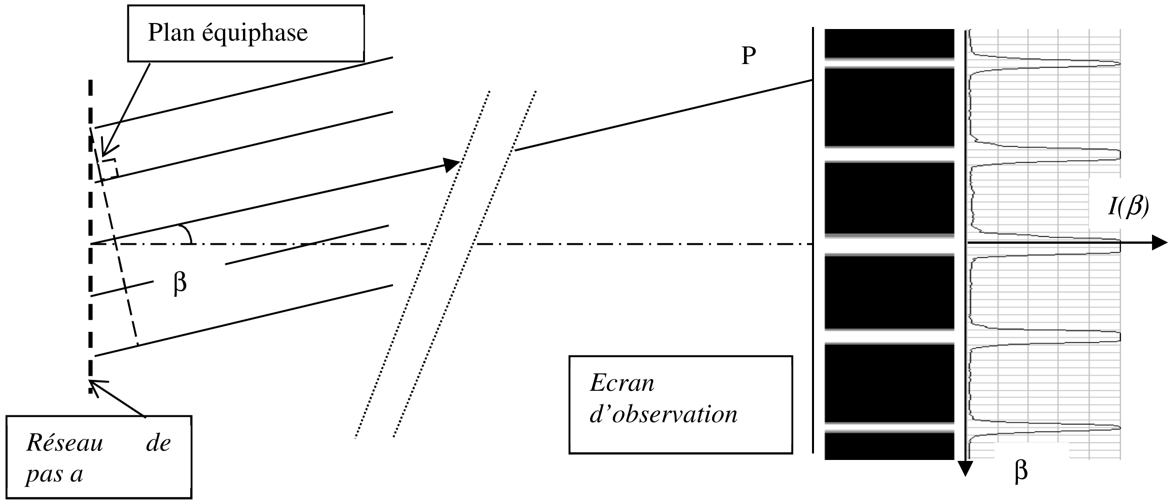
INTRODUCTION AUX RESEAUX

Prérequis : revoir le cours d'onde, les TP de L2 concernant la diffraction par une fente simple et les interférences à deux ondes.

I. DESCRIPTION, DEFINITIONS ET APPROCHE THEORIQUE

A. PRESENTATION

Un réseau est constitué par la répétition périodique d'un motif, suivant une, deux ou trois directions de l'espace. Dans les expériences classiques d'optique le motif est une fente (ou un trait) de largeur -s- et de hauteur h >> s. Ce motif est répété suivant une seule direction de l'espace et la périodicité permet de définir le pas du réseau -a-. Chaque fente, individuellement, va donner lieu au phénomène de diffraction : elle devient une source secondaire de lumière. Les N sources secondaires, que constituent les N fentes éclairées, vont participer au phénomène d'interférence. Il s'agit, dans ce cas, d'interférences à N ondes par division du front d'onde.



1. Incidence normale

La présentation classique adoptée dans les manuels permet de définir l'intensité I(β) mesurée en un point P d'un écran d'observation, dans les conditions de Fraunhofer (voir figure ci-dessus) :

$$I(\beta) = I_0 \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \frac{\sin^2\left(N\frac{\varphi}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \qquad [1]$$

Avec I_0 l'intensité mesurée sur l'écran à $\beta=0$ (partie non déviée du faisceau), N le nombre de fentes éclairées (i.e. le nombre de sources secondaires), φ le déphasage lié à la différence de marche introduite entre deux motifs successifs.

On remarque que :

- $\frac{\sin u}{u}$ est la fonction décrivant la diffraction par une fente, appelée sinus cardinal. Avec

$u = \frac{\pi}{\lambda} s \sin(\beta)$ et λ la longueur d'onde de l'onde incidente, s la largeur de fente et β l'angle entre la normale au réseau et la direction du rayon lumineux allant au point P.

- $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin(\beta)$ avec λ la longueur d'onde de l'onde incidente, a le pas du réseau et β l'angle entre la normale au réseau et la direction du rayon lumineux allant au point P.

Les maxima de cette fonction correspondent aux directions β pour lesquelles on observe des interférences constructives i.e. des maxima d'intensité lumineuse. Les positions angulaires des maxima principaux d'intensité sont alors données par la relation :

$$\sin\beta = \frac{k\lambda}{a} \qquad [2]$$

où k est l'ordre d'interférence.

Entre ces maxima on n'observe normalement pas de lumière : minima d'intensité.

Dans ce TP nous vous proposons, entre autre choses, de vérifier la relation [2] pour différentes conditions d'observation.

Le plus souvent la relation [2] s'utilise pour un montage en incidence normale (conditions de Fraunhofer). Cependant le réglage en incidence normale n'est pas toujours possible et on place parfois le réseau en incidence oblique, volontairement ou involontairement.

2. Incidence oblique

Comme précédemment on s'intéresse aux directions β pour lesquelles on observe des interférences constructives (i.e. maxima principaux). En écrivant l'égalité entre l'expression géométrique de la la différence de marche et la condition d'interférence constructive, on trouve la relation entre les angles et la longueur d'onde.

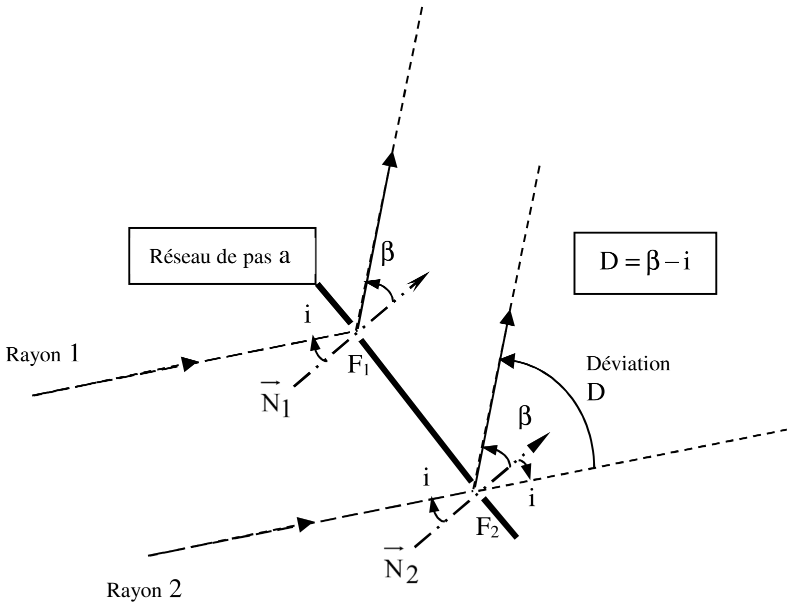
La relation [2] devient alors :

$$(\sin\ i + \sin\ \beta) = \frac{k\lambda}{a} \qquad [3]$$

Avec n= 1/a (nombre de motif par unité de longueur).

On peut montrer (à faire par vous même) que l'angle de déviation D présente un minimum pour une valeur donnée de l'angle d'incidence i. Dans ce cas on peut également montrer que, au minimum de déviation, β = - i et que D_m= $2i_m$. On réécrit [3] qui devient, dans ces conditions :

$$2\sin\frac{D_m}{2} = kn\lambda \qquad [4]$$



On constate que l'angle de déviation D_m au minimum de déviation, i_m, est fonction de l'ordre d'interférence k. On devra donc rechercher le minimum de déviation pour chaque ordre k.

On n'a, jusqu'alors, envisagé que le cas d'une source monochromatique, bien que la plupart des sources soient polychromatiques. Prenons l'exemple d'une source offrant un spectre discret telle que la lampe à vapeur de mercure : celle ci présente de nombreuses raies (cf. p. xx). A chaque ordre k, le spectre entier des raies sera reproduit. Par ailleurs l'angle de déviation $\beta(k,\lambda)$ associé à chaque raie pour chaque ordre sera d'autant plus grand que n est élevé. L'écart angulaire $\Delta\beta$ entre deux raies consécutives est donc un critère important pour le choix d'un réseau : on définit alors le pouvoir de résolution $\Re$ afin de pouvoir comparer différents réseaux ou différentes techniques de séparation des raies : prismes, réseaux, interféromètres,….

B. POUVOIR DE RESOLUTION D'UN RESEAU

L'intérêt de systèmes optiques comme un réseau (ou un interféromètre de Fabry-Perot) est de pouvoir séparer deux raies de longueur d'onde (λ) et ($\lambda + \Delta\lambda$) très proches l'une de l'autre lorsque la lumière incidente n'est pas purement monochromatique. La capacité qu'offre un appareil à résoudre, c'est-à-dire à distinguer, deux raies de longueurs d'onde très proches est alors caractérisée par son pouvoir de résolution noté $\Re$.

Lorsqu'une lumière monochromatique de longueur d'onde λ éclaire un réseau de pas a, cette lumière est diffractée et la position angulaire du $k^{ième}$ maximum d'intensité diffractée (c'est-à-dire l'ordre k) est donnée par la relation [2] ou, pour des petits écart angulaires tels que l'on puisse assimiler le sinus et l'angle, par $\alpha_k=\Delta\beta$, d'où:

$$\alpha_k = \frac{k\lambda}{a}$$

Si cette lumière incidente est composée de deux longueurs d'onde λ et $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$, les maxima du $k^{ième}$ ordre se trouvent respectivement aux angles :

$$\alpha_k = \frac{k\lambda}{a} \qquad \text{et} \qquad \alpha_{k'} = \frac{k\lambda'}{a}$$

On peut montrer* que dans le cas du réseau, les deux raies de longueur d'onde λ et λ' sont séparées (à l'ordre k) si les positions angulaires des maxima de cet ordre vérifient la relation :

$$\frac{k}{a}(\lambda - \lambda') \geq \frac{\lambda}{L}$$

avec L la largeur du réseau qui est éclairée.

Le pouvoir de résolution est défini d'une façon générale comme : $\Re = \dfrac{\lambda}{\Delta\lambda}$, où $\Delta\lambda$ est l'écart minimal entre deux longueurs d'onde pour pouvoir les distinguer. Dans notre cas,

$$\Re = \frac{\lambda}{\lambda' - \lambda} = k\frac{L}{a}$$

soit, si N est le nombre de traits (ou de fentes) éclairés du réseau : $\Re = kN$

Le pouvoir de résolution d'un réseau dépend donc de l'ordre k et du nombre total de traits (ou de motif) que l'on peut éclairer. On peut ainsi, pour une taille de réseau donnée, augmenter le pouvoir de résolution en diminuant le pas -a-. En revanche, deux réseaux de même pas -a- peuvent ne pas avoir le même pouvoir de résolution : celui de plus grande dimension, pour lequel N sera plus grand, aura la meilleure résolution si on peut l'éclairer sur toute sa largeur.

C. INTERVALLE SPECTRAL LIBRE

Lorsque l'on définit le pouvoir de résolution, les deux raies que l'on cherche à résoudre sont très proches l'une de l'autre, c'est-à-dire qu'elles doivent appartenir au même ordre d'interférence k. Cependant, pour un angle de diffraction β donné, on peut avoir superposition de deux maxima correspondants à deux longueur d'onde différentes λ_1 et λ_2, d'ordre respectifs k_1 et $k_2 = k_1 + 1$. Cette superposition survient lorsque les deux relations suivantes sont vérifiées simultanément :

$$\sin\beta = k_1\frac{\lambda_1}{a} \qquad \sin\beta = k_2\frac{\lambda_2}{a}$$

soit:

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{k_1}{a(\sin\beta)} \qquad \frac{1}{\lambda_2} = \frac{k_1+1}{a(\sin\beta)}$$

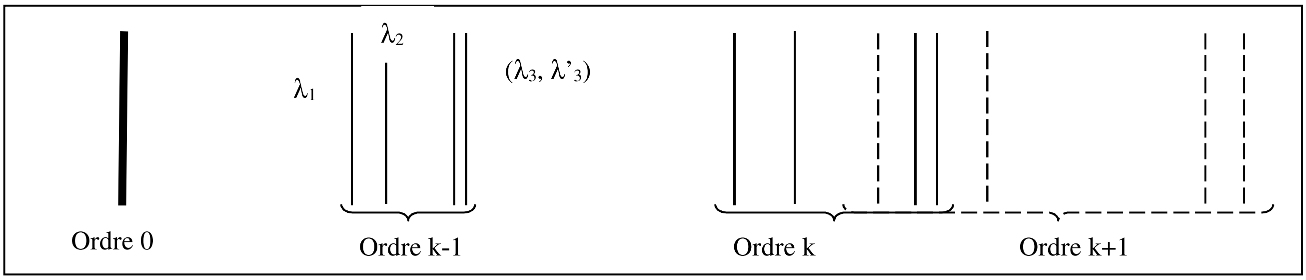
* On pourra consulter « Optique instrumentale Optique de Fourrier », J. Surrel, Ellipses. A la BU : côte 535 SUR

Il y a superposition de spectres d'ordres différents dès que l'écart entre les deux nombres d'onde* $\Delta(\frac{1}{\lambda}) = \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}$ est inférieur ou égal à :

$$\Delta(\frac{1}{\lambda}) = \frac{1}{a\ (\sin\beta)}$$

Remarque : $\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1\lambda_2} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$

avec : $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ et $\lambda^2 = <\lambda>^2 = \lambda_1\lambda_2$



On appelle $\Delta(\frac{1}{\lambda})$ l'intervalle spectral libre (ISL). Il est directement proportionnel au nombre de traits par unité de longueur -n- (inversement proportionnel au pas -a- du réseau), et dépend de l'inverse de l'angle sous lequel est effectué l'observation, donc de l'inverse de l'ordre d'interférence k. Pour un réseau de pas donné, plus l'ordre k est élevé plus l'ISL est réduit.

Lorsque l'étendue du spectre de la source de lumière est supérieure à la largeur de l'ISL, on observe alors la superposition de maxima d'interférence correspondant à des ordres k différents : on appelle cela le chevauchement d'ordre.

* on appelle nombre d'onde le terme $1/\lambda$, qui s'exprime le plus souvent en cm^{-1} (cf. TP Chimie-Spectroscopie)

II. DISPOSITIF EXPERIMENTAL, MATERIEL ET MANIPULATIONS

<u>But:</u>
Observer et interpréter les figures de diffraction obtenues par les réseaux, apprendre à régler et utiliser une platine goniométrique, vérifier expérimentalement la relation [2] (page xx), visualiser l'Intervalle Spectral Libre.

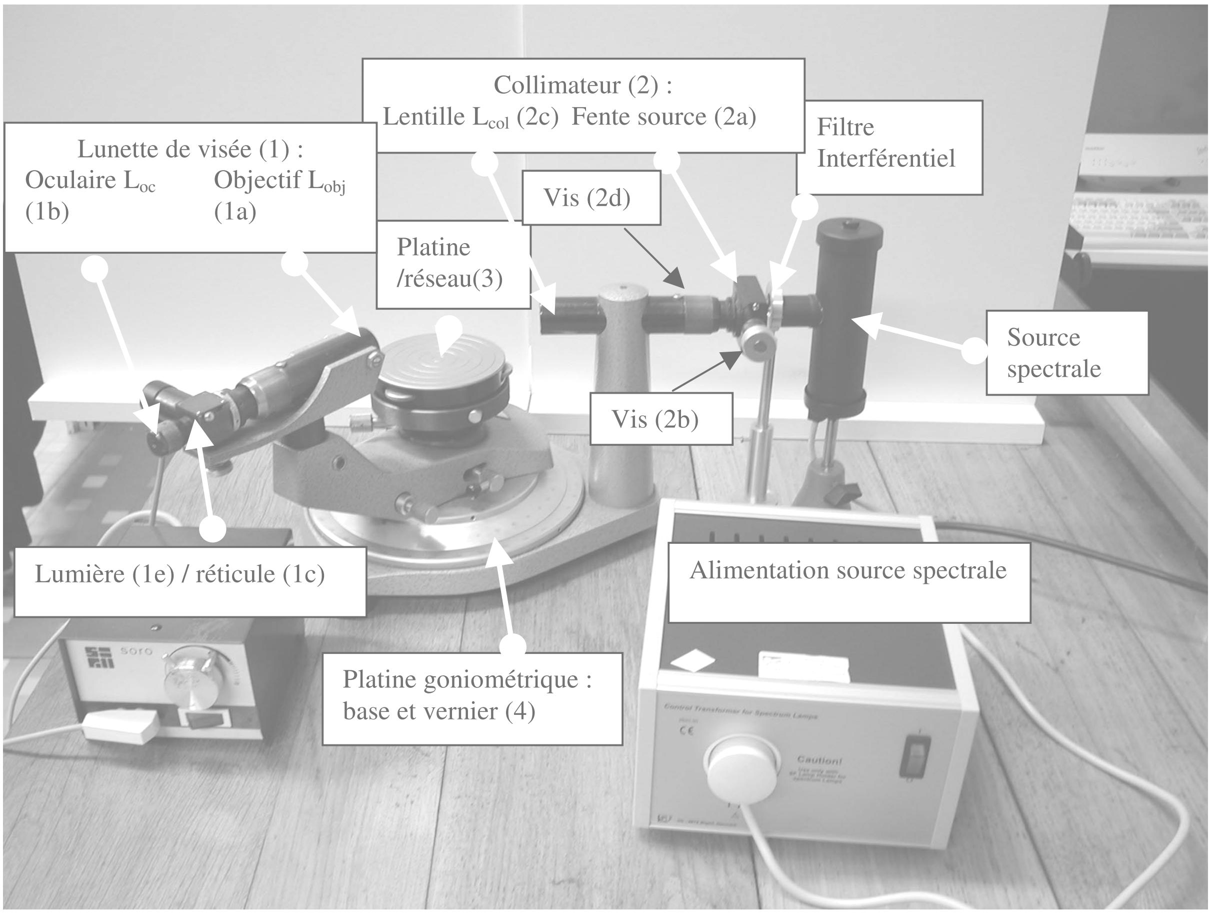
A. DESCRIPTION DU MATERIEL

1. Observations qualitatives

<u>Matériel</u> : un laser, une diapo (N= 2, 3, 4 fentes identiques), trois réseaux de pas différents, un écran blanc.

On utilise un laser pour éclairer, en lumière monochromatique, une diapo (N= 2, 3, 4 fentes identiques) puis trois réseaux différents. La figure de diffraction obtenue est projetée sur un écran blanc. On s'attachera à retrouver dans chaque figure la partie due à la diffraction et la partie due aux interférences. On notera également l'évolution des figures de diffraction (maxima principaux, secondaires, étendue de la figure, intensité,…) en fonction des différents réseaux.

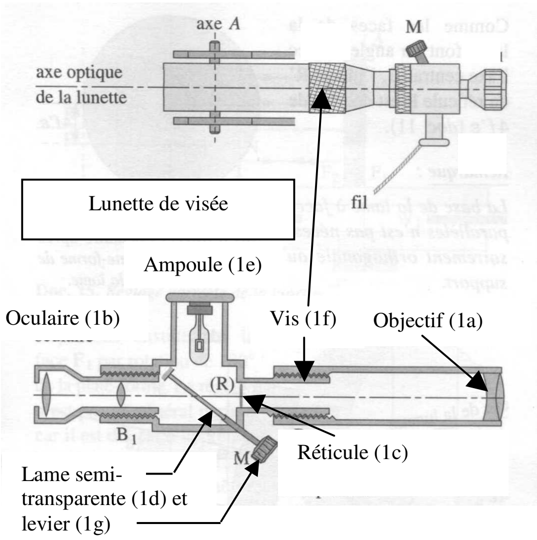
2. Description de la platine goniométrique et du matériel associé

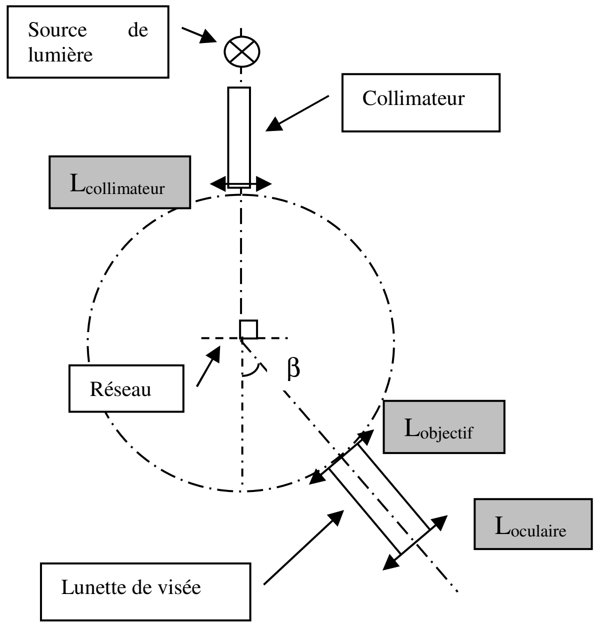


<u>Matériel</u> : une lampe spectrale à vapeur de mercure, un filtre interférentiel pour la raie verte du mercure, un réseaux « Leybold » sur verre, une platine goniométrique.

La platine goniométrique permet d'effectuer des mesures d'angles. Elle est équipée d'une base fixe graduée de 0 à 360° (4),d'un collimateur (2), d'une platine mobile sur laquelle est centré le réseau (ou un prisme) (3) et d'une lunette de visée (1).

a) La lunette de visée

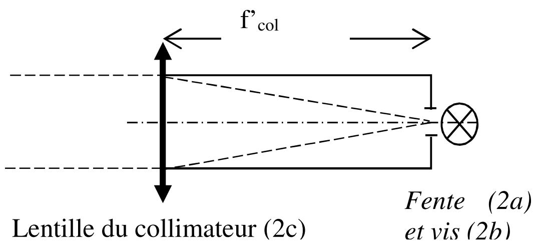




C'est un système centré constitué de deux lentilles, l'objectif L_{ob} (1a) et l'oculaire L_{oc} (1b) et d'un réticule (1c). Deux accessoires permettent de faciliter le réglage : la lame semi-transparente (1d) et une ampoule (1e) qui permet d'éclairer le réticule. On peut régler la position relative des deux lentilles avec la vis (1f) et déplacer la lame avec le levier (1g). On peut faire tourner la lunette autour du centre C de façon à explorer un large secteur angulaire [β].

b) Le collimateur

Il permet de former un faisceau de lumière parallèle à partir d'une source quelconque. Constitué d'une fente (2a) de largeur s_0 ajustable avec la vis (2b). la fente est placée au foyer de la lentille L_{col} (2c) afin d'obtenir un faisceau de lumière parallèle. On peut modifier la position de la lentille en jouant sur la vis (2d).



3. Réglage du goniomètre[1]

Le réseau est éclairé par un faisceau de lumière parallèle et la lumière diffractée est également, pour une direction β donnée, en faisceau parallèle : ce sont les conditions de diffraction de Fraunhofer.

Le goniomètre est réglé lorsque :

- L'oculaire est réglé pour la vue de l'utilisateur.
- La lunette est réglée en afocal (i.e. à l'infini).
- La normale au réseau est colinéaire à l'axe optique de la lunette et l'axe de la platine est d'une part orthogonal à l'axe optique de la lunette et passe d'autre part par le milieu du réseau.
- Les axes optique de la lunette et du collimateur sont colinéaires.

[1] la méthode est particulièrement bien décrite dans l'ouvrage « Optique », 1ère année MPSI-PCSI_PTSI, collection H-Prépa, Hachette. A la BU : 2ème étage côte « 535 opt ».

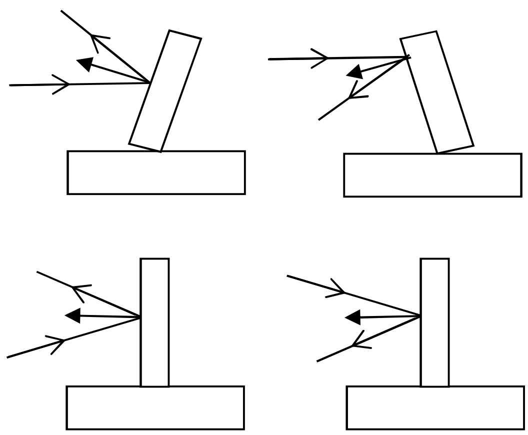
Attention à ne pas visser ou dévisser « à fond », à ne pas forcer les vis, à ne pas mettre ses doigts sur le réseau, le filtre, les lentilles,…, bref soyez soigneux(ses) !

On remarquera que les éléments mobiles (lunette, platine) disposent d'une vis de blocage et d'une vis de déplacement fin.

1. L'oculaire est réglé lorsque l'on voit le réticule net. Pour effectuer ce réglage, on peut basculer horizontalement le levier (1g) de façon à éclairer le réticule (fond clair, réticule sombre) puis tourner l'oculaire pour régler la netteté. Ce réglage doit être effectué pour chaque observateur mais ne sera plus modifié avant l'aboutissement de la procédure de réglage.

2. Réglage de la lunette en afocal : on règle grossièrement la lunette puis la platine de support pour quelles soient horizontales. On place ensuite un miroir[2] ***centré sur cette platine*** : si le réticule est au foyer de la lentille objectif, son image par (L_{obj}, M, L_{obj}) est dans le plan du réticule. On devra donc régler le tirage de la lunette, avec la vis (1f), afin de voir net simultanément le réticule et son image. ***Cette méthode est appelée autocollimation.***
   Pour faciliter ce réglage on laisse la lame semi-transparente en position basculée pour éclairer le réticule.

3. Réglage des axes : lorsque l'axe de la lunette est colinéaire à la normale au réseau, le trait horizontal et le trait vertical du réticule sont confondus avec leurs images respectives. Pour régler la position horizontale, on ajuste par approximation successives la position de la platine de support du réseau/miroir (molettes (3a,b,c)) et la position de la lunette (vis sous la lunette). A chaque étape, on tournera la platine de 180° pour vérifier l'alignement.



Une fois le réglage effectué, on ramène le levier (1g) dans sa position initiale (fond sombre, réticule clair).

4. Placer la source spectrale au niveau de la fente (s_0) du collimateur et effectuer une rotation de la lunette de façon à faire coïncider l'image de la fente et le trait vertical du réticule. Réduire au minimum la largeur s_0 de la fente avec la vis (2b) puis régler la position de la lentille du collimateur (L_{col}) de façon à obtenir une image nette de la fente source. Le collimateur est alors réglé.

5. Amener le réticule en coïncidence avec l'image de la fente source (en tournant la lunette) et l'image du réticule en tournant le réseau.

A ce stade le goniomètre est réglé pour effectuer des mesures dans les meilleures conditions. Il ne faut plus modifier les réglages ni la position du réseau sur la platine.

On pourra cependant régler la largeur de fente (s_0) et l'oculaire pour effectuer les mesures dans des conditions d'observation confortables.

Lire et noter la valeur α_0 de l'angle sur la platine et sur le vernier : ce sera le « zéro » pour les mesures suivantes. On remarquera que le vernier est gradué en en dégré et minutes (°, ')

B. MESURES EFFECTUEES EN INCIDENCE NORMALE

<u>Remarque préliminaire</u> : il faudra régler la position de la source spectrale (en particulier en hauteur) afin d'optimiser l'intensité des spectres observés.

[2] Si le réseau est suffisamment réfléchissant (cas d'un réseau en verre) on aura avantage à faire le réglage directement avec le réseau, à la place du miroir.

1. Observations qualitatives en lumière polychromatique

- Utiliser la source spectrale à vapeur de mercure (Hg)
- Tourner la lunette à gauche puis à droite por observer les spectres à différents ordres
- Observer le spectre du premier ordre, se placer sur la raie jaune et jouer sur la largeur de fente s_0. Observations ?
- Observer les ordres supérieurs à k=1 : que peut on dire des ordres pairs ?
- A partir de quel ordre observe-t-on le chevauchement d'ordre ?

2. Mesures en lumière polychromatique

Vérifier que l'on a bien relevé la valeur α_0 de l'ordre 0. Pour les 3 premiers ordres (k=1, 2 ,3) mesurer l'angle $\alpha(k, \lambda)$ de diffusion pour les raies indigo, jaune et vert. Attention à ne pas confondre l'indigo (bleu/violet assez intense) et le violet. Pour le jaune on prendra une position moyenne sur le doublet. Calculer les valeurs $\beta(k, \lambda) = \alpha(k, \lambda) - \alpha_0$ et représenter graphiquement ces résultats en traçant sur papier millimétré $\sin\beta(k, \lambda)=f(k)$.

Mesurer également l'angle $\beta(k=5, \lambda = \text{vert})$ pour la raie verte du mercure.

3. Etallonage du réseau

Utiliser les courbes $\sin\beta(k, \lambda)=f(k)$. pour déterminer le nombre de trait par unité de longueur constituant le réseau. On donne :

- λ_{jaune} = 579 nm
- λ_{vert} = 546,1 nm
- λ_{indigo} = 435,8 nm
- $\lambda_{violet\ I}$ = 407,8 nm
- $\lambda_{violet\ II}$ = 404,6 nm

C. Observation du minimum de deviation

Cette partie est facultative : à ne faire que si l'on a compris et réalisé les réglages et les mesures précédentes.

Avant de continuer, il est recommandé de lire et de comprendre la description théorique du minimum de déviation.

- Intercaler le filtre interférentiel entre la lampe spectrale et la fente source.
- Régler l'ouverture de la fente source pour que l'intensité observée soit suffisante
- Se placer sur le spectre du 5ème ordre et effectuer une rotation de la platine du réseau de quelques degrés vers la gauche puis vers la droite. Chercher la position pour laquelle $|\beta(k,\lambda)|$ tend vers un minimum.
- Relever la valeur de $|\beta_{min}|$ pour l'ordre $|k| = 5$ et la comparer avec la valeur obtenue en incidence normale.