

TP-COURS N°3 - Spectroscopie à réseau

PC[★]2 - Saint-Louis

02 et 09 décembre 2008

1 Introduction - Présentation du réseau par transmission

1.1 Présentation

Un réseau plan est une pupille dont la fonction de transmission (en amplitude) ne varie que selon une direction et de façon périodique. Pratiquement, un réseau est constitué d'une suite de N motifs identiques. Un réseau par transmission peut être représenté par un plan opaque percé d'un grand nombre (N) d'ouvertures rectangulaires, parallèles (les *traits du réseau*), équidistants de a (le *pas du réseau*), éclairé sur une largeur totale $L = Na$. Les traits du réseau ont une longueur H et une largeur $b \ll H$. On pose $n = \frac{1}{a}$, nombre de traits par unité de longueur.

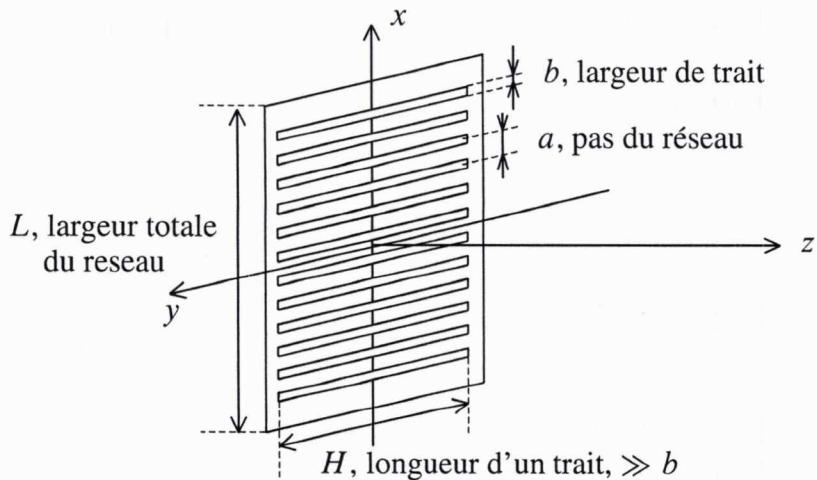


FIG. 1 – Réseau.

Les ordres de grandeur pour les réseaux couramment utilisés sont :

- n : quelques centaines de traits par millimètre ;
- a : quelques dizaines de micromètres ;
- b : un micromètre ;
- H : quelques centimètres ;
- N : quelques milliers.

REMARQUE : Le pas du réseau est parfois donné en nombre de traits par pouce. On rappelle que 1 pouce = 2,54 cm.

La qualité du réseau est liée à la périodicité de la fonction de transparence. Les traits doivent être rigoureusement identiques, un défaut de périodicité donnant par exemple des figures de diffraction parasites. Les réseaux les plus précis sont les *réseaux calibrés* qui sont obtenus en gravant avec une fine pointe de diamant une surface métallisée

En enregistrant la figure d'interférence de deux ondes planes, on peut fabriquer un *réseau holographique* d'excellente qualité. Ces deux types de réseaux sont très coûteux. A partir de réseaux calibrés, on fabrique des répliques en déposant sur le réseau original une résine que l'on détache et que l'on fixe sur une plaque de verre. Ces répliques sont souvent de très bonne qualité.

1.2 Premières observations

1.2.1 Réseau éclairé par un laser

Observer la manipulation effectuée en démonstration : un réseau est éclairé, en incidence quasi-normale, par un laser, l'observation se fait sur un mur de la salle, situé loin du réseau.

Décrire **précisément** ce que vous voyez.

1.2.2 Observation de la lumière de la salle

Observer à l'œil nu la lumière de la salle avec un des réseaux présents sur votre poste de TP. Décrire **précisément** ce que vous voyez. Déduire de vos observations la direction des traits du réseau (dans quelle direction les traits diffractent-ils la lumière ?). Prendre un réseau de pas différent (si possible). Interpréter qualitativement la différence entre les deux observations.

2 Étude théorique sommaire du réseau par transmission

2.1 Formule des réseaux

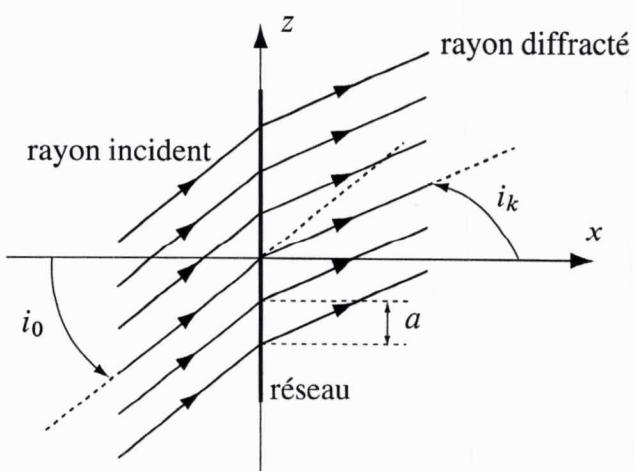


FIG. 2 – Diffraction par un réseau.

Le réseau est éclairé par une onde plane monochromatique, de longueur d'onde λ , la direction du vecteur d'onde de l'onde incidente fait l'angle i_0 avec la normale au réseau.

REMARQUE : Le réseau ayant de grandes dimensions dans la direction des traits, il ne diffracte pas la lumière dans cette direction. La lumière diffractée reste donc dans le plan de la figure 2.

L'éclairement diffracté à l'infini n'est notable que dans certaines directions faisant l'angle i_k avec la normale au réseau, appelées directions des *maxima principaux*. Les angles sont définis à partir de la normale au réseau orientée dans le sens de propagation de la lumière. Ils sont comptés positivement autour de l'axe Oy , parallèle aux traits du réseau.

Retrouver l'expression de la différence de marche δ à l'infini, dans une direction donnée i , entre les ondes diffractées par les points homologues de deux traits consécutifs du réseau.

A quelle condition sur δ observera-t-on, dans la direction i , un maximum d'éclairement ? En déduire la *formule des réseaux* donnant la direction des maxima principaux :

$$\boxed{\sin i_k - \sin i_0 = k \frac{\lambda}{a}} \quad (1)$$

k étant un entier relatif, appelé *ordre de diffraction*.

Pourquoi les maxima observés sont-ils très fins ?

Que devient cette formule des réseaux pour un réseau par réflexion ?

REMARQUE : Le nombre d'ordre est limité par la condition $-1 \leq \sin i_k \leq 1$.

2.2 Exercice : éclairement diffracté

2.2.1 Éclairement diffracté.

Montrer que l'éclairement de la lumière diffractée par le réseau dans la direction i est :

$$\mathcal{E}(i) = \mathcal{E}_0 \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi b}{\lambda} (\sin i - \sin i_0) \right)}{\frac{\pi b}{\lambda} (\sin i - \sin i_0)} \right)^2 \left(\frac{\sin \left(N \frac{\pi a}{\lambda} (\sin i - \sin i_0) \right)}{N \sin \left(\frac{\pi a}{\lambda} (\sin i - \sin i_0) \right)} \right)^2 \quad (2)$$

où \mathcal{E}_0 est l'éclairement maximal.

Identifier le terme de diffraction et le terme d'interférence dans l'expression de $\mathcal{E}(i)$.

Dans la suite, on pose $\varphi = \frac{2\pi a}{\lambda} (\sin i - \sin i_0)$.

Pour la première courbe, on a considéré les fentes infiniment fines, pour la deuxième, on a tenu compte de leur largeur non nulle, donc du terme de diffraction.

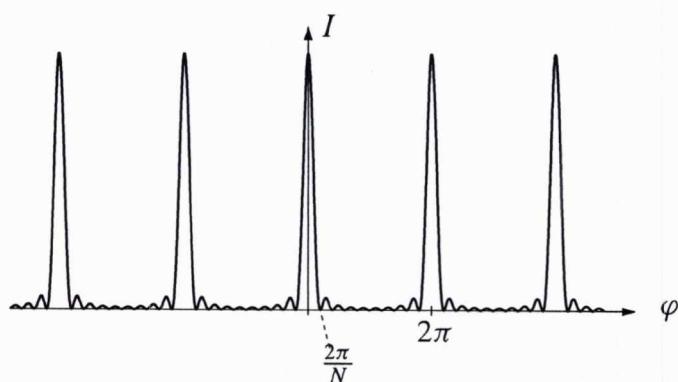


FIG. 3 – $I(\varphi) = \left(\frac{\sin(N\varphi/2)}{N \sin(\varphi/2)} \right)^2$, $N = 10$

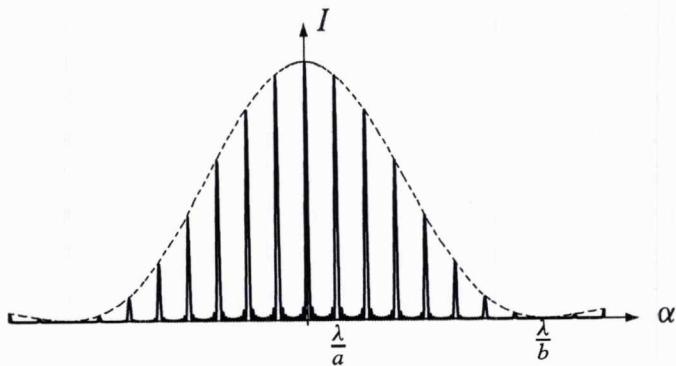


FIG. 4 – $I(\alpha) = \sin_C^2\left(\frac{\pi b \alpha}{\lambda}\right) \left(\frac{\sin(N\varphi/2)}{N \sin(\varphi/2)}\right)^2$, $N = 10$, $b = 5\lambda$, $a = 8b$ et $\alpha = \sin i - \sin i_0$

2.2.2 Résolution intrinsèque.

Si on suppose la fente source infiniment fine, la résolution du réseau est limitée par le fait que les pics ne sont pas infiniment fins. Si on adopte le critère de Rayleigh, montrer que deux raies de longueur d'onde $\lambda_1 = \lambda_m - \frac{\Delta\lambda}{2}$ et $\lambda_2 = \lambda_m + \frac{\Delta\lambda}{2}$ seront séparées à l'ordre k si :
 $\Delta\lambda > \frac{\lambda_m}{kN}$.

On appelle *pouvoir de résolution intrinsèque* la quantité : $R = \frac{\lambda_m}{\Delta\lambda}$.

Montrer que : $R = kN$.

Dans la réalité, nous verrons que ce pouvoir de résolution n'intervient quasiment pas, la résolution de l'instrument étant essentiellement limitée par la largeur de la fente source.

2.3 Conclusion temporaire

Expliquer les observations effectuées au paragraphe 1.2, en particulier le caractère dispersif de la diffraction par le réseau. Combien voit-on de maxima principaux ?

Le caractère dispersif du réseau va être utilisé pour mesurer des longueurs d'ondes. Pour ce faire, il nous faudra créer un éclairage incident parallèle, observer à l'infini et mesurer des angles. Le *goniomètre* est l'appareil tout désigné pour répondre à ces besoins. Étudions-le et réglons-le avant d'entrer dans le vif du sujet : le réseau !

3 Le goniomètre

3.1 Présentation du goniomètre

Le schéma du goniomètre BOUTY est fourni en deux vues ci-dessous (goniomètre de précision).

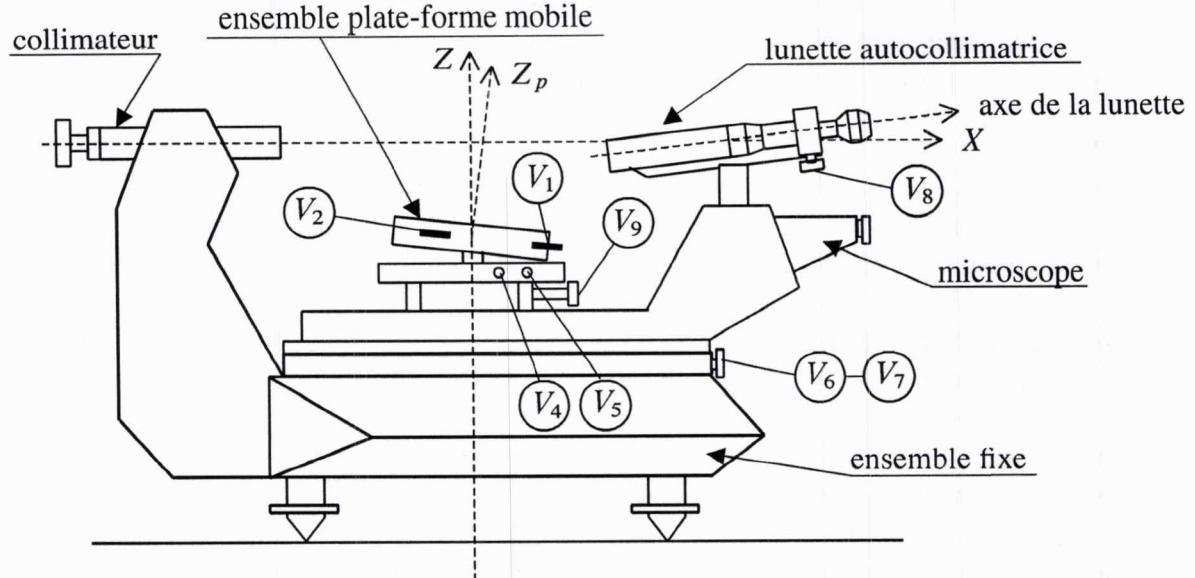


FIG. 5 – Vue de face

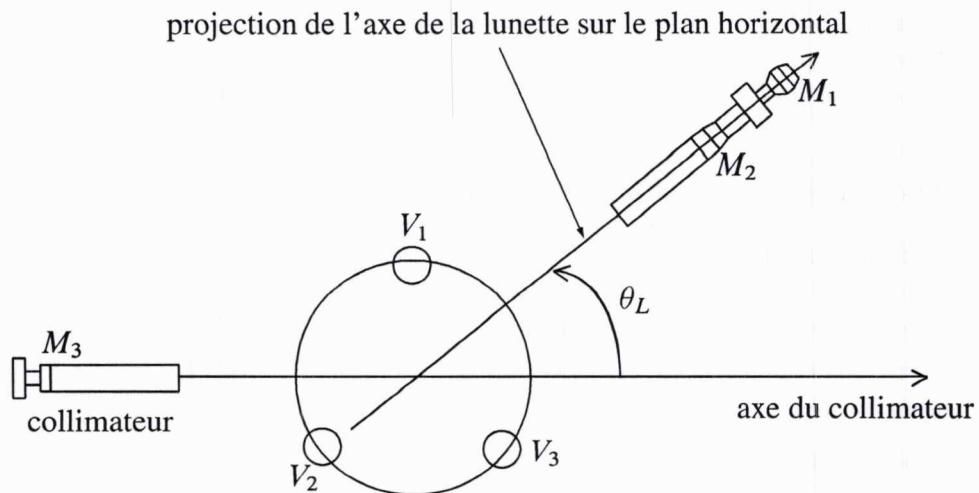


FIG. 6 – Vue de dessus

Attention ! Ne pas toucher aux vis V_8 , V_1 , V_2 et V_3 ni à la lame de verre qui se trouve sur la plate-forme, le réglage de l'axe optique de la LAC (voir paragraphe 3.5) ayant été préalablement effectué.

Nous observons sur l'appareil :

- le collimateur et sa molette de réglage ;

- la lunette autocollimatrice (LAC), ses deux molettes de réglage (l'une pour l'objectif, l'autre pour l'oculaire), sa vis de réglage d'orientation par rapport à l'axe du goniomètre (V_8) sur la partie supérieure de son bras, sa vis de blocage de rotation V_6 et sa vis tangente de rotation lente V_7 , active uniquement quand la vis V_6 est bloquée, sur la partie basse du bras ;
- la platine à deux plateaux, ses trois vis calantes V_1 , V_2 , V_3 de réglage d'orientation par rapport à l'axe du goniomètre du plateau supérieur, sa vis de blocage de rotation V_4 et sa vis tangente de rotation lente V_5 du plateau inférieur, active lorsque V_4 est bloquée ;
- le cercle gradué, sa lunette et son microscope de lecture.

Par construction :

- le plateau inférieur P_{inf} de la platine porte-réseau est plan, orthogonal à l'axe (OZ) du goniomètre ;
- le plateau supérieur P_{sup} de la platine, d'axe de révolution OZ_P , a une direction orientable sous l'action des trois vis V_1 , V_2 , V_3 ;
- l'ensemble solide des deux plateaux $\{P_{\text{inf}} + P_{\text{sup}}\}$ de la platine peut tourner autour de l'axe du goniomètre sous l'action de deux vis, V_4 (de blocage) et V_5 (tangente, de rotation lente active lorsque V_4 est bloquée) ;
- la hauteur de la platine est réglable grâce à la vis V_9 ;
- le collimateur est fixe, son axe optique OX est orthogonal à l'axe OZ du goniomètre et sa fente d'entrée est parallèle à OZ , de largeur réglable ;
- l'axe optique fixe du collimateur et l'axe optique mobile de la lunette rencontrent l'axe (OZ) ;
- la lunette peut tourner en bloc autour de (OZ), sous l'action des deux vis V_6 (de blocage) et V_7 (tangente, de rotation lente active lorsque V_6 est bloquée), l'angle θ_L repère cette rotation ;
- l'axe optique de la lunette peut tourner autour d'un axe orthogonal à l'axe OZ sous l'action de la vis V_8 ;
- la molette M_1 règle la distance (le tirage) entre l'oculaire et le réticule de la LAC ;
- la molette M_2 règle le tirage entre l'objectif et le bloc oculaire + réticule de la LAC ;
- la molette M_3 règle le tirage entre l'objectif et la fente d'entrée du collimateur.

3.2 Critères de réglages d'un goniomètre

Le goniomètre doit produire une onde plane et permettre d'observer une onde plane. De plus, les montages utilisés nécessitent une géométrie plane. L'axe de la lunette et la normale au réseau doivent décrire des plans et non des cônes autour de l'axe du goniomètre au cours de leurs rotation. Les rayons incidents et émergents de l'instrument doivent être dans le même plan, orthogonal à l'axe du goniomètre.

Le goniomètre est réglé si :

- **la lunette est réglée à l'infini ;**
- **le collimateur est réglé à l'infini ;**
- **l'axe optique de la lunette est orthogonal à l'axe (OZ) du goniomètre ;**
- **l'instrument étudié (ici le réseau) est posé correctement sur la plate-forme mobile, c'est-à-dire si son plan contient l'axe (OZ) du goniomètre.**

3.3 Réglage optique de la lunette autocollimatrice

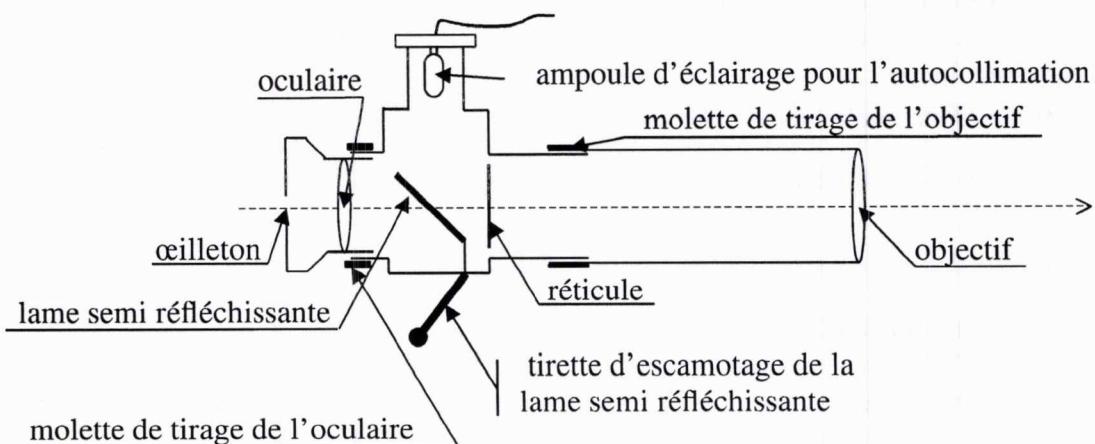


FIG. 7 – Lunette autocollimatrice.

Manipulation : Allumer l’ampoule d’éclairage du réticule de la LAC, coller l’œil contre l’œilleton de l’oculaire et augmenter, grâce à la molette M_1 , le tirage entre le réticule et l’oculaire jusqu’à ce que l’image du réticule cesse d’être nette. Diminuer alors lentement le tirage pour retrouver tout juste la netteté de l’image du réticule.

Question : Où se trouve alors le réticule par rapport à l’oculaire ?

Manipulation : Actionner la tirette pour mettre en place la lame semi-réfléchissante de la LAC. Disposer une surface plane réfléchissante sur le plateau supérieur de la platine (cette surface sera ici la lame de verre présente sur le plateau et qu’on vous a dit de ne pas toucher !). Agir sur la molette M_2 de réglage du tirage de l’objectif par rapport au bloc oculaire + réticule de façon à ce que le réticule R et son image R’ soient nets en même temps. Déplacer l’œil près de l’œilleton et retoucher M_2 éventuellement pour supprimer la parallaxe entre R et R’.

Question : Où se trouve alors le réticule par rapport à l’objectif ? Pourquoi dit-on que l’ensemble objectif + oculaire forme un doublet afocal ? Que vaut son grossissement (en fonction des distances focales de l’objectif et de l’oculaire) ?

Une fois le réglage effectué, il n’est pas affecté par une retouche du réglage de l’oculaire pour l’adapter à la vue d’un nouvel observateur (qui enlèvera ses lunettes s’il en porte pour effectuer les observations à travers la LAC).

3.4 Réglage optique du collimateur

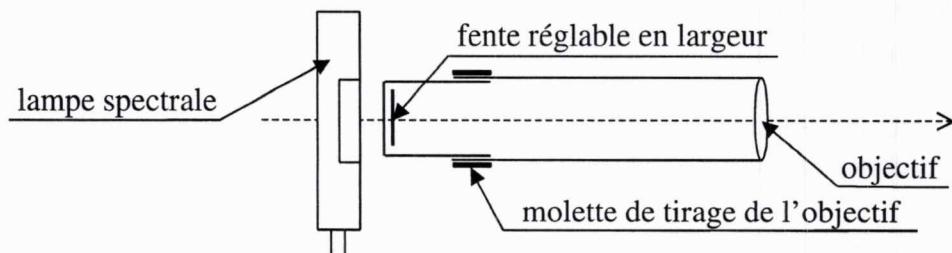


FIG. 8 – Collimateur.

Manipulation : Escamoter la lame semi-réfléchissante de la LAC et supprimer l'éclairage du réticule. Éclairer la fente d'entrée du collimateur (large de 1 mm environ) avec une lampe spectrale. Placer la LAC préalablement réglée face au collimateur et observer l'image de la fente. Agir sur la molette M_3 de tirage du collimateur jusqu'à ce que l'image de la fente soit nette, en particulier sur les bords. Affiner alors la fente du collimateur.

Question : Dans quel plan se trouve la fente ?

REMARQUE : ce réglage peut se faire après celui de l'axe optique de la lunette.

3.5 Réglage de l'axe optique de la lunette

Ce réglage a pour but de rendre l'axe optique de la lunette parallèle à P_{inf} , donc perpendiculaire à l'axe OZ . L'axe optique de la lunette décrira alors dans sa rotation autour de l'axe OZ un plan perpendiculaire à cet axe et non un cône. L'axe mobile de la lunette restera ainsi perpendiculaire à l'axe du goniomètre OZ , comme l'axe fixe du collimateur.

Ce réglage a été effectué préalablement. Ne pas le reprendre dans ce TP-cours (sauf s'il reste du temps à la fin). Vous l'effectuerez dans le TP correspondant de la deuxième série.

Un protocole de réglage est donné dans l'annexe 1. Dans un premier temps, il vous suffit donc de le lire, de le comprendre, et de répondre aux questions posées. Selon le mode de réglage utilisé, on peut aussi rendre parallèles les axes de P_{sup} et de P_{inf} . Dans ce cas, le plan mobile de P_{sup} restera, dans sa rotation autour de OZ , perpendiculaire à OZ .

Vérifier simplement que le réglage a bien été fait en autocollimatant sur la lame de verre : le fil horizontal du réticule et son image doivent être confondus et le rester après rotation de la plate-forme de 180° . Si un léger décalage subsiste, terminer le réglage.

3.6 Positionnement du réseau sur la plate-forme

Au cours de ce réglage, il ne faut pas modifier l'orientation de la lunette.

Manipulation : Placer le réseau sur une hauteur du triangle équilatéral formé par les trois vis calantes, exactement à la place de la lame à faces parallèles qui a servi au réglage précédent et que vous n'avez pas touché jusqu'à présent (voir figure 13, annexe 1, en remplaçant la lame à faces parallèles par le réseau). Autocollimater sur le réseau. A l'aide de la vis calante la plus proche de la LAC (V_1 ici), faire coïncider le réticule R avec son image R' . Le réseau est alors dans le plan orthogonal à l'axe de la lunette.

REMARQUE : si ce réglage n'est pas possible (une des vis arrive en bout de course), tourner le réseau de 180° .

Régler ensuite le parallélisme des traits du réseau avec l'axe du goniomètre : pour cela, limiter la fente source à un point et, par action sur V_3 , aligner les ordres du réseau avec le fil horizontal du réticule. Pour obtenir ces points (ou plus simplement une demi fente source), on limite la dimension verticale de la fente du collimateur à l'aide d'une lame de rasoir par exemple.

Le réseau est bien positionné par rapport à l'axe de rotation. **On n'y touchera plus, on fera simplement tourner la plate-forme.**

3.7 Mesure d'un angle

Pour mesurer un angle avec le goniomètre, il faut pointer avec précision la raie visée. Pour cela, amener de fil vertical du réticule de la LAC le plus près possible de la raie à mesurer (la

fente du collimateur doit être la plus fine possible pour qu'une mesure soit faisable), **bloquer** ensuite la LAC grâce à la vis V_6 et affiner le pointage grâce à la vis V_7 . La lecture s'effectue enfin grâce à la lunette de lecture.

4 Étude du réseau

4.1 Premières observations sur la plate-forme

Manipulation : Orienter la plate-forme du goniomètre de telle sorte que l'axe du collimateur soit approximativement perpendiculaire au plan du réseau. Éclairer avec une lampe mercure-cadmium. Affiner le plus possible la fente du collimateur.

Observer les différents ordres d'abord à l'œil nu à travers le réseau, puis à travers la LAC du goniomètre.

Question : Quel est l'intérêt d'utiliser une fente source plutôt qu'une source ponctuelle ? Pourquoi la choisit-on la plus fine possible ? Que verrait-on si la fente source n'était pas verticale ? et si les traits du réseau n'étaient pas verticaux (alors que la fente du collimateur l'est) ?

Observation : Compter le nombre de spectres visibles. Justifier la valeur trouvée en utilisant la formule des réseaux, en supposant connu le pas du réseau (le lire sur le réseau lui-même !), pour une longueur d'onde donnée, la raie verte intense du mercure par exemple ($\lambda = 546 \text{ nm}$).

Observation : Dans un spectre d'ordre donné, comment varie i_k avec la longueur d'onde λ ?

Que se passe-t-il pour l'ordre zéro ?

Question : A partir de la formule des réseaux, étudier les variations de i_k avec λ , avec k puis avec $n = \frac{1}{a}$. Expliquer les observations précédentes, en particulier l'ordre zéro.

Question : Déterminer, pour un réseau de pas a éclairé en incidence normale, la condition pour que les spectres d'ordre k et $k + 1$ ne se recouvrent pas. On supposera que les radiations visibles de la lampe mercure-cadmium correspondent à longueurs d'onde comprises environ entre 400 nm et 700 nm.

Observation : Expliquer et observer le mélange des ordres et le recouvrement des spectres. A partir de quel ordre cela se produit-il ?

4.2 Formule des réseaux - Détermination du pas d'un réseau

Nous allons mesurer les directions des maxima principaux des différents ordres visibles, pour une longueur d'onde donnée, et vérifier expérimentalement la formule des réseaux. Nous déduirons des résultats obtenus la valeur du pas du réseau.

La principale difficulté expérimentale est la détermination de l'angle d'incidence i_0 . Nous utiliserons ici le réseau en incidence normale.

Question : Pourquoi ne peut-on se contenter d'observer les images de la fente source sur un écran ?

4.2.1 Réglage de l'incidence normale.

Pour régler le réseau en incidence normale, nous utiliserons les possibilités offertes par l'autocollimation.

Orienter la plate-forme du goniomètre de telle sorte que l'axe du collimateur soit approximativement perpendiculaire au plan du réseau. Éclairer avec la lampe à vapeur de mercure.

Repérer l'ordre 0, le pointer. Mettre en place alors la lame semi-réfléchissante de la LAC. Observer la fente du collimateur (ordre 0), le réticule de la LAC et son image. Tourner la plate-forme jusqu'à mettre coïncidence la fente du collimateur, le réticule et son image. **Bloquer** alors la plate-forme. Ne plus y toucher : le réseau est éclairé en incidence normale.

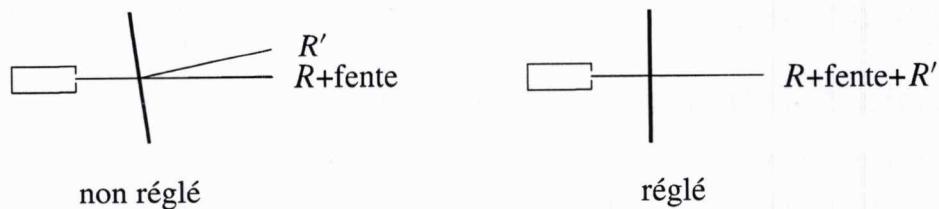


FIG. 9 – Réglage de l'incidence normale.

Justifier le protocole de réglage.

4.2.2 Vérification de la formule des réseaux - Détermination du pas du réseau.

Manipulation :

Mesurer θ_0 (ordre zéro).

Nous allons vérifier la proportionnalité de $\sin i_k$ avec λ et avec k . Une moitié de la classe effectuera la première manipulation, l'autre moitié la seconde.

Première manipulation : Mesurer θ_k (ordre k) pour toutes les raies visibles du mercure dans un ordre k donné (1 ou 2).

Seconde manipulation : Mesurer θ_k dans tous les ordres visibles, pour une raie donnée (la raie verte intense à 546 nm par exemple).

Attention, $i_k = \theta_k - \theta_0$ (faire un dessin ...).

Exploitation des données (à faire pendant la séance de TP) :

L'exploitation des données se fera ou bien sur papier millimétré, ou bien à la calculatrice (en utilisant la régression linéaire et éventuellement le mode tableur) ou bien à l'ordinateur (avec, au choix, les logiciels SYNCHRONIE, EXCEL ou REGRESSI, en utilisant la modélisation par une fonction affine).

- Première manipulation (k fixé) :

Compléter le tableau de mesures suivant :

λ	θ_k	$\sin(\theta_k - \theta_0)$

Tracer la courbe $\sin(\theta_k - \theta_0) = f(\lambda)$.

En déduire la proportionnalité de $\sin(\theta_k - \theta_0)$ avec λ .

- Deuxième manipulation (λ fixée) :

Compléter le tableau de mesures suivant :

k	θ_k	$\sin(\theta_k - \theta_0)$

Tracer la courbe $\sin(\theta_k - \theta_0) = f(k)$.

En déduire la proportionnalité de $\sin(\theta_k - \theta_0)$ avec k .

Déterminer alors le pas a du réseau ainsi que l'incertitude sur sa mesure.

Comparer la valeur donnée par le constructeur. Conclure.

4.3 Étude de la déviation - Minimum de déviation

4.3.1 Mise en évidence expérimentale

Observation : observer et décrire soigneusement la manipulation effectuée en démonstration avec le laser.

Manipulation : On travaille toujours avec la lampe à vapeur de mercure, et plus précisément avec la raie verte. Faire varier la position du réseau. En observant à l'œil nu à travers le réseau, mettre en évidence l'existence d'un minimum de déviation, pour une raie donnée, dans un spectre d'ordre donné.

Vérifier qu'il existe deux positions symétriques du réseau correspondant à ce minimum de déviation.

4.3.2 Étude théorique du minimum de déviation

Appelons D_k l'angle de déviation de faisceau diffracté dans l'ordre k . Nous avons observé précédemment que cette déviation D_k passe par un minimum quand i_0 varie. La déviation D_k est égale à $D_k = i_k - i_0$. On cherche à étudier D_k en fonction de i_0 .

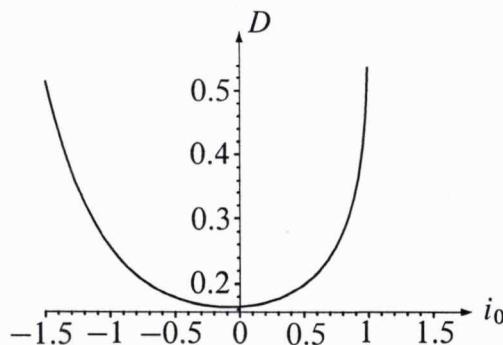


FIG. 10 – Déviation en fonction de l'angle d'incidence (en radians).

La courbe ci-dessus donne la déviation en fonction de i_0 pour $k = 1$, $\lambda = 546 \text{ nm}$ (raie verte intense du mercure) et un réseau de 300 traits par millimètre : il y a un minimum situé en $i_0 = -8,2 \cdot 10^{-2} \text{ rad} = -4,7^\circ$.

Pour déterminer le minimum de déviation, dérivons la formule des réseaux (1) par rapport à i_0 :

$$\cos i_k \frac{di_k}{di_0} - \cos i_0 = 0$$

Au minimum de déviation, $\frac{dD_k}{di_0} = \frac{di_k}{di_0} - 1 = 0$, d'où $\cos i_k = \cos i_0$ ou encore :

$$i_k = i_0 \quad \text{ou} \quad i_k = -i_0$$

La première solution est exclue (elle correspond à la direction du faisceau incident donc à une déviation nulle). Au minimum de déviation, le faisceau incident et le faisceau diffracté ont des directions symétriques par rapport à la normale au réseau. La déviation minimale $D_{k,\min}$ pour une longueur d'onde donnée, dans le spectre d'ordre k est telle que :

$$\sin \frac{D_{k,\min}}{2} = \frac{k\lambda}{2a}$$

4.3.3 Vérification expérimentale

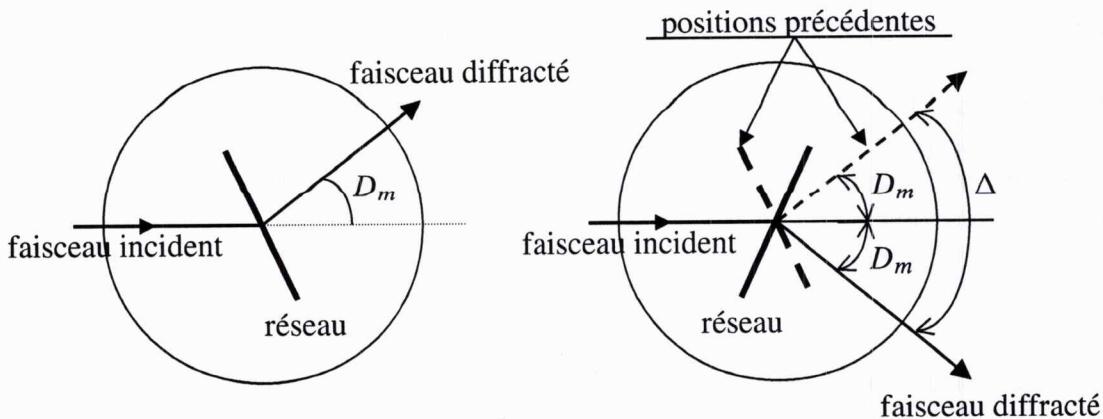


FIG. 11 – Minimum de déviation.

Repérer la raie verte intense du mercure ($\lambda = 546 \text{ nm}$) dans le spectre d'ordre 1. Rechercher les deux positions symétriques du réseau sur la platine correspondant au minimum de déviation dans le spectre d'ordre 1 (la recherche sera faite d'abord grossièrement en observant à l'œil nu à travers le réseau). Pointer ces deux positions $\theta_{1,\min}$ et $\theta'_{1,\min}$. Calculer $\Delta = |\theta'_{1,\min} - \theta_{1,\min}|$.

Pourquoi mesure-t-on Δ plutôt que $D_{k,\min}$?

Exploitation de données (à faire pendant la séance de TP) :

Déterminer la valeur de $D_{k,\min}$. Comparer à la valeur attendue en utilisant la valeur du pas de réseau déterminée précédemment. Conclure.

REMARQUE : on pourra travailler dans un spectre d'ordre k différent de 1.

Si le temps le permet : recommencer la mesure pour les autres raies du mercure, toujours dans le spectre d'ordre 1. *Attention*, il faut refaire pour chaque raie la recherche du minimum de déviation car il dépend de λ (voir formule). Utiliser les valeurs de $D_{k,\min}$ pour déterminer de nouveau le pas du réseau. Conclure.

5 Spectroscopie à réseau

5.1 Mesure d'une longueur d'onde

Orienter la plate-forme du goniomètre pour que le réseau soit au minimum de déviation pour la raie verte intense du mercure, dans le spectre d'ordre 1. **Bloquer** la plate-forme.

Principe : la position des raies, repérée par leur azimut $\theta_{k,\lambda}$, dans le spectre d'ordre k , suit la loi $\theta_{k,\lambda} = i_k(\lambda) + \theta_0$ avec

$$\sin i_{k,\lambda} = \sin (\theta_{k,\lambda} - \theta_0) = \sin i_0 + k \frac{\lambda}{a}$$

où θ_0 est une constante.

Il n'est pas nécessaire de connaître i_0 , θ_0 et a : une source connue (une lampe mercure - cadmium par exemple) sert à *étalonner* le spectroscopie : on trace la courbe $\theta(\lambda)$, cet étalonnage nous permettra de lire directement sur la courbe la longueur d'onde d'une radiation inconnue dont on aura mesuré l'azimut.

Manipulation : Mesurer l'azimut θ_0 de la direction de l'onde incidente. Pour chaque raie dans le spectre d'ordre 1, mesurer l'azimut $\theta_{1,\lambda}$.

Exploitation des données (à faire pendant la séance de TP) : Tracer la courbe $\theta_{1,\lambda} = f(\lambda)$, les longueurs d'onde étant connues, données par le tableau en annexe 2. Cette courbe est appelée *courbe d'étalonnage* du réseau. La courbe pourra être tracée avec l'aide de l'ordinateur.

REMARQUE : l'identification de certaines raies n'est pas toujours évidente (notamment dans le bleu et dans le violet). On commencera par la raie rouge la plus extrême et on procédera par longueurs d'onde décroissantes, en traçant la courbe au fur et à mesure pour vérifier qu'il n'y a pas de point aberrant. Si c'est le cas, la raie a été mal identifiée, il faudra alors essayer la longueur d'onde voisine.

Manipulation : Toutes choses égales par ailleurs, remplacer la lampe d'étalonnage (au mercure-cadmium) par une lampe au sodium. Pointer les raies du spectre d'ordre 1 (le même que celui qui a permis de tracer la courbe d'étalonnage). Utiliser la courbe d'étalonnage pour déterminer les longueurs d'onde correspondantes. Comparer aux valeurs données en annexe 2. Conclure.

5.2 Pouvoir dispersif

Observer le doublet jaune du sodium dans les différents spectres. Est-il séparé ? Si oui, à partir de quel spectre ? Mesurer le pouvoir dispersif $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$ correspondant. Étudier l'influence de la largeur de la fente source dans la séparation des raies. Pourquoi faut-il choisir une fente source très fine ?

Soit b la largeur de la fente source et $f'_c = 12,5$ cm, la distance focale image de la lentille du collimateur. La largeur angulaire du faisceau incident sur le réseau est $\Delta i_0 = \frac{b}{f'_c}$. Celui-ci étant réglé au minimum de déviation dans l'ordre k , la largeur du faisceau après le réseau est

$$\Delta i_k = \Delta i_0 = \frac{b}{f'_c}$$

Si on veut séparer deux longueurs d'onde, la distance angulaire Δi_r entre les deux raies correspondantes doit être supérieure à Δi_k :

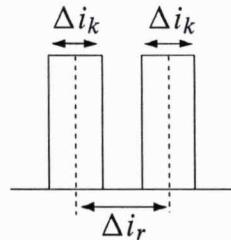


FIG. 12 – Séparation de deux raies.

Évaluons l'écart angulaire Δi_r entre deux raies séparées de $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. En dérivant la formule des réseaux par rapport à λ , on obtient : $\frac{di_k}{d\lambda} = \frac{k}{a \cos i_k}$. Or, au minimum de déviation, $i_k = \frac{D_{k,\min}}{2}$. En assimilant la petite variation à la dérivée, on trouve :

$$\Delta i_r = \Delta\lambda \frac{k}{a \cos \frac{D_{k,\min}}{2}}$$

On choisit souvent comme critère $\Delta i_r \geq 2\Delta i_k$ pour que la mesure de l'écart angulaire soit réalisable. Dans ce cas, la plus petite valeur $\Delta\lambda$ que l'on peut séparer est donnée par :

$$\Delta\lambda = 2 \frac{b}{f'_c} \frac{a}{k} \cos \frac{D_{k,\min}}{2}$$

En déduire la valeur théorique de la largeur maximale b_{\max} de la fente du collimateur permettant de séparer le doublet jaune du sodium, dans le spectre d'ordre 2, pour le réseau que vous utilisez. Conclusion ?

On appelle *pouvoir séparateur* ou *pouvoir de résolution* du spectroscope la quantité :

$$R = \frac{\lambda_m}{\Delta\lambda_{\min}}$$

où $\Delta\lambda_{\min}$ est l'écart minimal que l'on peut mesurer.

Des deux phénomènes limitants étudiés (largeur non nulle des pics, voir paragraphe 2.2.2, et largeur non nulle de la fente source, voir ci-dessus), lequel joue le rôle le plus important ?

Manipulation : Pouvez-vous expérimentalement, pour une largeur donnée de la fente source, déterminer un encadrement de R ? Si oui, faites-le !

ANNEXE 1 : RÉGLAGE DE L'AXE DE LA LUNETTE

Ce réglage a pour but de rendre l'axe optique de la lunette perpendiculaire à l'axe (OZ). L'axe optique de la lunette décrira alors dans sa rotation autour de l'axe (OZ) un plan perpendiculaire à cet axe et non un cône. L'axe mobile de la lunette restera ainsi perpendiculaire à l'axe du goniomètre (OZ), comme l'axe fixe du collimateur.

Selon les termes du programme officiel, la connaissance d'un protocole de réglage n'est pas exigible. Nous en proposons un à titre d'approfondissement.

Le protocole proposé utilise une lame à faces parallèles.

Commencer par mettre la plate-forme en position moyenne pour être sûr de pouvoir terminer le réglage. Pour cela, descendre complètement le plateau et le remonter en tournant chaque vis calante (V_1 , V_2 et V_3) du même nombre de tours (de trois à dix selon les goniomètres).

Placer ensuite la lame parallélépipédique selon une hauteur du triangle équilatéral formé par les trois vis calantes de la plate-forme, ses faces étant grossièrement perpendiculaires à l'axe de la LAC (Cf. figure 13).

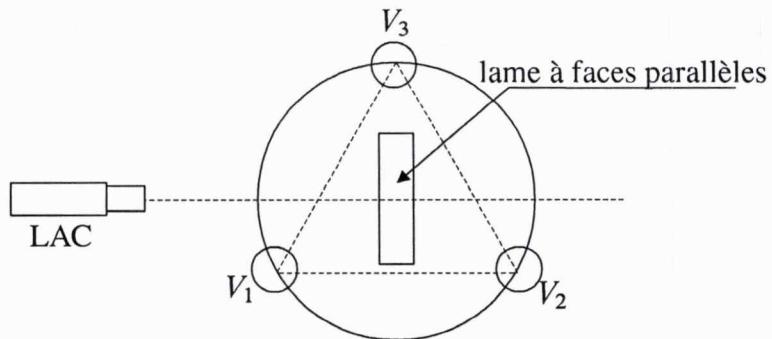


FIG. 13 – Montage.

Autocollimater sur cette lame à faces parallèles. On observe une portion de disque lumineux avec le réticule et son image :

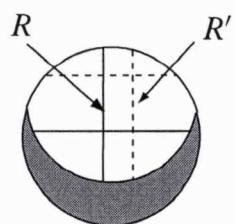


FIG. 14 – Première observation.

Rattraper le décalage entre le fil horizontal du réticule R et celui de son image R' en jouant pour moitié sur la vis V_8 et pour moitié sur la vis calante la plus proche de la LAC (qui est V_1 sur la figure). On a réalisé alors la confusion entre le fil horizontal du réticule R et celui de son image de retour R' .

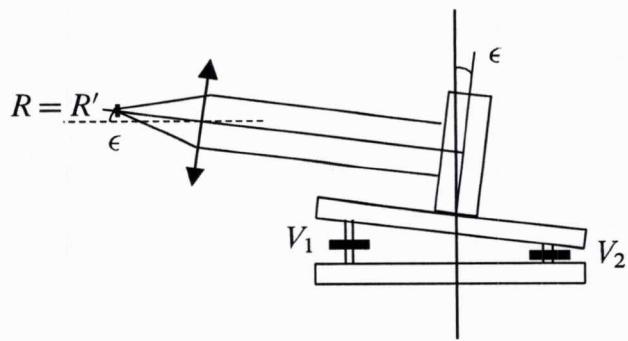


FIG. 15 – La LAC est perpendiculaire aux faces de la lame.

A la suite de ce réglage, l'axe de la LAC est perpendiculaire aux faces de la lame (voir figure 15), mais cela est compatible avec un résidu angulaire ϵ entre l'axe de la LAC et le plan orthogonal à l'axe (OZ) du goniomètre (Cf. figure 15).

Tourner alors la plate-forme de 180° . On constate en général que R et R' sont de nouveau séparés. Après rotation de 180° de la plate-forme, l'écart angulaire entre R et R' est de 4ϵ (Cf. figure 16).

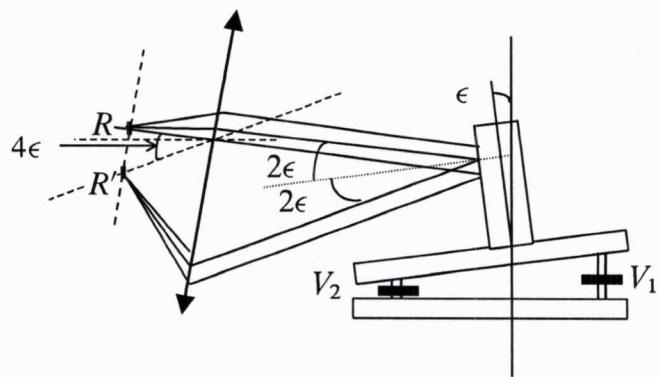


FIG. 16 – L'écart angulaire est égal à 4ϵ .

On réduit l'écart angulaire R et R' de moitié par action sur la vis calante la plus proche de la LAC, c'est-à-dire V_2 . Ceci rend la normale à la lame orthogonale à l'axe (OZ) du goniomètre (Cf. figure 17).

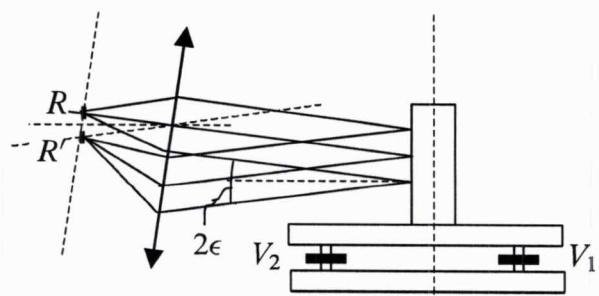


FIG. 17 – Réduction de l'écart angulaire à 2ϵ .

Rattraper l'autre moitié du décalage en modifiant l'axe de la lunette par action sur V_8 (Cf. figure 18).

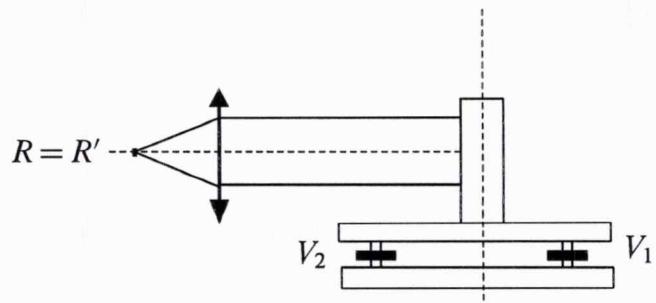


FIG. 18 – L'axe de la lunette est réglé.

En tournant de nouveau la LAC de 180° , on constate que R et R' sont encore séparés. En effet, la moitié de l'écart angulaire est difficile à apprécier. Il faut donc reprendre le réglage en agissant par moitié sur la vis calante la plus proche de la LAC et sur la vis V_8 . Le réglage converge rapidement vers le but poursuivi.

A l'issue de ce réglage, l'axe de la lunette est orthogonal à l'axe central du goniomètre (OZ).

REMARQUE : La normale à la plate-forme a cependant une orientation quelconque car il n'est pas certain que la base de la lame utilisée soit perpendiculaire à ses faces. Il ne faut se laisser abuser par la figure 18. En revanche, si la base de la lame est orthogonale à ses faces, les deux plateaux de la plate-forme sont de plus parallèles.

Dans la suite, il ne faut pas modifier l'orientation de la lunette, donc ne plus toucher à la vis V_8 .

ANNEXE 2 : QUELQUES LONGUEURS D'ONDE UTILES.

Lampe	Couleur	λ en nm	Intensité
Sodium	Rouge	615, 7	Intense
	Jaune	589, 6 – 589, 0	Doublet très intense
	Vert-Jaune	568, 8 – 568, 3	Doublet intense
	Vert	515, 2	Pâle
	Bleu-Vert	498, 1	Pâle
	Bleu	475, 0	Pâle
	Bleu	466, 7	Pâle
	Violet	449, 7	Très pâle
Mercure	Rouge	690, 7	Pâle
	Rouge	623, 4	Pâle
	Rouge	612, 3	Très pâle
	Rouge	607, 2	Très pâle
	Jaune	579, 1 – 577, 0	Doublet intense
	Vert-Jaune	546, 1	Très intense
	Vert	496, 0	Très pâle
	Bleu-Vert	491, 6	Pâle
	Bleu-Violet	435, 8	Intense
	Violet	407, 8	Très pâle
	Violet	404, 7	Intense
Mercure -Cadmium	Rouge(Cd)	643, 8	Intense
	Jaune(Hg)	579, 1 – 577, 0	Doublet intense
	Vert(Hg)	546, 1	Très intense
	Vert(Cd)	508, 6	Intense
	Bleu-Vert(Cd)	480, 0	Intense
	Bleu(Cd)	467, 8	Intense
	Bleu-Violet(Hg)	435, 8	Intense
	Violet(Hg)	407, 8	Très pâle
	Violet(Hg)	404, 7	Intense

Table des matières

1	Introduction - Présentation du réseau par transmission	1
1.1	Présentation	1
1.2	Premières observations	2
1.2.1	Réseau éclairé par un laser	2
1.2.2	Observation de la lumière de la salle	2
2	Étude théorique sommaire du réseau par transmission	2
2.1	Formule des réseaux	2
2.2	Exercice : éclairement diffracté	3
2.2.1	Éclairement diffracté	3
2.2.2	Résolution intrinsèque	4
2.3	Conclusion temporaire	4
3	Le goniomètre	5
3.1	Présentation du goniomètre	5
3.2	Critères de réglages d'un goniomètre	6
3.3	Réglage optique de la lunette autocollimatrice	7
3.4	Réglage optique du collimateur	7
3.5	Réglage de l'axe optique de la lunette	8
3.6	Positionnement du réseau sur la plate-forme	8
3.7	Mesure d'un angle	8
4	Étude du réseau	9
4.1	Premières observations sur la plate-forme	9
4.2	Formule des réseaux - Détermination du pas d'un réseau	9
4.2.1	Réglage de l'incidence normale	9
4.2.2	Vérification de la formule des réseaux - Détermination du pas du réseau	10
4.3	Étude de la déviation - Minimum de déviation	11
4.3.1	Mise en évidence expérimentale	11
4.3.2	Étude théorique du minimum de déviation	11
4.3.3	Vérification expérimentale	12
5	Spectroscope à réseau	12
5.1	Mesure d'une longueur d'onde	12
5.2	Pouvoir dispersif	13