



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

OPTIQUE : EXPÉRIENCES DE BASE

2024-2025



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

Table des matières

1	Sources lumineuses	3
1.1	Sources thermiques	3
1.2	Lampes spectrales	3
1.3	Lampes à LED	3
1.4	Lasers	3
2	Projection sur un écran éloigné	4
2.1	Condenseur	4
2.2	Projection d'un petit trou	4
2.3	Projection d'un objet transparent (non diffusant)	5
2.4	Projection d'un objet diffusant	6
3	Expériences simples d'optique géométrique	6
3.1	Obtention d'un faisceau de lumière parallèle par autocollimation	6
3.2	Mesure de la distance focale d'une lentille mince convergente	6
4	Spectroscopes à prisme ou à réseau	7
4.1	Principe	7
4.2	Étude des limitations du pouvoir de résolution avec le prisme à vision directe	8
4.3	Étude du réseau	9

Bibliographie :

Sextant, *Optique expérimentale*

1 Sources lumineuses

1.1 Sources thermiques

Elles ont un spectre continu dont l'intensité dépend de la longueur d'onde. Elles constituent une bonne première approximation de la *lumière blanche* (spectre plat dans le visible).

Lampes à incandescence ordinaires Le filament de tungstène est porté à une température d'environ 2800 K. Il est placé sous vide, ou dans une atmosphère gazeuse inerte, pour éviter l'oxydation. La répartition spectrale est à peu près celle d'un corps noir porté à la même température (avec donc une part importante du rayonnement dans l'infrarouge).

Lampes à incandescence Quartz-Halogène (en particulier Quartz-Iode) Le principe est le même que pour les lampes précédentes, mais l'ajout d'un gaz halogène à l'intérieur de l'ampoule augmente son temps de vie, en limitant la vaporisation du tungstène. Cela permet donc de porter le filament à une température plus élevée (3200 K), ce qui augmente l'intensité lumineuse et décale le maximum d'émission du spectre vers le visible.

1.2 Lampes spectrales

Ce sont des lampes à vapeurs atomiques, qui fournissent des spectres de raies. Ces lampes nécessitent un auto-transformateur spécial. En effet, une haute tension est nécessaire pour établir une décharge entre les électrodes, les électrons accélérés excitant les atomes par collision (ceux-ci émettent alors de la lumière en se désexcitant).

Vous utiliserez fréquemment des lampes à vapeur de sodium (le doublet jaune du sodium fournit également la lumière des réverbères) ou des lampes à vapeur de mercure (qui émettent plusieurs raies). Ces dernières peuvent être :

- soit basse pression (raies fines, $\Delta\lambda \approx 10^{-2}$ nm, dont la forme est dominée par l'effet Doppler, émission par unité de surface faible);
- soit haute pression (raies élargies, $\Delta\lambda \approx 10^{-1}$ nm, effet collisionnel important mais Doppler toujours dominant, émission par unité de surface élevée) : les lampes dites *Philora*, en particulier, montées dans un carter spécial qui contient leur transformateur. Ne pas les confondre avec les lampes Quartz-Iode (Q.I.) qui sont placées dans des carters similaires.

Ces sources n'atteignent leur régime de fonctionnement permanent qu'après plusieurs minutes : il faut donc les **brancher en avance** et éviter de les éteindre, car elles ont besoin de refroidir avant d'être rallumées.

1.3 Lampes à LED

Les LED (DEL en français pour diode électroluminescente) se sont beaucoup démocratisées ces dernières années et remplacent progressivement toutes les lampes à incandescence dans la vie quotidienne. À l'agrégation, on utilise aussi des LED à la place de lampes à incandescence, à condition que la forme spectrale ne soit pas importante pour l'expérience. Le spectre est globalement continu, mais très différent d'un spectre de corps noir, possédant des pics sur les raies associées aux LED. On utilise des matrices de LED sur la plateforme. Attention, elles sont placées dans les mêmes carter que les lampes à incandescence (pour profiter des mêmes condenseurs). Pour les différencier regarder à l'intérieur (ou les soupeser, elles sont très légères car ne nécessitent pas de transformateur).

Par la suite, on parlera simplement de "lampe blanche". Sans spécification, choisissez une lampe LED (elles chauffent moins et sont plus légères).

1.4 Lasers

On utilisera essentiellement deux types de sources lasers avec des puissances de l'ordre du mW durant l'année :

- les lasers hélium-néon, ayant pour avantage d'être très monochromatiques (longueur d'onde de 632,8 nm pour le rouge, 543 nm pour le vert), peu divergents (avec une ouverture de l'ordre de 10^{-3} rad) mais très encombrants (à cause de la cavité Fabry-Pérot).
- les diodes lasers, beaucoup plus portables, mais avec une divergence de faisceau un peu plus grande et une longueur d'onde à calibrer.

Malgré leur faible puissance, **les faisceaux sont dangereux pour la rétine**. On prendra donc garde de ne pas l'orienter vers le jury, et on fera attention aux réflexions intempestives sur les éléments des montages ainsi que sur les bagues, bracelets ou montres lorsque votre main coupe le faisceau laser.

Un **laser polarisé** est un laser qui n'émet que sur une polarisation bien définie. Un **laser non polarisé** est un laser dont la polarisation fluctue au cours du temps.¹ Par conséquent, en plaçant un polariseur après un laser non polarisé, on obtient une source polarisée mais dont l'intensité fluctue.

2 Projection sur un écran éloigné

Il s'agit de former l'image agrandie d'objets éclairés par une lampe blanche sur un écran à plusieurs mètres pour les rendre visibles d'une salle entière.

2.1 Condenseur

Définition : c'est une lentille convergente (ou plus généralement une combinaison de lentilles) de grande taille placée entre la lampe et l'objet.

Vous disposez de condenseurs qui s'adaptent directement sur les carters des lampes blanches ou Philora. Ils servent à collecter le maximum de rayons issus de la lampe et à les renvoyer sur l'objet. Ils sont en réalité composés de deux lentilles plan-convexe. Leur distance focale va de 8 à 15 cm. Sachant que la distance lampe-condenseur vaut 15 cm quand le condenseur est placé à la distance minimum de la lampe :

- un condenseur de 15 cm donne un faisceau **quasi parallèle**,
- un condenseur de 8 cm donne un faisceau **convergent** à une vingtaine de centimètres du condenseur.

Il est possible dans chaque cas d'augmenter un peu la convergence en éloignant le condenseur de la lampe à l'aide de la poignée. On recommande cependant un bon choix du condenseur en amont du montage, plutôt que d'utiliser cette poignée sans réflexion préalable sur ce choix, et qui déstabilise mécaniquement le carter.

Vérifier rapidement ces propriétés avec les condenseurs à votre disposition, à l'aide par exemple d'une feuille de papier. Observer le cas échéant dans le plan adéquat l'image du filament (ou de la matrice de LEDs, selon la lampe utilisée). L'utilisation pratique des condenseurs est illustrée dans les paragraphes suivants.

2.2 Projection d'un petit trou

À l'aide d'un condenseur très convergent, faire converger la lumière. Placer un écran au point de convergence de la lumière blanche. Le déplacer légèrement en amont et en aval, et observer les irisations de la tâche lumineuse. Les interpréter en termes d'aberrations chromatiques du condenseur, en considérant que l'indice du verre décroît quand la longueur d'onde augmente (dispersion normale). Placer maintenant un trou de part et d'autre du point de focalisation moyen. Commenter la couleur de la tache sur l'écran. Pour la suite, placer le trou au point de convergence moyen pour éviter les irisations.

1. Attention de ne pas confondre avec une lumière non polarisée. Une lumière non polarisée est un rayonnement qui a une polarisation aléatoire qui varie sur une période invisible aux capteurs habituels. Les lampes blanches et spectrales sont par défaut non polarisées. Ici, le laser a une polarisation bien définie, mais qui peut tourner sur une échelle de temps de l'ordre de la seconde ou la minute.

Règle des 4P Faire l'image du trou sur l'écran avec une lentille de courte focale (≈ 10 cm). Retournez la lentille. Obtenez-vous une meilleure image ?

Explication : dans l'approximation de Gauss, une lentille a un fonctionnement symétrique mais ici, elle est complètement couverte par le faisceau, donc ce niveau d'approximation n'est plus valable. Pour trouver le bon sens d'utilisation, on utilisera la règle des 4P (**P**lus **P**lat, **P**lus **P**rès) qui consiste à placer la face plane de la lentille du côté de l'objet s'il est plus près de la lentille que l'image, et du côté de l'image dans le cas contraire (Cf. Sextant pour une explication rapide).

Attention : la règle des 4P n'est valable que pour un objet peu étendu autour de l'axe optique. Elle peut être mise en défaut pour des objets plus étendus.

2.3 Projection d'un objet transparent (non diffusant)

On souhaite ici obtenir l'image d'un quadrillage transparent, en montrant la plus grande surface possible (champ maximum).

Commencer sans condenseur : ajuster l'ensemble lampe, quadrillage, lentille (f de l'ordre de 10 cm) pour avoir une image. Pourquoi est-elle si médiocre ?

Ajouter le condenseur (8 cm). Vu les protocoles précédents, le montage naturel est de placer la grille au point de convergence du condenseur pour un maximum de luminosité, puis de placer la lentille derrière. Cependant, remarquer que pour que le champ soit maximum, il faut placer l'objet plus proche du condenseur. Par ailleurs, pour que la lentille soit éclairée en conditions de Gauss et que l'image soit la meilleure possible, on a intérêt à placer la lentille au point de convergence des rayons.

Protocole pour faire un montage optique En conclusion, pour faire un montage optique, on se placera en pratique dans la situation de droite de la figure ci-dessous, pour les raisons suivantes :

- un champ objet plus grand (et par la même occasion, on évite la focalisation sur les objets qui peuvent les chauffer et les détériorer) ;
- avoir la lentille de projection dans les conditions de Gauss ;
- réduire la lumière parasite qui pourrait sortir de la lampe ;
- éliminer la contribution de l'image du filament ou de la matrice de LED, qui se situe justement au point de convergence des rayons issus du condenseur. En y plaçant la lentille, on est sûr de ne pas l'observer sur l'image de l'objet d'intérêt.

On suivra ce protocole aussi bien pour des quadrillages que des trous, des fentes, d'autres objets, etc.

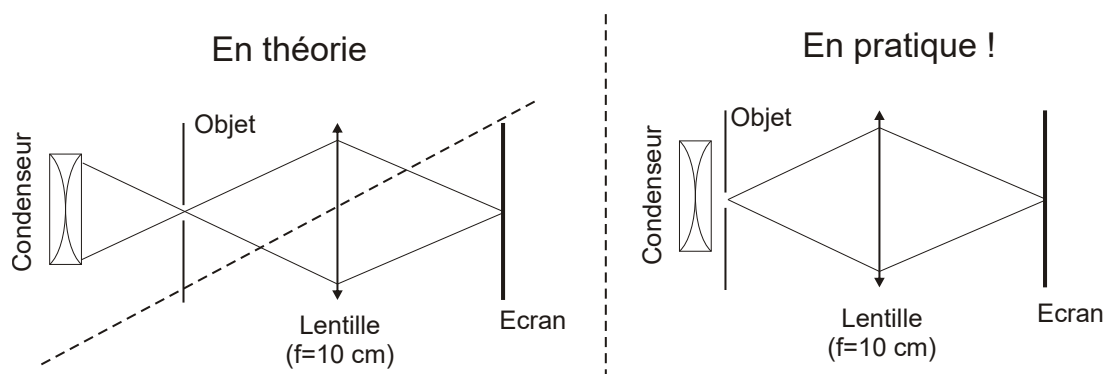


FIGURE 1 – Schéma de principe pour la projection d'un objet

Note : les lentilles de courtes focales (10 ou 15 cm) permettent d'obtenir des grossissements importants mais donnent plus d'aberrations que les autres. Une focale de 20 cm est un bon compromis aberrations-grossissement.

Remplacer le condenseur de 8 cm par un condenseur de 12 cm. Observer l'effet de diaphragme maintenant causé par la lentille. On lira le Sextant pour plus d'informations sur les diaphragmes.

2.4 Projection d'un objet diffusant

Un objet est diffusant si, quelle que soit la provenance de la lumière qui l'éclaire, il la renvoie de manière isotrope (exemples : papier blanc, écran, papier calque, etc.).

Projeter par exemple l'image d'un calque quadrillé et vérifier que l'usage d'un condenseur n'est pas nécessaire.

On peut ajouter un manchon noir pour réduire la lumière parasite.

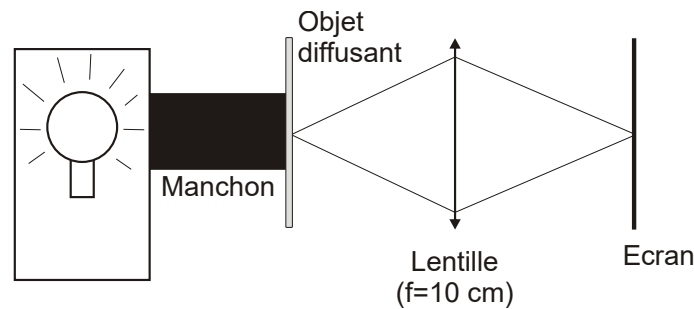


FIGURE 2 –

Comparer l'image obtenue à celle d'un objet transparent.

3 Expériences simples d'optique géométrique

3.1 Obtention d'un faisceau de lumière parallèle par autocollimation

Procéder comme pour former l'image d'un trou (cf.II.2). Ajouter un miroir plan à la sortie de la lentille et ajuster la position de celle-ci pour que l'image du trou après réflexion sur le miroir soit nette dans le même plan que le trou et de même taille que le trou. Enlever le miroir. En déplaçant un écran après la lentille, vérifier que (si le trou est suffisamment petit) le faisceau est bien parallèle.

3.2 Mesure de la distance focale d'une lentille mince convergente

Par autocollimation Dans l'expérience précédente, que vaut alors la distance trou-lentille ? En déduire une méthode simple de mesure de distance focale.

Par la méthode de Bessel Pour une distance D donnée entre un objet et son image par une lentille de focale f , il existe deux positions de la lentille pour lesquelles objet et écran sont conjugués, à condition que $D > 4f$. On prendra donc garde de ne pas essayer de faire une image sur un écran situé à 1 mètre avec une lentille de focale trop grande : l'impression sur le jury est déplorable ! Lorsque $D > 4f$, et en notant d l'écart entre les deux positions de la lentille pour lesquelles objet et image sont conjugués, on peut montrer (à savoir faire) que $f = (D^2 - d^2)/4D$. Cette méthode est plus précise que la méthode de Silbermann (voir ci-dessous) car elle s'affranchit de la mesure du grandissement. On peut encore améliorer la précision en réalisant l'expérience pour plusieurs valeurs de D et en réalisant un ajustement.

Par la méthode de Silbermann On se place dans le cas où la distance D entre l'objet et son image est minimale. Elle est alors égale à $4f$ et la lentille se trouve à mi-chemin de l'objet et de l'image. De plus, le grandissement est alors égal à -1 .

Prendre pour objet une plaque percée d'une ouverture en forme de F. Fixer du côté source de cette plaque du papier calque. Former l'image du F sur l'écran. Rechercher la position de Silbermann et en déduire la distance focale de la lentille. Si l'image est de trop mauvaise qualité, placer contre la lentille un diaphragme. Le choisir cependant

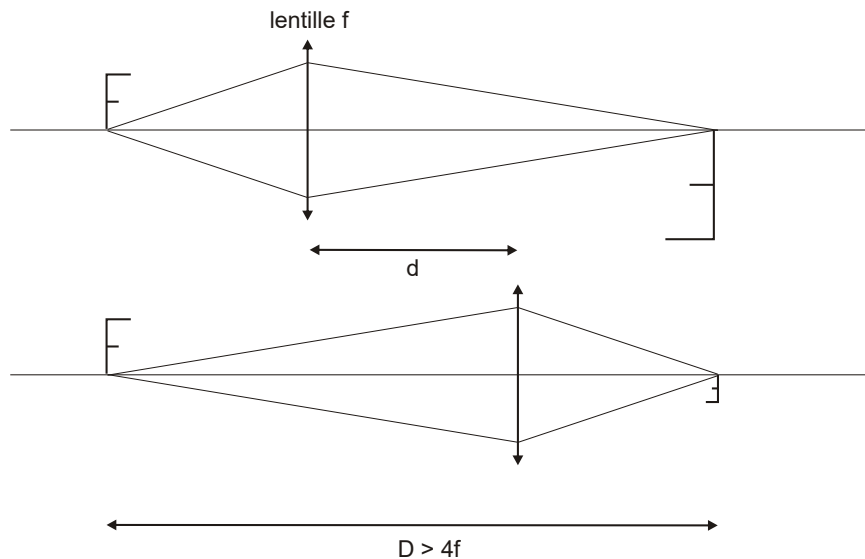


FIGURE 3 – Deux positions existent si $D > 4f$ pour placer la lentille entre l'objet et l'écran et avoir une image nette

le moins petit possible pour que la profondeur de champ reste faible (voir le TP "Instruments d'optique"), ce qui permet une bonne acuité de mise au point.

4 Spectroscopes à prisme ou à réseau

4.1 Principe

Le principe général d'un spectromètre à prisme ou à réseau est le suivant :

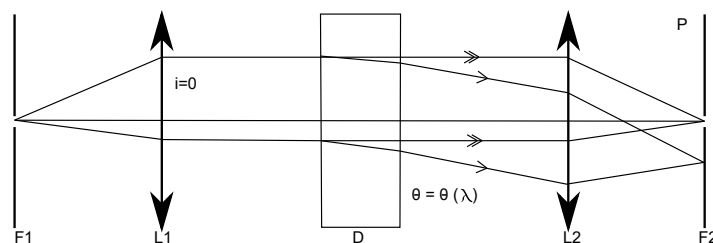


FIGURE 4 – Schéma général pour étudier la dispersion de la lumière par un élément D

Le système est composé d'une fente d'entrée F_1 , située au foyer objet d'une lentille L_1 donnant un faisceau de lumière parallèle. L'élément dispersif D est placé dans ce faisceau. À la sortie de D , on a pour chaque longueur d'onde λ un faisceau parallèle d'incidence $\theta(\lambda)$. La lentille de sortie L_2 refocalise ces différents faisceaux dans le plan P . Pour chaque λ , on a donc dans ce plan **une image de la fente F_1** . Pour analyser la lumière émise par la source, on déplace dans le plan P une fente de sortie F_2 derrière laquelle est placé le détecteur.

On appelle pouvoir de résolution le rapport

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}, \quad (1)$$

où λ est la longueur d'onde d'intérêt et $\delta\lambda$ étant le plus petit intervalle spectral résolu. C'est un paramètre essentiel pour un spectromètre. Il existe plusieurs causes de limitation du pouvoir de résolution de l'instrument :

- le pouvoir de résolution intrinsèque de l'élément dispersif est limité par la diffraction. Il est donc d'autant plus grand que la partie éclairée de l'élément dispersif est large.
- la largeur des fentes d'entrée et de sortie limite géométriquement le pouvoir de résolution de l'instrument.

- d'autres facteurs peuvent intervenir pour limiter le pouvoir de résolution, les aberrations des lentilles par exemple.

Protocole simplifié (approché) Sur le schéma de principe précédent, on éclaire le système dispersif en lumière parallèle car les prismes ou réseaux pour être dans une situation où les lois sont applicables. Dans les expériences usuelles avec projection sur un écran éloigné, il est possible de se contenter d'un faisceau peu convergent : par exemple avec un réseau, on peut réaliser le montage ci-dessous qui présente l'avantage de n'utiliser qu'une seule lentille. Il faut cependant s'assurer que la lentille de projection et l'élément dispersif soient aussi proches que possible.

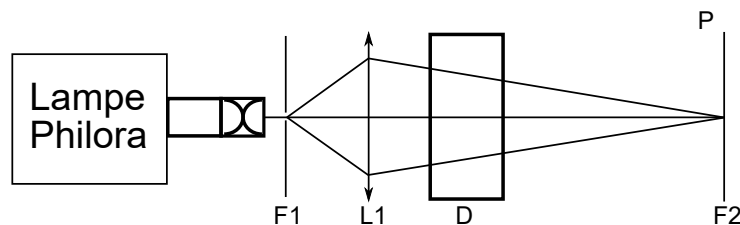


FIGURE 5 – Procole simplifié pour l'étude d'un élément dispersif

4.2 Étude des limitations du pouvoir de résolution avec le prisme à vision directe

Le prisme à vision directe (PVD) permet d'observer la dispersion par un prisme sans en avoir la déviation (on utilise 3 prismes accolés avec des propriétés et des angles de coupe qui permettent de redresser le faisceau). Le choix du prisme à vision directe (au lieu du réseau) est fait pour des questions de luminosité et de visibilité de l'expérience. Cependant, la déviation par le PVD étant une loi non-linéaire, il a essentiellement un caractère pédagogique et qualitatif ; on prendra garde d'utiliser plutôt un réseau pour toutes mesures quantitatives.

Projection du spectre du mercure On utilise une lampe à vapeur de mercure pour observer un spectre de raies et étudier le pouvoir de dispersion du dispositif de manière simple. Le mercure présente une raie verte à 546,1 nm et un doublet jaune à 576,9 et 579,0 nm sur lesquels on peut visualiser l'évolution du pouvoir de résolution en fonction de différents paramètres. On réalise l'image de la fente source sur l'écran. Une lentille de 15 à 20 cm de distance focale doit permettre d'obtenir sur un écran placé à 2 ou 3 mètres une image de bonne taille. Intercaler le prisme à vision directe et observer pour chaque longueur d'onde une image de la fente source décalée et de même largeur que l'image obtenue en l'absence d'élément dispersif. Ajuster éventuellement la mise au point. Remarquer aussi la présence de raies UV intenses (normalement invisibles à l'œil nu) dans le spectre du mercure à l'aide d'une feuille de papier blanc. Cet effet spectaculaire est dû aux agents azurants ajoutés au papier (ces molécules absorbent l'ultraviolet et réémettent dans le domaine du violet-bleu).

Pour pouvoir séparer le doublet du mercure, le spectromètre doit avoir un pouvoir de résolution au moins supérieur à

$$R_{\min} = \frac{\lambda_{\text{jaune}}}{\Delta\lambda_{\text{jaune}}} \simeq \frac{600}{2} \approx 300. \quad (2)$$

Influence de la largeur de la fente source La fente source F_1 utilisée doit être réglable en largeur et utilisée d'abord *largement ouverte*. En diminuant la largeur de la fente source, on voit les raies devenir de plus en plus fines. Observer en particulier le comportement de la raie jaune et vérifier qu'elle se dédouble lorsque l'image géométrique de la fente source est de largeur inférieure à l'écart du doublet sur l'écran. À la limite de résolution, le pouvoir de résolution est égal à $R_{\min}$.

Dans les conditions courantes d'emploi des spectromètres, on est souvent contraint d'utiliser, pour avoir une bonne luminosité, une largeur de fente source F_1 telle que c'est elle qui limite le pouvoir de résolution de l'instrument. Deux raies voisines, peuvent être distinguées à condition que α la largeur angulaire de la fente d'entrée du dispositif

soit plus petite que l'écart angulaire entre les deux raies. Pour une dispersion angulaire du dispositif $\frac{d\theta}{d\lambda}$, on peut écrire alors le pouvoir de résolution sous la forme :

$$R = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{d\theta}{d\lambda}. \quad (3)$$

Influence de la largeur éclairée du dispositif Dans cette expérience, on limite la surface éclairée du prisme en intercalant une fente réglable contre la face d'entrée du prisme. Choisir la fente d'entrée F_1 suffisamment fine pour que le doublet jaune du mercure soit bien résolu. **Fermer progressivement la fente qui est contre le prisme F_3 de largeur a** et observer l'élargissement des raies du spectre par diffraction. La largeur d'une raie observée sur l'écran est de l'ordre de grandeur de celle du pic central de diffraction par la fente de largeur a , soit $2\lambda D/a$, où D est la distance fente F_3 -écran. Le vérifier sur une raie simple (la raie verte), en utilisant une fente étalonnée. Quand la demi-largeur due à la diffraction devient du même ordre de grandeur que l'écart du doublet, on ne peut plus le résoudre. Le pouvoir de résolution de 300 est alors atteint.

4.3 Étude du réseau

Mettre en place à présent un montage de spectroscopie à une lentille, en effectuant d'abord l'image de la fente source sur l'écran, puis en collant le réseau à la lentille. Observer les différents ordres de diffraction. Comparer les spectres obtenus avec les différents réseaux à votre disposition.

Mesurer la déviation $X(\lambda)$ et vérifier la loi donnant la déviation angulaire $\theta(\lambda)$.

On pourra utiliser une lampe qui possède des raies dans tout le domaine visible : zinc - cadmium - mercure (voir la notice pour l'identification des raies). Elle a cependant l'inconvénient d'être moins lumineuse qu'une lampe à vapeur de mercure. Il pourra être utile de limiter la lumière parasite ne passant pas par le réseau

On mettra successivement en évidence l'effet :

- du nombre n de traits par mm
- de l'ordre k

Observer si ces réseaux présentent un effet de "blaze".

Comparaison des systèmes dispersifs Suite à cette étude, comparer les spécificités des deux systèmes, par exemple en terme de pouvoir de résolution, d'ordre de dispersion, de luminosité, de linéarité de la dispersion, etc. Les couleurs sont-elles dispersées dans le même ordre pour le prisme et le réseau ?