtient ainsi

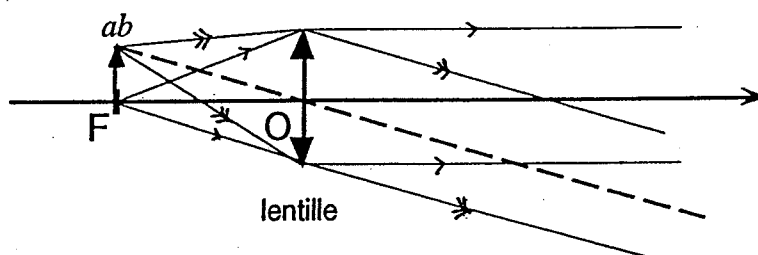


Figure 6: Objet  $ab$  placé au plan focal d'une lentille. Les faisceaux cylindriques formés par les différents points de  $ab$  forment une image à l'infini qui peut à son tour servir d'objet (par exemple dans le cas d'une lunette astronomique).

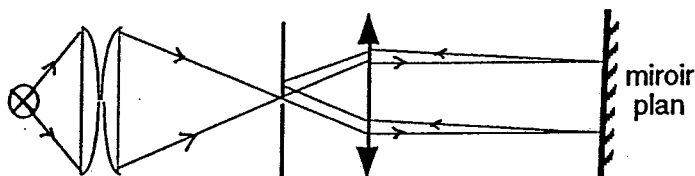


Figure 7: Réalisation d'une autocollimation sur un trou source.

un faisceau cylindrique.

Remarquons que cette méthode élémentaire peut être utilisée pour mesurer la distance focale d'une lentille convergente.

□ Mesure de la focale d'une lentille divergente (méthode de Badal) :

On associe deux lentilles convergentes  $L_1$  (centre optique  $O_1$ , foyers objet et image  $F_1$  et  $F'_1$ ) et  $L_2$  (centre optique  $O_2$ , foyers objet et image  $F_2$  et  $F'_2$ ) telles que  $\overline{O_1O_2} > f'_2$  (fig.8). On éclaire l'ensemble par un trou source  $O$  placé en  $F_1$ . L'image donnée par l'ensemble se forme alors en  $F'_2$ .

Montrer que, si on place une lentille divergente  $L_{div}$  dans le plan focal objet  $F_2$  de la lentille  $L_2$ , le déplacement de l'image  $O''$  du trou source permet de déterminer la distance focale  $f'_{div}$  de cette lentille [1] :

$$f'_{div} = - \frac{f_2'^2}{F_2'O''}$$

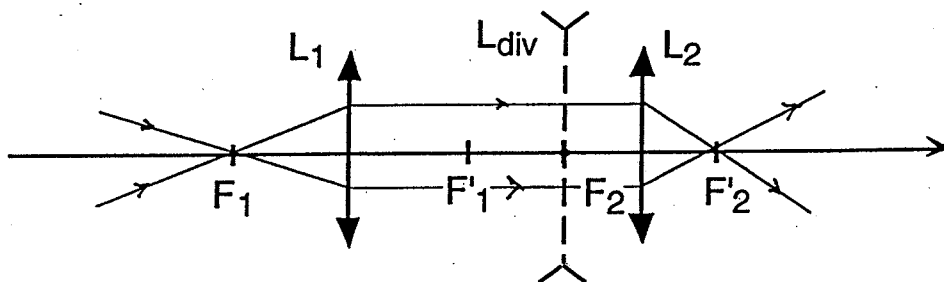


Figure 8: Mesure de la distance focale d'une lentille divergente à l'aide de la méthode de Badal.

### III Projection d'un objet étendu non-diffusant

#### III.1 Projection sans condenseur

On éclaire l'objet (diapositive, grille, fente, franges d'interférences localisées au voisinage d'une surface, ...) à l'aide d'une lampe quartz-iode sans condenseur, qui constitue une source grossièrement ponctuelle. On forme son image sur un écran éloigné à l'aide d'une lentille de courte focale afin d'obtenir à nouveau un grand grandissement (fig.9).

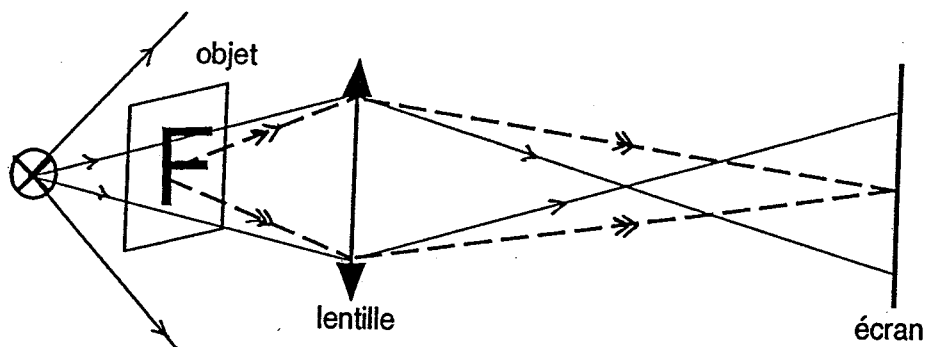


Figure 9: *A ne pas faire en montage : projection d'un objet sans condenseur !* Les rayons issus d'un point de l'objet sont tracés en pointillés afin de montrer sa conjugaison avec l'écran.

On voit que l'image obtenue est médiocre et est souvent "polluée" par l'image parasite et floue de la source (filament de la lampe). Le champ (portion de l'objet dont on voit l'image) est également réduit car une grande partie de la lumière ayant traversé l'écran n'est pas capturée par la lentille de projection et ne participe donc pas à la formation de l'image. Enfin, la lentille étant éclairée sur toute sa surface, elle travaille largement en-dehors des conditions d'application de l'approximation de Gauss.

#### III.2 Projection avec condenseur

On ajoute un condenseur devant l'objet (fig.10), ayant comme rôle de rabattre les rayons vers le centre de la lentille.

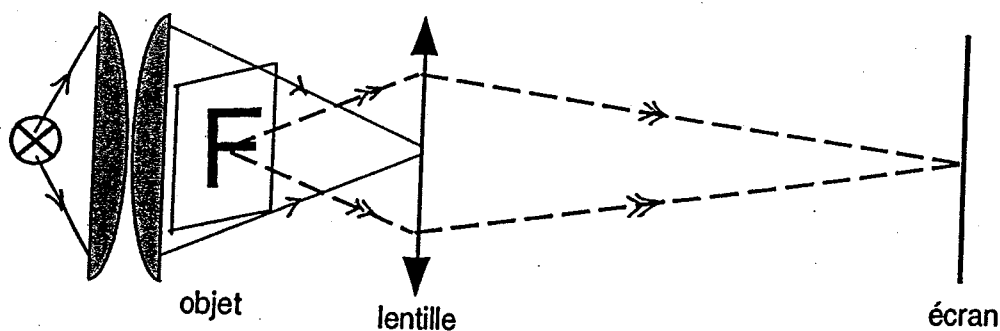


Figure 10: Projection d'un objet avec condenseur correspondant au montage à utiliser.

On procède ensuite aux réglages suivants :

- **Alignement** : le montage comportant deux systèmes optiques, il faut faire coïncider leurs axes. On peut par exemple former dans un premier temps l'image de la source par le condenseur sur l'écran pour définir l'axe. Le faisceau moyen doit être horizontal et le centre de l'image du filament doit se trouver à la hauteur de celui-ci. On introduit ensuite la lentille de telle sorte qu'elle donne de la source une image centrée à la même hauteur.
- **Conjugaison** : on place l'objet à projeter au voisinage du condenseur de façon à avoir un champ maximal <sup>3</sup> avec un éclairage uniforme. On réalise ensuite la conjugaison objet-écran en déplaçant la lentille.
- **Eclairage** : on forme l'image de la source sur la lentille de projection en déplaçant la lampe par rapport au condenseur. Remarquons que c'est le *seul* élément du montage qu'il soit encore possible d'ajuster sans perturber les réglages précédents.

On obtient ainsi une image lumineuse et uniformément éclairée. Le champ a un contour net qui est défini soit par l'image des bords de l'objet, soit par l'image du contour du condenseur. La lentille travaille uniquement au voisinage de son centre, ce qui limite les aberrations d'ouverture et augmente la profondeur de champ.

Cette projection de bonne qualité sera sans nul doute appréciée par les correcteurs, le jury et toute la classe...

**Remarque 1** : Dans tous les schémas de montage optique, il faut bien distinguer les traits qui correspondent aux indications de conjugaison et ceux qui représentent des chemins effectivement suivis par la lumière. Ainsi, sur la fig.10, les rayons qui participent effectivement à la formation de l'image sont contenus dans le volume qui s'appuie sur l'ouverture de l'objet et sur l'image de la source donnée par le condenseur (étendue géométrique du faisceau).

**Remarque 2** : le condenseur n'a pas besoin d'être de grande qualité optique puisqu'il n'intervient pas dans la conjugaison objet-écran. Il doit simplement être suffisamment grand par rapport à la dimension de l'objet afin de pouvoir l'éclairer le plus uniformément possible.

**Remarque 3** : si le condenseur présente des défauts (poussières, rayures, ...), on risque en collant l'objet contre lui d'en faire également l'image sur l'écran. Penser à simplement éloigner l'objet du condenseur.

## IV Projection d'un spectre

### IV.1 Utilisation d'un prisme

On utilise le même dispositif en faisant l'image sur l'écran d'une fente servant d'objet (cf. fig.11). On place ensuite un élément dispersif, en l'occurrence un prisme juste après la lentille de projection, et on s'assure que l'arête est bien parallèle à la fente source. Le montage s'effectue alors en accolant le prisme à la lentille de projection (fig.11). Comme le condenseur fait converger la lumière sur la lentille, il y a peu de risque de diaphragmation par le prisme, alors que celui-ci est plus étroit que la lentille. Si on observe néanmoins une diaphragmation du faisceau, il suffit de retoucher un peu le condenseur pour faire la mise au point de la source juste après

<sup>3</sup>Le champ est défini comme la portion de l'objet qui est éclairée.

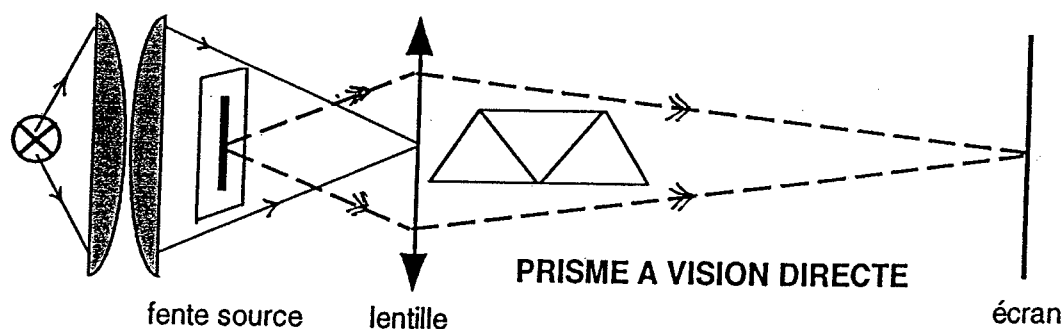


Figure 11: Projection d'un spectre à l'aide d'un prisme simple ou un prisme à vision directe. Un prisme n'étant rigoureusement stigmatique que pour des objets à l'infini, la distance de projection doit être suffisamment grande (de l'ordre de 2 m), en recourant éventuellement aux défauts de mise au point introduits par le PVD.

la lentille. Vous pourrez montrer à l'aide de ce montage l'existence du minimum de déviation d'un prisme. Quelle est la netteté de l'image dans cette position ? Quelle est la longueur d'onde la plus déviée ?

Afin d'éviter la déviation du faisceau, on utilise de préférence un *prisme à vision directe* (PVD), constitué de trois prismes accolés (un en flint intercalé entre deux en crown). L'ensemble est fortement dispersif et les différents angles sont calculés pour que la déviation d'un rayon lumineux soit nulle pour la raie jaune du sodium (figure 12).

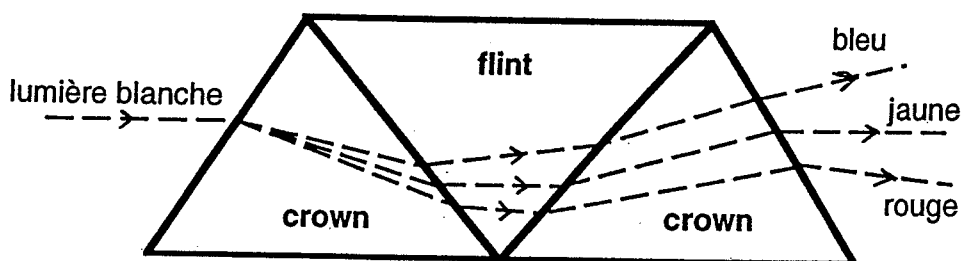


Figure 12: Prisme à vision directe permettant d'obtenir une forte dispersion avec une déviation nulle pour la longueur d'onde moyenne.

Rappelons que le *crown* est un verre à base de chaux – silicate de calcium et de sodium – qui se rapproche comme composition du verre à glace habituel. Le *flint* est un verre d'optique à base de silicate de potassium et de plomb. C'est en quelque sorte un verre cristal dont la teneur en plomb est exagérée, et qui est plus réfringent et plus dispersif que le crown. Il faut cependant bien noter que cette classification des verres optiques en crown ou flint relève plus de la tradition historique, que de la réalité actuelle des fabrications optiques. Les logiciels de simulation de calcul optique, tels que CODE V ou SOLSTIS, qui sont aujourd'hui des instruments de base pour l'ingénieur opticien dans son travail de conception optique, intègrent ainsi le catalogue des verres SCHOTT. On peut y trouver plusieurs centaines de types de verre avec chacune des propriétés spécifiques, aussi bien de vue optique (indice de réfraction, dispersion) que physiques (propriétés chimiques, caractéristiques mécaniques, sensibilité à la température, ...) [2].

Vous pouvez également utiliser un réseau par transmission (de l'ordre de 150 traits/mm) éclairé sous incidence normale. Observer les différents ordres de diffraction, et préciser la longueur d'onde la plus déviée. Montrer en faisant varier l'angle d'incidence qu'il existe également un minimum de déviation. Remarquons que le réseau présente l'avantage d'avoir une déviation proportionnelle à la longueur d'onde au voisinage des petits angles. Le prisme est par contre plus lumineux et est donc mieux adapté aux projections sur table.

#### IV.2 Reconstitution de la lumière blanche. Couleurs complémentaires.

Le montage est le même que le précédent avec quelques modifications (fig.13). Dans la décomposition de la lumière, le but était d'obtenir avec une lentille de projection L un spectre assez grand pour qu'il soit visible de loin. Pour recomposer la lumière blanche, il faut par contre pouvoir recueillir toutes les radiations qui constituent le spectre à l'aide d'une lentille de reconstitution L'. Il faut donc faire d'abord un spectre de petites dimensions à l'aide d'une lentille de courte focale ( $f \approx 100$ ), faisant une image de la fente avec un grandissement  $G \approx 1$ . La lentille L' de focale  $f \approx 200$  est placée derrière le spectre et conjugue la face d'entrée du PVD avec l'écran.

Les rayons de chaque couleur issus d'un point objet de l'objet AB vont ainsi converger en un point de l'image A'B', en redonnant une couleur blanche. Le spectre est décomposé dans le plan (V, R), où il est possible de masquer certaines couleurs afin d'observer l'apparition de la couleur complémentaire dans l'image A'B'.

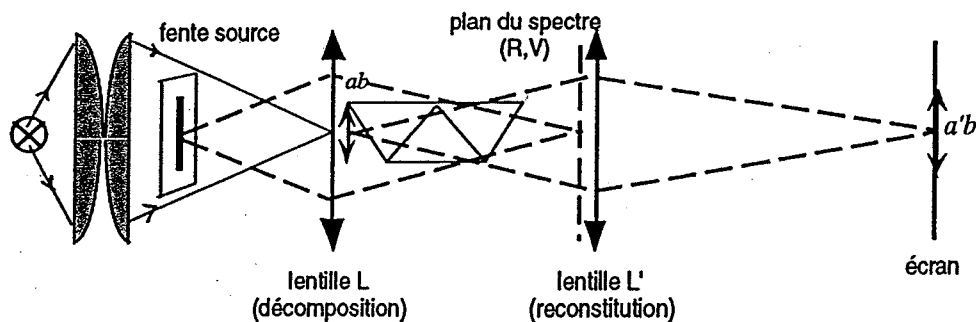


Figure 13: Reconstitution de la lumière blanche obtenue dans l'image d'un spectre par une lentille L'. L'éclairage doit être tel que l'image de la source par le condenseur soit suffisamment étendue pour bien couvrir la face d'entrée du PVD. Pour avoir un bord de champ net, on peut avoir intérêt à limiter la face d'entrée du PVD avec deux bandes de scotch opaque.



## V Image d'un objet diffusant

Si on place entre le condenseur et l'objet un écran diffusant (constitué de papier calque ou de verre dépoli), le faisceau issu du condenseur est diffusé dans toutes les directions (fig.14). L'objet à projeter devient ainsi un objet diffusant et on retrouve le cas envisagé dans les cours théoriques.

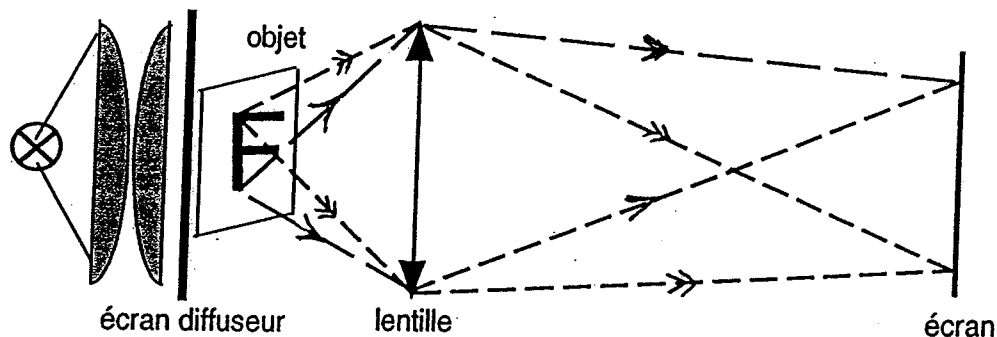


Figure 14: Image d'un objet diffusant.

Dans ces conditions, on n'observe plus l'image de la source sur la lentille et celle-ci est entièrement couverte par l'ensemble des faisceaux issus de chacun des points de l'objet. L'image obtenue sur l'écran devient peu lumineuse et la profondeur de champ<sup>4</sup> est faible.

C'est cependant la technique à utiliser chaque fois qu'on souhaite étudier de façon précise un problème d'optique géométrique (vérification des formules de conjugaison des lentilles, étude d'un modèle d'instrument d'optique, ...)

## VI Conclusion

Il ne vous reste plus maintenant qu'à pratiquer sur la paillasse pour que, rapidement, tous ces conseils deviennent superflus. Bon courage !

*Un petit peu de travail personnel d'approfondissement :*

- Résoudre le petit exercice suivant d'application :

On veut projeter l'image d'un objet lumineux sur un mur. La largeur utilisable de la salle est de 6 m. On souhaite obtenir de cet objet, mesurant environ 5 cm sur 5 cm, une image de dimension approximative 80 cm par 80 cm avec une bonne luminosité.

On dispose de quelques lentilles convergentes plan-convexe de diamètre voisin de 8 cm et de vergences égales à 12, 5, 2, 1 et 0.5.

Quelles lentilles peut-on utiliser pour avoir une projection convenable ?

- Décrire le schéma de fonctionnement d'un projecteur de diapositives et d'un rétroprojecteur.

<sup>4</sup>La notion de *profondeur de champ* est liée à la nature granulaire du détecteur. Tant que la section d'un faisceau est inférieure à la surface de l'unité détectrice, la tache de diffusion est perçue comme un point et on peut déplacer l'écran en gardant l'impression d'une image nette.

## Références bibliographiques

- [1] J. BERTY, A. ESCAUT, P. MARCHAND, L. MARTIN, A. OUSTRY, "*Physique pratique : optique (T.3)*", p.84, Vuibert (Paris, 1974).
- [2] Les caractéristiques de cinq types de verre SCHOTT sont par exemple décrites dans le Catalogue MELLES GRIOT 1997-1998, p. A4.8. Les catalogues des grands fabricants américains de fourniture optique comme MELLES GRIOT ou COHERENT, et qui sont mis à votre disposition dans la salle d'optique, constituent de véritables mines de renseignements et nous vous encourageons à les consulter le plus souvent possible. L'essentiel des formules dont vous pouvez avoir besoin y sont par exemple regroupées, sous une forme qui est toujours très facilement accessible.

# Sources lumineuses au laboratoire

17 octobre 1999

## I Sources de lumière blanche

### I.1 Rappels sur le spectre du corps noir

Rappelons la définition d'un corps noir idéal : il s'agit d'un corps dont le facteur d'absorption est égal à l'unité pour toutes les radiations électromagnétiques qu'il reçoit, quelle que soit leur fréquence. A l'équilibre, il va donc émettre un flux total égal au flux incident. On montre que dans ces conditions, le rayonnement émis correspond à un gaz de photons qui est placé en équilibre thermodynamique avec un réservoir à cette température  $T$  [1]. La densité spectrale d'énergie  $u_\nu(\nu)$  est alors donnée par la loi de Planck :

$$u_\nu(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left[\frac{h\nu}{kT}\right] - 1} \quad (1)$$

Pour réaliser un corps noir, on utilise en pratique un four aux parois noircies et percé d'une petite ouverture. A l'intérieur de la cavité, le rayonnement est absorbé et réémis à plusieurs reprises par les parois internes, tandis qu'une petite partie du rayonnement est émis par l'orifice. On montre que compte tenu de l'émission lambertienne d'une telle source, le flux rayonné dans le demi-espace par unité de surface de l'orifice est réparti spectralement selon la relation :

$$\mathcal{M}_\lambda(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{k\lambda T}\right] - 1} \quad (2)$$

qui est représentée schématiquement sur la figure 1. Rappelons que l'intégration de cette densité spectrale sur tout le spectre nous donnerait l'exittance  $\mathcal{M}$  (ou émittance), qui mesure le flux total rayonné dans le demi-espace par unité de surface de la source. Cette grandeur photométrique s'exprime donc en watt/mètre<sup>2</sup>, et  $\mathcal{M}_\lambda$  a pour unité W/m<sup>3</sup> qui correspond à une puissance (W) par unité de surface (/m<sup>2</sup>) et par unité de longueur d'onde (/m).

Le maximum d'émission est obtenu à une longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  dont la variation avec la température est donnée par la loi de déplacement de Wien :

$$\lambda_{\max} \times T \approx 2900 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (3)$$

L'émission lumineuse du Soleil, observée à travers l'atmosphère terrestre, correspond avec une très bonne approximation au spectre émis par un corps noir à la température de 5400 K, avec un maximum d'intensité pour  $\lambda = 540 \text{ nm}$ . L'utilisation

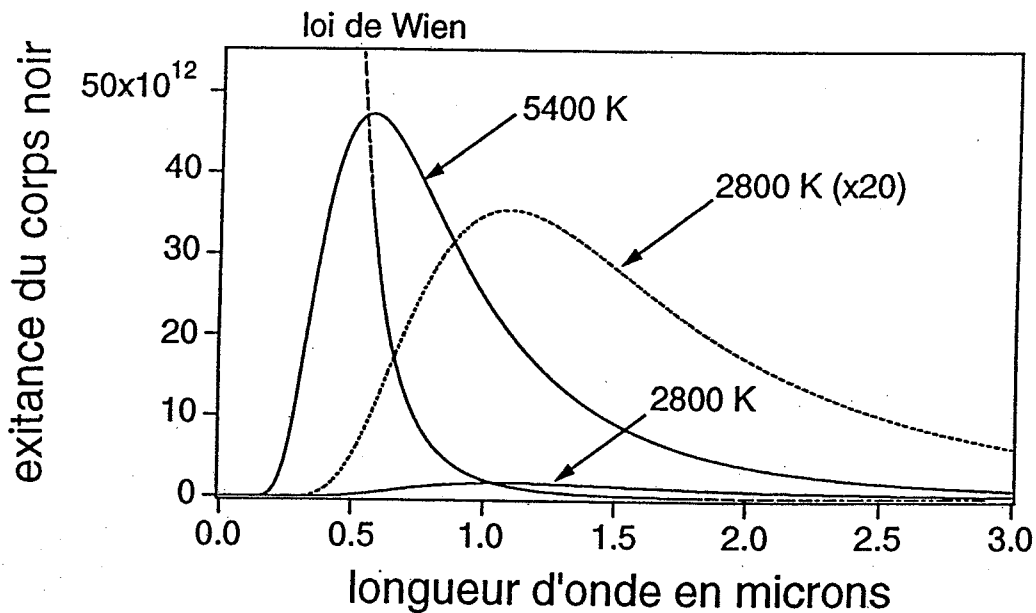


Figure 1: Répartition spectrale du rayonnement d'un corps noir suivant la loi de Planck pour des températures correspondant respectivement à l'émission du Soleil ( $T \approx 5400$  K) et à celle d'un filament de tungstène dans une lampe à incandescence ordinaire ( $T \approx 2800$  K). La grandeur photométrique tracée est l'exitance de la source, qui exprime le flux total rayonné dans le demi-espace par unité de surface de l'ouverture (en  $\text{W/m}^2$ ). La courbe en pointillé représente le lieu des maximums dont la position en fonction de la température est donnée par la loi de Wien (éq.(3)).

de cette lumière comme source de lumière blanche pour les montages étant évidemment peu commode (il faudrait par exemple construire un héliostat afin de pouvoir maintenir les rayons du Soleil dans une direction fixe par rapport à l'expérience...), on utilise en pratique au laboratoire des sources thermiques qui sont basées sur l'émission lumineuse d'un corps porté à très haute température.

### I.3 Lampes à incandescence ordinaires

Elles utilisent un filament de tungstène <sup>1</sup>, spiralé ou doublement spiralé et alimenté soit en 220 V alternatif pour l'éclairage habituel <sup>2</sup>, soit en basse tension continue (6 V ou 12 V). Ce filament, chauffé par effet Joule, atteint au maximum une température de 2800 K. On voit d'après la figure 1 que la plus grande partie de l'émission se trouve ainsi dans le domaine infra-rouge qui est sans intérêt pour les projections.

La durée de vie d'une lampe (de l'ordre de 1000 heures) est limitée par la sublimation du tungstène. La présence de gaz rare – argon ou krypton – à l'intérieur de l'enveloppe de verre permet, par rapport au vide, de réduire cette sublimation. Cependant, lorsque 2 à 3% de la masse du filament s'est évaporée, celui-ci va se briser. De plus, le tungstène qui quitte le filament noircit le verre de la lampe et diminue au cours du temps son efficacité lumineuse.

La pression gazeuse (de l'ordre de 80 kPa à 20°C) est telle qu'en fonctionnement, elle équilibre la pression atmosphérique. On utilise en général de l'argon, en présence d'environ 10% de N<sub>2</sub> dont le rôle est de réduire les arcs électriques. On trouve également des lampes au krypton, qui a une conductibilité thermique plus faible que l'argon. On peut alors élever la température du filament et augmenter ainsi l'efficacité lumineuse de plus de 10% tout en évitant un trop fort échauffement de l'enveloppe en verre. Les lampes opalisées sont obtenues par un dépôt de dioxyde de titane TiO<sub>2</sub> à l'intérieur de l'ampoule.

#### □ Efficacité d'émission d'une lampe à incandescence

Alimentée par une certaine puissance électrique, la lampe va nous restituer une fraction de cette puissance sous la forme d'un rayonnement émis dans tout l'espace. Nous pouvons caractériser ce rayonnement par la puissance qu'il transporte ; cette grandeur sera donc un *flux* auquel on associe l'adjectif d'*énergétique* (symbole  $\Phi_e$ ) et qui s'exprime naturellement en watt (W). Dans le cas où le détecteur utilisé est l'œil, on parle plutôt de *flux lumineux* (symbole  $\Phi_v$ ) et on aborde le domaine de la photométrie visuelle. Le rayonnement émis par la lampe ne contient pas seulement des longueurs d'onde visibles mais surtout une très forte proportion de rayonnement infra-rouge auquel notre œil n'est pas sensible. On utilise donc une unité différente pour mesurer le flux lumineux : c'est le lumen (lm).

<sup>1</sup>Si les lampes à incandescence constituent une source si familière et si commode, il n'est peut-être pas inutile de rappeler la longue et pénible suite de recherches qui ont abouti à ce concentré de physico-chimie qu'est une lampe à incandescence ! Les premiers travaux sur l'éclairage par incandescence datent de Tomas EDISON qui utilisait des filaments de carbone. Si le carbone a un point de fusion très élevé, il présentait le défaut s'évaporer rapidement et de noircir l'ampoule. C'est à la suite de longues recherches que William COOLIDGE de la General Electric lança vers 1910 la lampe à filament de tungstène, après être parvenu à préparer ce métal sous forme de filaments, par frittage et martelage à 3500°C dans une atmosphère d'hydrogène. On doit à Irvin LANGMUIR, également chercheur à la General Electric, l'idée de combattre l'évaporation du métal en introduisant dans l'ampoule un gaz inerte qui fut d'abord de l'azote à la pression atmosphérique. Grâce aux travaux de George CLAUDE sur la séparation par liquéfaction des gaz rares de l'air, ce gaz fut remplacé vers 1920 par de l'argon, qui est plus efficace que l'azote parce que mauvais conducteur thermique.

<sup>2</sup>Dans ce cas, l'intensité émise est modulée à 100 Hz, avec une variation relative de l'ordre de 5 à 10 % suivant le type de lampe.

Pour la radiation vert-jaune à  $\lambda = 550 \text{ nm}$  qui correspond au maximum de sensibilité de l'œil en vision diurne, la valeur énergétique du lumen est de  $1.46 \times 10^{-3} \text{ W}$ . L'efficacité lumineuse d'une lampe à incandescence classique est de 10 à 15 lm/W.

#### I.4 Lampes à incandescence aux halogènes

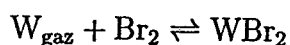
Ce sont les lampes utilisées dans l'éclairage des voitures ("phares à iode") ou dans l'éclairage domestique (ampoules dites "halogène"). Le filament de tungstène y est placé dans une vapeur d'iode qui permet de fonctionner à une température plus élevée que précédemment (environ 3200 K) et obtenir ainsi un déplacement du spectre d'émission vers le visible.

Ces lampes ont une forte puissance : 100 W pour les lampes LEYBOLD disponibles au laboratoire, 250 W dans un projecteur de diapositives et jusqu'à 500 W dans un rétroprojecteur. Lorsqu'on se sert de ce type de source dans les projections, il faut donc veiller à utiliser également un condenseur à verre anti-calorique afin de bien protéger l'objet éclairé sur lequel on focalise éventuellement le rayonnement émis par la lampe.

L'efficacité lumineuse d'une lampe aux halogènes est de 15 à 25 lm/W, et la durée de vie atteint 2000 heures.

##### □ Rôle de la vapeur d'iode

la présence d'iode ou surtout de brome (introduit sous forme de bromure de méthyle ou de méthylène), ajouté en faible quantité au gaz rare contenu dans l'enveloppe, va permettre de former des halogénures de tungstène gazeux à partir du tungstène sublimé et de redéposer après décomposition de ces halogénures, le tungstène sur le filament selon la réaction



Dans les zones de basse température de l'ampoule, l'équilibre est déplacé dans le sens exothermique qui correspond à la formation de  $WBr_2$  et évite le noircissement de l'enveloppe par dépôt du tungstène. Sur le filament (à haute température), l'équilibre est par contre déplacé dans le sens de la reformation du tungstène. Le filament peut ainsi être porté à plus haute température. La réaction chimique entre les ions halogénures et la vapeur de tungstène ayant lieu à une température qui peut atteindre  $650^\circ\text{C}$ , il est nécessaire d'éviter des points froids inférieurs à cette température et, en particulier, il faut que l'ampoule atteigne au moins cette température. Pour cela, celle-ci doit être proche du filament pour être chauffée par ce dernier, et doit être pour résister à cette température élevée, en silice vitreuse ou en verre "dur" alumino-silicaté dont la température de ramollissement (au-delà de  $1000^\circ$ ) est nettement plus élevée que celle d'un verre ordinaire (environ  $500^\circ$ ).

La silice vitreuse présente l'inconvénient de cristalliser, puis de se briser au refroidissement, lorsqu'elle est en contact prolongé à chaud avec les ions  $Ca^{2+}$  et  $K^+$  contenus dans la graisse apporté par un contact éventuel avec les doigts. C'est pourquoi il faut éviter tout contact direct de ces ampoules avec les doigts lors de leur mise en place dans la lampe. Notons que la silice vitreuse est, contrairement

au verre, transparente au rayonnement ultra-violet (UV). Il n'est donc pas recommandé d'utiliser des lampes aux halogènes non protégées (par un filtre, écran de verre, double ampoule) en éclairage direct.

#### □ Réglage d'une lampe Leybold

Un miroir sphérique est situé derrière l'ampoule afin de récupérer le maximum de lumière. Un réglage permet de déplacer l'ampoule latéralement afin qu'elle soit bien dans l'axe du miroir et du condenseur. Un autre réglage (appelé "tirage") permet de la déplacer longitudinalement afin de modifier la convergence du faisceau obtenue grâce au condenseur placé à la sortie de la lampe.

## II Emission par luminescence

### II.1 Les lampes spectrales

Ces lampes sont basées sur la désexcitation d'atomes (préalablement excités par collisions ou par décharge électrique) et présentent un spectre de raies caractéristique de la composition de la source. Il en était tout autrement avec les lampes à incandescence où toutes les radiations sont émises à la fois en un spectre continu. Bien que les gaz rares soumis à une décharge sous haute tension entre deux électrodes donnent lieu au phénomène de luminescence, on préfère utiliser la luminescence produite par une vapeur métallique (sodium ou mercure) introduite avec le gaz rare dans le tube à décharge. A la mise sous tension, la décharge s'établit dans le gaz, le tube s'échauffe ce qui permet alors la vaporisation du métal (qui doit atteindre pour le sodium une température de 270 °C pour donner la tension de vapeur désirée de 0.4 kPa), puis la décharge passe progressivement à la vapeur métallique.

On dispose en pratique au laboratoire de trois types de lampes spectrales :

Na	Zn-Cd-Hg	Hg
----	----------	----

Les lampes à vapeur de sodium sont quasi-monochromatique avec l'émission d'un doublet de raies dans le jaune (589.00 nm et 589.59 nm). Leur durée de vie est de l'ordre de 10 000 heures, et leur efficacité lumineuse est de 100 à 200 lm/W. En dehors des applications au laboratoire, ces lampes sont utilisées principalement pour l'éclairage routier.

Les lampes à vapeur de mercure sont de deux types :

- Lampe type basse pression ( $\approx 1$  atm), émettant des raies fines à 405, 436, 546 et 577 nm, dont la largeur spectrale  $\Delta\lambda \approx 10^{-2}$  nm peut être limitée par l'élargissement Doppler (il s'agit des lampes Hg basse pression Cooper-Hewitt, dont la finesse de raie atteint  $\mathcal{F} \simeq 250\,000$  à  $500\,000$ ).
- lampe type haute pression : la pression du gaz dans la lampe et l'intensité de la décharge sont plus élevées (régime d'arc). Elle est beaucoup plus lumineuse (et donc préférable pour les projections) mais spectralement plus large : comme il

y a plus d'atomes, ils s'entrechoquent plus facilement, ce qui élargit les raies à des valeurs typiques  $\Delta\lambda \simeq 10^{-1}$  nm (soit  $\mathcal{F} \simeq 5000$ ). Ce type de lampe émet également beaucoup d'UV : il faut donc prendre garde à ne pas la regarder directement avec les yeux.

Citons également les lampes au xénon très utilisées car elles fournissent un spectre voisin de celui du Soleil. Elles peuvent fonctionner soit dans un régime de décharge, soit dans un régime d'arc.

□ *Branchement des lampes spectrales :*

Pour amorcer la décharge, il est nécessaire d'avoir une différence de potentiel de l'ordre de 500 volts entre les deux électrodes. Cette tension élevée va être obtenue par l'intermédiaire d'un transformateur spécialement adapté ("ballast"). Une fois le régime stationnaire atteint, la tension aux bornes de la lampe est de l'ordre de quelques dizaines de volts, la chute de tension étant provoquée par une inductance placée en série avec la lampe.

Les lampes spectrales n'atteignent leur plein régime qu'au bout de quelques minutes de fonctionnement, comme on peut facilement le voir avec l'expérience suivante. Allumons une lampe à vapeur de sodium (pas de mercure à cause du rayonnement UV qui est dangereux pour les yeux comme nous l'avons déjà précisé) dégagée de son carter. On observe très rapidement le chauffage des électrodes, puis l'apparition d'une lumière bleutée due à la luminescence du gaz inerte utilisé pour l'amorçage de la lampe. Le sodium est initialement sous forme d'un dépôt solide sur les parois de verre du tube à décharge. Lorsque la température est suffisante pour que le sodium se vaporise, on observe la luminescence jaune caractéristique de ce métal.

Si par contre on éteint une lampe spectrale, elle peut ne pas se rallumer immédiatement. Il faut alors attendre son refroidissement complet pour pouvoir ensuite la réamorcer. *Par conséquent, attention aux fausses manœuvres pendant les présentations des montages !*

## II.2 Les tubes fluorescents

Contrairement à ce que l'on croit souvent, il ne s'agit pas de tubes "au néon". Pour bien voir la différence, il faut se rappeler ces enseignes lumineuses apparues au début du siècle, et qui utilisaient la lumière rouge du néon (ou celle rosée de l'hélium) souvent dans un but publicitaire. Les tubes fluorescents sont en fait basés sur l'émission d'une vapeur de mercure. Comme la luminescence des atomes de mercure n'est pas suffisamment blanche pour l'éclairage courant, on combine cette émission à une substance fluorescente : celle-ci va absorber une partie du rayonnement lumineux émis dans la décharge puis réémettre de nouvelles radiations à des longueurs d'onde plus grande. On voit ainsi la possibilité d'émettre une lumière blanche par fluorescence à partir de radiations ultra-violettes (figure ??). On doit à Georges CLAUDE la première mise en œuvre vers 1930 de cette idée. Il construisit un tube à décharge contenant un mélange de vapeur de mercure et de gaz rares, et enduit intérieurement d'un sulfure fluorescent qui réémettait un spectre visible. L'éclairage par fluorescence connut ensuite un développement fulgurant.



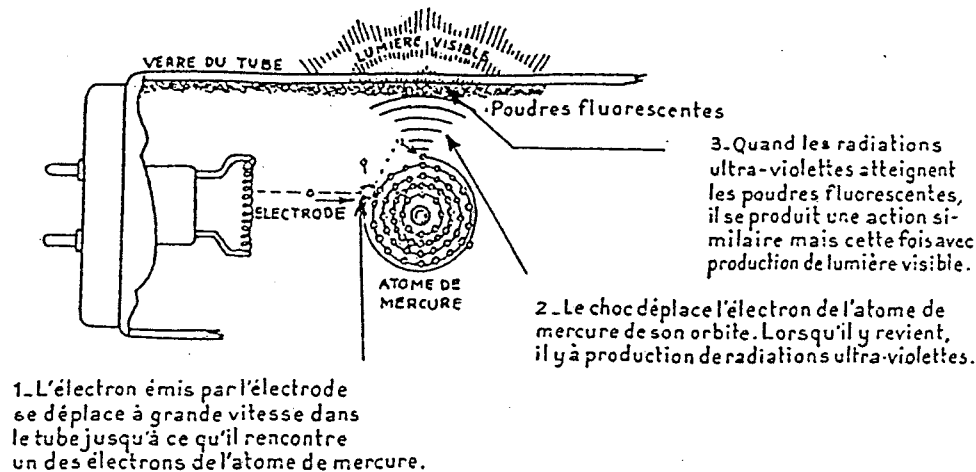


Figure 4: Principe de fonctionnement d'un tube fluorescent. L'ampoule contient du mercure à très basse pression, ce qui favorise l'émission de ses raies ultra-violettes. Sur la paroi de l'ampoule, est déposée une poudre fluorescente qui réémet une lumière visible de spectre large lorsqu'elle est éclairée par de l'ultraviolet.

Dans les dispositifs commerciaux actuels, le tube contient de l'argon sous quelques centaines de Pa, en présence d'une goutte de mercure. Sous basse pression, la vapeur de mercure qui atteint à 25 °C une tension de vapeur de 0.4 Pa émet un rayonnement principalement situé dans l'UV ( $\lambda = 254 \text{ nm}$ ) qui ne traverse pas le tube de verre et qui excite la fluorescence d'un mélange de poudres qui recouvrent les parois intérieures du tube. La lumière réémise par fluorescence dépend évidemment de la nature du mélange de poudres utilisé. Les tubes dits "blanc industrie" utilisent un halophosphate de calcium activé par des ions antimoine et manganèse. Les tubes utilisés par les particuliers utilisent un mélange de poudre de terres rares ayant trois bandes d'émission dans le visible<sup>3</sup>.

L'efficacité lumineuse des tubes fluorescents est de 50 à 100 lm/W, avec des durées de vie très élevées (supérieures à 10 000 heures). Ils sont utilisés pour l'éclairage intérieur mais ne peuvent être installés à l'extérieur – tout au moins les tubes classiques – car à une température ambiante de 10 °C, leur rendement lumineux est diminué de moitié.

Il existe également des tubes dits "à lumière noire" qui émettent dans l'ultra-violet proche (entre 315 et 400 nm). Ce type de lumière, qui traverse le verre ordinaire et stimule la fluorescence des objets ordinaires comme nos vêtements, est utilisé pour obtenir des effets scéniques ou publicitaires mais également pour initier des réactions photochimiques.

### III Les sources laser

Les caractéristiques spécifiques de ces types de source sont étudiées plus en détail dans le cours d'optique physique. Les lasers couramment utilisés pour les expériences d'optique dans nos laboratoires d'enseignement sont des sources continues

<sup>3</sup>Bleu à 450 nm à l'aide d'ions de terbium ou d'ions baryum et europium sur aluminat de magnésium ; Vert à 540 nm à l'aide d'ions europium  $\text{Eu}^{3+}$  ou d'ions cérium et terbium sur aluminat de magnésium ; Rouge à 610 nm à l'aide d'ions europium  $\text{Eu}^{3+}$  sur vanadate d'Yttrium [2].

(lasers hélium-néon ou diodes laser) de faible puissance (inférieure au mW). Leurs principaux avantages sont d'une part la monochromaticité du rayonnement produit, et d'autre part une faible section et une faible divergence du faisceau.

### Annexe : Longueurs d'onde des principales raies spectrales

Les longueurs d'onde présentées dans ce tableau sont celles des principales lampes spectrales disponibles au laboratoire. Au spectre de raies de la vapeur métallique se superpose le spectre du gaz d'allumage de la lampe, qui est en général de l'argon. Les raies correspondantes ayant une intensité très inférieure, il est inutile de les prendre en compte.

atome	couleur	longueur d'onde (en Å)
Hélium He	violette	4026
	indigo	4472
	vert bleu	5016
	jaune	5876
	rouge	6678
Sodium Na	jaune-orangé	5890
		5896
Mercure Hg	violettes	4047-4078
	indigo	4358
	vert chou	4930
	vert	5461
	jaune	5770
		5790
Cadmium Cd	bleue	4678
	vert bleue	4800
	vert	4086
	rouge	6438
Zinc Zn	bleue	4680
	bleue	4722
	vert bleu	4811
	rouge	6362
Hydrogène H	violet	4101.7
	bleu	4340.5
	bleu	4861.3
	rouge	6562.8

## Références bibliographiques

- [1] B. DIU, C. GUTHMAN, D. LEDERER et B. ROULET, "*Physique statistique*", Hermann (Paris, 1989)
- [2] Les renseignements sur les lampes sont tirées ses pages web de Jean-Louis VIGNES que l'on peut consulter à l'adresse suivante ...

