

TP 3

Spectroscopie à réseau

Ce TP est consacré à la spectroscopie (mesure de longueur d'onde) à l'aide d'une association goniomètre-réseau.

Travail préliminaire.

Commencer par lire le TP entier en diagonal. La partie théorique de ce TP correspond au TD-Cours OP6-03.

Avertissement sur les TP d'optique.

Voir le TP d'optique géométrique. Ne rien casser, ne rien salir, ne pas regarder un laser directement, ne pas rallumer une lampe spectrale qui vient d'être éteinte.

1 Utilisation du goniomètre

1.1 Description

Le goniomètre est un dispositif de mesure d'angle. Il est constitué d'un plateau horizontal, d'une lunette et d'un collimateur. Les mesures d'angles se font à l'aide des graduations sur le contour du plateau.

Lunette : Elle est composée de deux lentilles convergentes, l'objectif et l'oculaire. Entre les deux se trouve un réticule (une croix formée par deux fils fins orthogonaux) qui aide au réglage et à la visée. C'est à travers elle qu'on regarde pour faire des mesures.

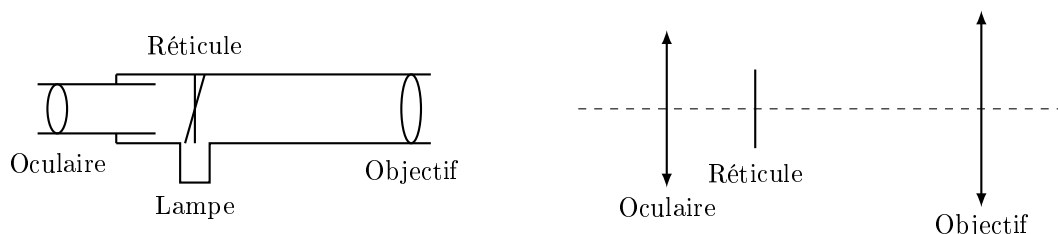
Collimateur : Il ne contient qu'une seule lentille convergente, et son entrée est une fente réglable en largeur. Son rôle est de créer un faisceau parallèle pour éclairer l'objet au centre du plateau.

1.2 Réglage

Déf : Régler un goniomètre. Un goniomètre est réglé lorsque le collimateur crée un faisceau parallèle (fente d'entrée dans le plan focal objet de sa lentille), et lorsque la lunette permet l'observation d'un objet à l'infini sans accommoder (c'est-à-dire lorsqu'elle est rendue afocale pour un oeil normal).

Le réglage se fait en trois étapes : on règle d'abord l'oculaire de la lunette, puis l'objectif de la lunette, puis le collimateur.

Réglage de l'oculaire de la lunette. On commence par un schéma.

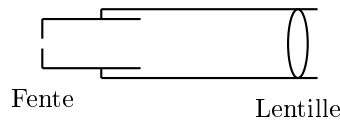


Lorsque la lunette est réglée (pour un oeil normal), le réticule est dans le plan focal image de l'objectif et dans le plan focal objet de l'oculaire. Commencer par allumer la petite lampe latérale pour éclairer le réticule. En regardant à travers l'oculaire, **régler le tirage de l'oculaire pour voir le réticule net sans accommoder**. Ce réglage dépend de votre vue, qui peut être différente de celle de votre binôme. Ne plus toucher au tirage après.

Réglage de l'objectif de la lunette. L'oculaire étant adapté à votre vue, il est désormais possible de régler l'objectif. Le plus efficace est de le régler par **autocollimation**. Pour cela, munissez-vous d'un petit miroir, et placez-le en sortie de la lunette. En regardant à travers l'oculaire, on voit alors le réticule net et son image par {objectif + miroir + objectif}, a priori floue. **Tourner la bague de l'objectif pour avoir l'image nette sans accommoder**. La lunette est maintenant réglée.

Vous pouvez maintenant éteindre la lampe de la lunette. On peut vérifier que cette dernière est bien réglée en visant un objet très lointain dans la pièce.

Réglage du collimateur. Un schéma du collimateur est représenté ci-dessous.



Placer une lampe spectrale au sodium ou au mercure devant la fente. Aligner grossièrement la lunette en face du collimateur. En regardant à travers la lunette déjà réglée, commencer par apercevoir l'image de la fente. Il faut ensuite **la rendre nette sans accommoder en utilisant le tirage du collimateur sans toucher à la lunette**. Si besoin, augmenter ou diminuer la largeur de la fente pour régler la luminosité de l'image. Le collimateur est réglé.

1.3 Faire une mesure d'angle

Savoir lire un angle sur le vernier. Le zéro de la graduation intérieure pointe une graduation extérieure. On note cet angle α , en $^\circ$. Ensuite, repérer le meilleur alignement entre une graduation intérieure et extérieure, par exemple la huitième sur dix. Si la graduation extérieure est en demi degré ($0,5^\circ$), alors l'angle lu est $(\alpha + 0,5 \times 8/10)^\circ$.

2 Spectroscopie par utilisation d'un réseau

2.1 Rappels sur les réseaux

Tout comme le prisme, un réseau est un élément **dispersif**, au sens où il permet de séparer les différentes longueurs d'onde d'un faisceau incident. On utilise en TP des réseaux par transmission (il en existe à réflexion). Ils sont constitués de N fentes très fines parallèles réparties périodiquement sur une longueur L , et on les caractérise par

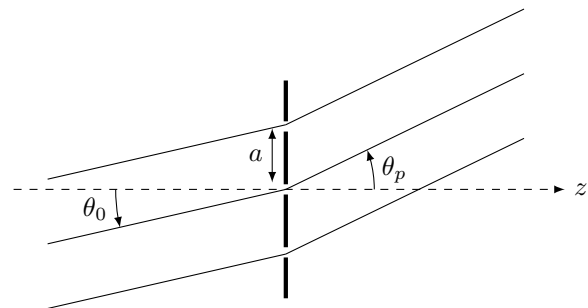
- le nombre de traits par unité de longueur $n = N/L$;
- ou de manière équivalente par la distance entre deux fentes $a = 1/n$, appelée le **pas du réseau**.

Un ordre de grandeur est typiquement $n \approx 10^5 \text{ m}^{-1}$ pour un mauvais réseau, et $n \approx 10^6 \text{ m}^{-1}$ pour un bon réseau.

Contrairement au prisme, la dispersion du réseau provient d'un phénomène d'interférence. Il n'y a de l'intensité pour la longueur d'onde λ que dans les directions où toutes les fentes (qui sont des sources secondaires) interfèrent constructivement. De ce critère d'interférence découle la **formule des réseaux**

$$\sin \theta_p(\lambda) - \sin \theta_0 = \frac{p \lambda}{a}$$

où p est l'ordre du pic (0, -1, 1, -2, 2, rarement plus). Pour $p = 0$, $\theta_0(\lambda) = \theta_0$ pour toutes les longueurs d'onde : l'ordre 0 n'est donc pas dispersif.



D'après la formule des réseaux, pour une longueur d'onde donnée, il y a plusieurs angles $\theta_p(\lambda)$ pour lesquels on observe de l'intensité, correspondant aux différents ordres p . Et pour un ordre p donné, on voit plusieurs couleurs en sortie correspondant aux différentes longueurs d'onde de la lumière incidente. Plus l'ordre p est grand (en valeur absolue), plus le réseau est dispersif, c'est-à-dire plus les longueurs d'onde sont spatialement séparées en sortie.

2.2 Principe des mesures

La formule des réseaux relie $\theta_p(\lambda)$ (ce qu'on mesure) à θ_0 , p , λ (ce qu'on cherche lorsqu'on fait de la spectroscopie) et a . Une méthode de mesure naturelle consiste à attaquer le réseau sous incidence normale $\theta_0 = 0$ et à choisir un ordre donné, par exemple $p = 1$. Alors la formule des réseaux devient

$$\sin \theta_1(\lambda) = \frac{\lambda}{a}$$

Connaissant a , on déduit λ par la mesure de $\theta_1(\lambda)$. Il faut donc au préalable connaître a . Pour cela,

- soit on fait confiance au constructeur, qui annonce par exemple $n = 10^5$ traits par mètre, donc $a = 10 \mu\text{m}$;
- soit on le mesure, en utilisant une longueur d'onde $\lambda_{\text{réf}}$ connue et en utilisant la formule des réseaux pour obtenir a à partir de la mesure de $\theta_1(\lambda_{\text{réf}})$.

Dans ce TP on met en oeuvre la seconde méthode.

2.3 Observations préliminaires

Obtenir une incidence normale. À partir du goniomètre réglé, disposer sur le plateau un réseau, et placer une lampe à vapeur de mercure en entrée du collimateur. Le faisceau en sortie du collimateur éclaire le réseau. Le réseau est légèrement réfléchissant. Repérer la réflexion (très peu lumineuse) du faisceau sur le réseau et tourner le réseau de telle sorte à renvoyer cette réflexion dans le collimateur. Le faisceau sortant du collimateur est alors en incidence normale. Ne plus toucher le réseau ni le collimateur.

Observations qualitatives. En plaçant la lunette en face du collimateur, commencer par repérer l'ordre 0, et vérifier qu'il n'est constitué que d'une seule raie (il n'est pas dispersif donc toutes les longueurs d'ondes sont au même angle). En vous déplaçant vers la gauche où la droite, repérer les raies de l'ordre 1, puis de l'ordre 2. Repérer aussi les ordres -1 et -2 de l'autre côté. Observer qu'ils sont de moins en moins lumineux à mesure que l'ordre augmente en valeur absolue, mais de plus en plus dispersifs. Pour un ordre donné, observer que le rouge est plus dévié que le violet (c'est l'inverse du prisme). Choisir ensuite une raie quelconque. Quelle est l'influence de la largeur de la fente d'entrée du collimateur ? Observer particulièrement l'effet de l'élargissement de la fente sur l'observation du doublet jaune du mercure.

2.4 Mesure *one-shot* de a puis de λ (peu précis)

On ne considère pas a connu (malgré le fait qu'il soit donné par le constructeur). On commence donc par le mesurer.

Mesurer a . Avec la lunette, repérer les raies de l'ordre 1. En choisir une de longueur d'onde connue $\lambda_{\text{réf}}$ (les valeurs sont données en fin de TP). Mesurer alors $\theta_1(\lambda_{\text{réf}})$. Attention, $\theta_1(\lambda_{\text{réf}})$ est l'angle par rapport à la normale, et donc pas directement l'angle lu sur le goniomètre. On repère la normale par l'angle θ_0 de l'ordre 0. En déduire a par la formule des réseaux

$$a_{\text{mes}} = \frac{\lambda_{\text{réf}}}{\sin \theta_1(\lambda_{\text{réf}})}$$

Évaluer l'incertitude $\Delta\theta_1$ sur la mesure de θ_1 et en déduire celle sur a donnée par

$$\Delta a = \frac{a_{\text{mes}}^2}{\lambda_{\text{réf}}} \cos \theta_1 \Delta\theta_1$$

Présenter finalement votre résultat sous la forme $a = a_{\text{mes}} \pm \Delta a$. Comparer à la valeur donnée par le constructeur.

Mesurer une longueur d'onde inconnue. Maintenant que l'on connaît a , on peut utiliser la formule des réseaux pour mesurer une longueur d'onde inconnue. Choisir une autre raie du mercure, toujours dans l'ordre 1 du réseau. Mesurer $\theta_1(\lambda)$. En déduire λ par

$$\lambda = a \sin \theta_1(\lambda)$$

L'incertitude sur a est assez importante donc l'obtention de λ est imprécise par cette méthode *one-shot*. On propose de mettre en oeuvre une méthode plus précise basée sur l'étalonnage du goniomètre.

3 Mise en oeuvre d'une méthode plus précise

3.1 Étalonnage du goniomètre

Étalonner le goniomètre consiste à **obtenir une courbe étalon** $\lambda = f(\sin \theta)$. D'après la formule des réseaux, on sait que cette courbe est en fait une droite. Il suffit donc d'obtenir quelques points de cette droite pour la connaître complètement.

Avantages de cette méthode. L'étalonnage repose sur plusieurs mesures et est donc naturellement plus précis qu'une mesure *one-shot*. Par ailleurs, un avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas la connaissance de a .

Obtenir la courbe étalon. Toujours avec la lampe à vapeur de mercure, mesure les angles θ de l'ordre 1 pour les cinq longueurs d'onde du mercure. Tracer alors sur Latis Pro ou Regressi $\lambda = f(\sin \theta)$. Vous obtenez normalement une droite. Utiliser une régression linéaire pour déduire la pente de la droite ajustant le mieux vos points expérimentaux. D'après la formule des réseaux, cette pente vaut a . Comparer avec votre valeur a_{mes} obtenue par la méthode *one-shot*, et comparer les incertitudes des deux méthodes.

3.2 Mesure d'une longueur d'onde par étalonnage (plus précis)

Ayant obtenu une courbe étalon, vous pouvez vous en servir pour obtenir une longueur d'onde inconnue.

Mesure de la longueur d'onde du sodium. Le doublet du sodium n'est pas résolu a priori par un mauvais réseau, c'est-à-dire que les deux longueurs d'onde sont trop peu séparées, et qu'elles forment une seule tâche indiscernable dans la lunette. On cherche donc seulement ici à mesurer la longueur d'onde moyenne du doublet. Pour cela, remplacer la lampe à vapeur de mercure par la lampe à vapeur de sodium. Ne pas toucher au réseau ni au collimateur. Repérer l'ordre 1, et mesurer $\theta_1(\lambda_{\text{sod}})$. Reporter la valeur sur votre droite étalon et en déduire λ_{sod} . On attend $\lambda_{\text{sod}} = 589 \text{ nm}$.

4 Méthode du minimum de déviation (la plus utilisée)

Intérêt. La méthode du minimum de déviation est très utilisée car elle permet de s'affranchir de la connaissance de θ_0 , dont le réglage à 0 est souvent peu précis.

Observation du minimum de déviation. Commencer par choisir une raie quelconque de la lampe au mercure, dans un ordre quelconque. L'idée de la méthode du minimum de déviation est de tourner le réseau (ce qui déplace la raie) et de suivre cette raie avec la lunette pendant son déplacement. Vous remarquerez qu'il existe un angle particulier pour lequel la raie « fait demi-tour » (alors qu'on continue de tourner le réseau dans le même sens) : c'est un angle minimum de déviation.

Principe de la méthode. Pour une raie donnée, mesurer les deux angles minimaux de déviation (à gauche θ_g dans l'ordre p et à droite θ_d dans l'ordre $-p$). On définit le minimum de déviation D_m par

$$2 D_m = |\theta_g - \theta_d|$$

On peut montrer que cet angle vérifie la relation

$$\sin\left(\frac{D_m}{2}\right) = p \frac{\lambda}{2a}$$

où p est l'ordre de la raie que l'on suit. On en déduit évidemment

$$\lambda = \frac{2a \sin(D_m/2)}{p}$$

Mesure. Utiliser la méthode du minimum de déviation pour mesurer une longueur d'onde.

Violet	Bleu	Vert	Jaune 1	Jaune 2
404 nm	436 nm	546 nm	577 nm	579 nm

Tableau : longueurs d'onde d'une lampe à vapeur de mercure.