

La spectrométrie est une méthode très répandue d'analyse de la composition chimique d'un corps. Les atomes d'une vapeur, lorsqu'ils sont excités, émettent certaines radiations caractéristiques. Pour séparer les composantes monochromatiques d'une lumière complexe, le réseau est utilisé dans la majorité des spectromètres.

*Objectifs :*

- Savoir mesurer un angle avec un goniomètre.
- Mesurer une longueur d'onde optique à l'aide d'un goniomètre à réseau.
- Obtenir et analyser quantitativement un spectre à l'aide d'un réseau.

*Matériel :*

- La *source de lumière* est soit une lampe à vapeur de mercure soit une lampe à vapeur de sodium.
- Nous allons apprendre à régler le *goniomètre*. Il comprend un collimateur (1) qui permet d'éclairer le réseau par un faisceau de lumière parallèle, une plate-forme mobile (2) sur laquelle sera posé le réseau et une lunette (3) qui permet de viser à l'infini. On se reportera aux figures fournies en annexe. Il faudra manipuler le goniomètre avec précaution car c'est un instrument particulièrement fragile.

## I - Étude théorique

### 1) Définitions et formule des réseaux

Définition : réseau.

Un réseau optique est constitué d'une structure périodique qui diffracte une onde incidente. Il existe deux sortes de réseaux : les réseaux par transmission et les réseaux par réflexion. Nous allons étudier un réseau par transmission.

Le réseau plan par transmission est constitué de  $N$  motifs identiques, ou traits, très longs (de longueur très grande devant la longueur d'onde) juxtaposés sur une largeur totale  $L$ . Les motifs sont régulièrement répartis, avec la période spatiale  $a$ , appelée "pas du réseau". On note  $n = \frac{1}{a} = \frac{N}{L}$  le nombre de traits par unité de longueur.

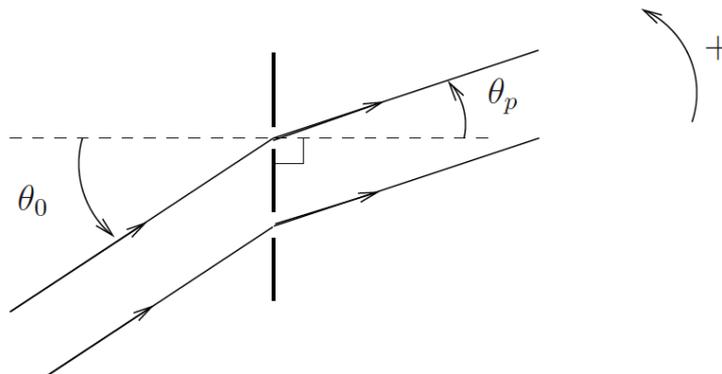
Chaque trait est suffisamment étroit pour provoquer une diffraction uniforme et donc se comporter comme une source secondaire.

Le réseau se comporte ainsi comme un dispositif interférentiel à  $N$  ondes cohérentes.

On étudie la diffraction à l'infini pour le réseau plan. Le réseau est éclairé par une onde plane, sous incidence  $\theta_0$ . On admet qu'on observe des maxima d'intensité (appelés maxima principaux) dans les directions définies par les angles  $\theta_p$  tels que :

$$a(\sin \theta_p - \sin \theta_0) = p\lambda,$$

où  $p$  est un entier relatif. Dans ces directions, les  $N$  ondes sont en phase (interférences constructives).



Il y a un nombre fini de valeurs possibles pour  $p$  puisque  $\sin \theta_p$  est défini dans l'intervalle  $[-1, +1]$ . Pour  $p = 0$ , on constate que  $\theta_p = \theta_0$ . Il n'y a alors pas de déviation. Ce maximum est indépendant de la valeur de la longueur d'onde utilisée. En l'absence de réseau, on y trouve l'image géométrique de la fente source.

Pour  $p \neq 0$ , on parle de maximum d'intensité d'ordre  $p$ . On constate que  $\theta_p$  dépend de  $n$ ,  $\theta_0$  et  $\lambda$ .

$$\sin \theta_p = \sin \theta_0 + p \frac{\lambda}{a} = \sin \theta_0 + pn\lambda.$$

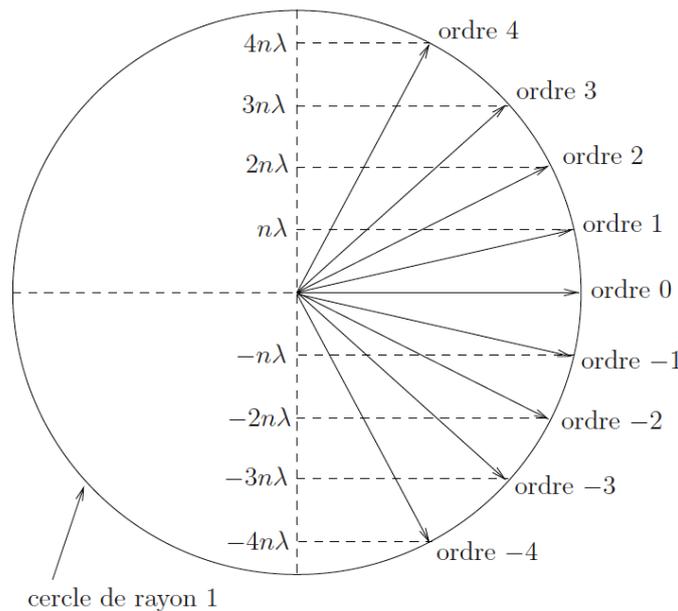
On constate que seuls les maxima principaux d'ordre  $p \neq 0$  dépendent de la longueur d'onde et peuvent donc être utilisés en spectrométrie.

## 2) Cas particulier de l'incidence normale

En incidence normale, on a  $\theta_0 = 0$ , soit :

$$\sin \theta_p = p \frac{\lambda}{a} = pn\lambda.$$

On peut représenter les différentes directions correspondant aux différents ordres. On constate que les pics d'intensité maximale sont d'autant plus "espacés" que  $n$  est grand, c'est-à-dire  $a$  petit.



## 3) Minimum de déviation

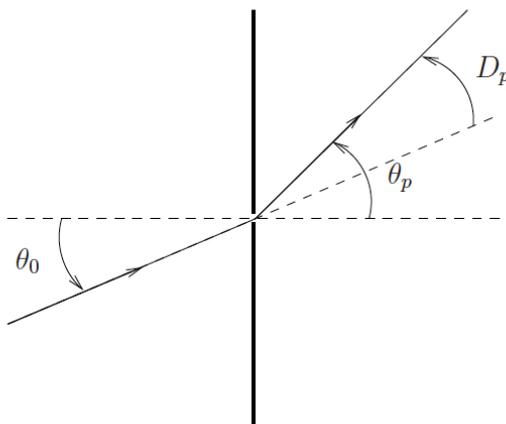
On oriente la figure dans le sens trigonométrique.

Pour l'ordre  $p$ , la déviation est donnée par :

$$D_p = \theta_p - \theta_0;$$

La déviation dépend donc de  $\theta_0$ ,  $p$ ,  $a$  et  $\lambda$ . On fixe  $p$ ,  $a$  et  $\lambda$  et on étudie  $D_p$  en fonction de  $\theta_0$ . Montrons que  $D_p$  possède un minimum pour  $\theta_{0m}$ .

$$\frac{dD_p}{d\theta_0} = \frac{d\theta_p}{d\theta_0} - 1$$



D'autre part, la formule des réseaux donne :

$$\sin \theta_p = \sin \theta_0 + p \frac{\lambda}{a}$$

On en déduit :

$$\cos \theta_p \frac{d\theta_p}{d\theta_0} = \cos \theta_0$$

soit

$$\frac{d\theta_p}{d\theta_0} = \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_p}.$$

On injecte dans la dérivée de  $D_p$  :

$$\frac{dD_p}{d\theta_0} = \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_p} - 1.$$

Cette dérivée s'annule pour l'extremum, soit  $\cos \theta_p = \cos \theta_{0m}$ , ou  $\theta_p = \pm \theta_{0m}$ .

La première solution  $\theta_p = +\theta_{0m}$  représente l'ordre  $p = 0$  qui n'a aucun intérêt en spectroscopie.

La deuxième solution  $\theta_p = -\theta_{0m}$  est exploitable en spectroscopie. La déviation minimale est alors :

$$D_{p,min} = -2\theta_{0m} = 2\theta_p < 0.$$

On injecte cette relation dans la formule des réseaux et on obtient :

$$\sin \left( \frac{D_{p,min}}{2} \right) = \frac{1}{2} p \frac{\lambda}{a}.$$

## II - Réglage du goniomètre

Le faisceau incident, que l'on veut parallèle, est émis par le collimateur (1). Le faisceau dévié est observé dans la lunette (3). Les deux faisceaux définissent un plan auquel le plan du réseau et les traits du réseau doivent être perpendiculaires. Ce plan sera décrit par l'axe optique de la lunette au cours de ses mouvements autour de l'axe ( $\Delta$ ) du goniomètre. Il faut donc que l'axe de la lunette décrive un plan restant constamment perpendiculaire à l'axe ( $\Delta$ ) du goniomètre.

### 1) Réglage de la lunette (3)

#### a) Réglage de l'oculaire

Régler l'oculaire (14) pour voir le réticule net sans accommoder (seul ce réglage dépend de l'observateur).

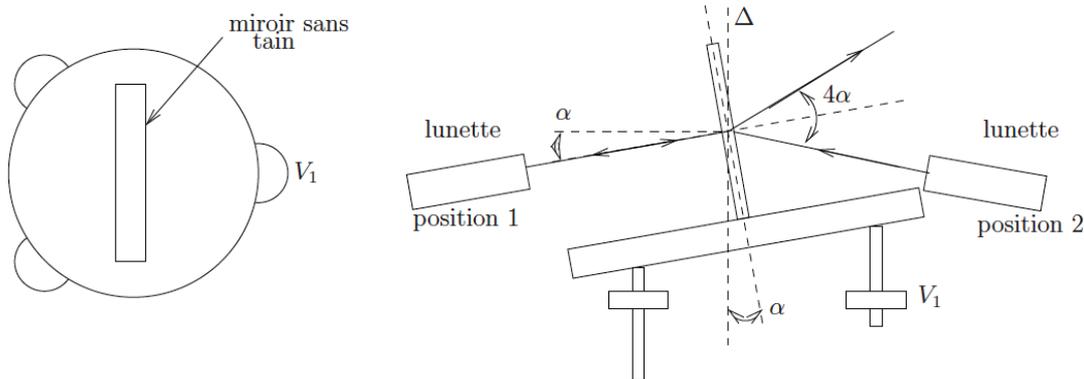
### b) Réglage de la lunette à l'infini

Pour amener le réticule dans le plan focal de l'objectif, on utilise la *méthode d'autocollimation* : le réticule éclairé (après avoir actionné le levier (12)) envoie un faisceau sortant par l'objectif ; un miroir plan renvoie ce faisceau vers le réticule. Si celui-ci est au foyer de l'objectif, l'image obtenue lors du retour de la lumière après réflexion sur le miroir plan est également dans le plan focal et sera observée de façon nette en même temps que le réticule. Agir sur l'objectif (10) de la lunette pour qu'il en soit ainsi : la lunette est ainsi réglée "à l'infini".

### c) Réglage de l'axe optique de la lunette

- Avant tout réglage, vérifier que la plate forme (2) est à peu près "horizontale". Ajuster éventuellement en agissant sur les trois vis (8). Vérifier qu'aucune de ces trois vis n'est en butée et qu'elles sont toutes à peu près à mi-course.
- Il ne faut pas serrer trop fortement la vis (17) qui bloque la rotation de la plate-forme. En effet, le matériel vieillissant, cette vis tend à modifier lors du serrage l'horizontalité de la plate-forme, ce qui peut être très gênant pour la suite. On ne forcera donc jamais sur la vis (17).
- Vérifier grossièrement que l'axe optique de la lunette est à peu près "horizontal". Si ce n'est pas du tout le cas (lunette très dérégulée), agir sur la vis (11) sous la lunette pour le rendre à peu près "horizontal". En effet, cette vis permet de régler l'axe optique de la lunette en la faisant pivoter autour de l'axe A.

On cherche maintenant à rendre l'axe optique de la lunette rigoureusement perpendiculaire à l'axe ( $\Delta$ ) du goniomètre (cet axe n'est pas matérialisé). Il va falloir régler précisément la vis (11). On dispose à cet effet un miroir sans tain sur la plate-forme (2) comme indiqué sur la figure ci-dessous à gauche en vue de dessus. On le place face à une des vis (8) que l'on notera  $V_1$ .

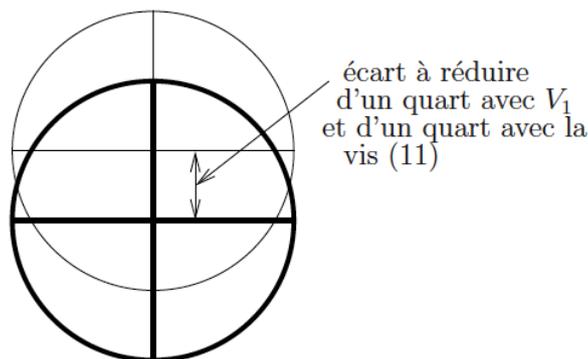


Lorsque l'axe de la lunette est perpendiculaire à ce miroir, l'"image de retour" et le réticule (fils horizontaux) coïncident. Supposons que ceci soit réalisé quand la lunette est en position (1) (cf la vue de profil ci-dessus à droite). On met alors la lunette en position (2). Si le miroir fait avec ( $\Delta$ ) un angle  $\alpha$ , le faisceau émergent de la lunette est renvoyé dans une direction faisant un angle  $4\alpha$  (cf figure ci-dessus à droite). L'axe décrit un plan perpendiculaire à ( $\Delta$ ) si  $\alpha = 0$ .

Protocole : Se placer en position (1) par rapport au miroir sans tain. Dans le cas général, les fils horizontaux du réticule et de l'image sont alors décalés (cf ci-dessous). Réduire ce décalage de 1/4 avec la vis  $V_1$  (qui réduit  $\alpha$ ) et de 1/4 avec la vis (11) sous la lunette (qui en modifie l'inclinaison).

On ne cherchera pas à faire coïncider les deux fils horizontaux puisque la distance ne sera réduite que de moitié ainsi.

Faire ensuite pivoter la lunette jusqu'à la position (2) diamétralement opposée et recommencer les manipulations (réduction de l'écart de 1/4 avec la vis  $V_1$  et de 1/4 avec la vis (11)). Retourner en position



(1) et recommencer... ainsi de suite jusqu'à ce que la coïncidence du réticule et de son image soit réalisée des deux côtés.

Une fois cette coïncidence réalisée des deux côtés à la fois, il ne faut plus toucher à la vis (11), sous peine d'avoir à refaire ce réglage.

## 2) Réglage du collimateur (1)

On peut enlever la glace sans tain de la plate-forme.

Définition : collimateur

C'est un système optique permettant d'obtenir un objet à l'infini.

Le collimateur est constitué d'un objet (fente source de largeur réglable (7)) et d'une lentille (objectif du collimateur réglable avec la bague (13)). La fente doit être éclairée par une source extérieure au collimateur. La distance fente-objectif du collimateur doit être réglée de façon à donner une image à l'infini. On utilise pour cela la lunette. Expliquer pourquoi.

- Allumer la lampe au mercure et éclairer la fente du collimateur. Le faisceau qui sort du collimateur doit être parallèle : si on regarde la fente du collimateur dans la lunette, elle doit apparaître nette. Régler le tirage du collimateur (bague (13)) pour qu'il en soit ainsi. Régler également la largeur de la fente (assez fine, mais pas trop pour être suffisamment lumineuse) avec la bague (9).
- Les mesures consisteront ensuite à superposer le fil vertical du réticule de la lunette avec la fente du collimateur. Vérifier que la fente est bien parallèle au fil vertical du réticule de la lunette.
- Noter dès à présent l'angle  $\theta_0$  (microscope (4) dont on aura réglé l'oculaire (15) à sa vue) correspondant à la position angulaire de la lunette pointant le faisceau direct. Attention à la lecture des degrés et des minutes (qui se lisent de droite à gauche). Quelle est l'incertitude-type sur cette mesure ?

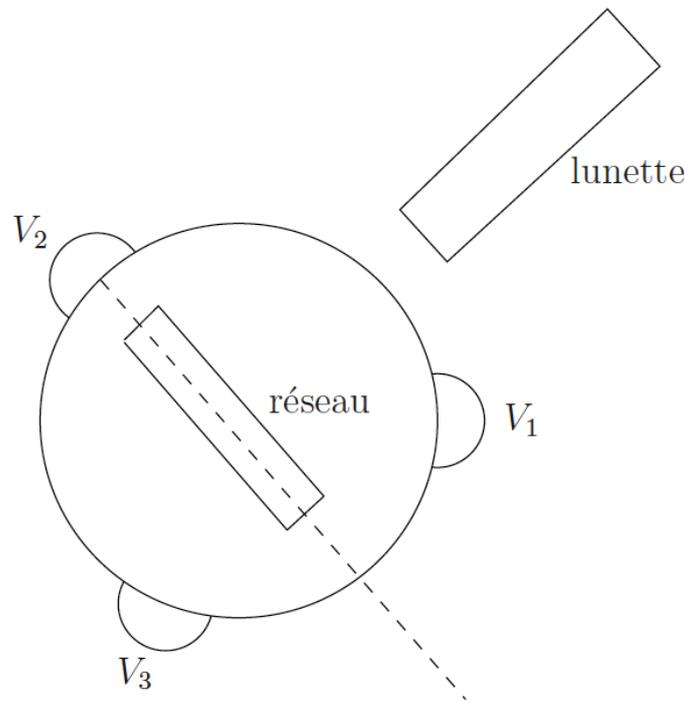
## 3) Réglage de la plate-forme (2) pour le réseau

Si on place le réseau sur la plate-forme de la même façon que le miroir sans tain (paragraphe 1-c) en utilisant le support adapté, on pourra régler la verticalité du plan du réseau avec la vis  $V_1$ . Pour régler le parallélisme des traits du réseau avec la fente source, il faudra agir sur les deux autres vis, ce qui dérèglera le réglage de la verticalité...

Il est donc préférable de placer le réseau de la façon suivante :

La vis  $V_1$  permet le réglage de la verticalité de la face du réseau par rotation du plateau autour de l'axe matérialisé par les points d'appui des vis  $V_2$  et  $V_3$  (idem pour la vis  $V_3$  par rotation autour de l'axe matérialisé par les points d'appui des vis  $V_1$  et  $V_2$ ).

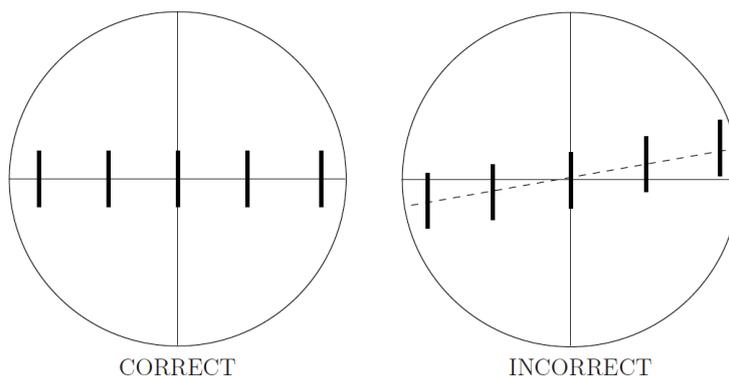
La vis  $V_2$  permet de régler le parallélisme des traits du réseau avec la fente source supposée verticale par rotation du plateau autour d'un axe matérialisé par les points d'appui des vis  $V_1$  et  $V_3$ . L'action sur



$V_2$  est pratiquement sans effet sur la verticalité de la face.

Avec la lunette, par autocollimation sur la face avant du réseau (prendre la face la plus réfléchissante), régler la vis  $V_1$  pour rendre cette face verticale (on superpose le réticule et son image). Certains réseaux ont des faces peu réfléchissantes ce qui rend le réglage pénible.

À l'aide de "Post-it", limiter la hauteur de la fente source du collimateur. Les divers ordres du réseau apparaîtront alors comme des raies lumineuses de hauteur réduite et centrées selon un axe perpendiculaire à la direction des traits du réseau. Il s'agit de rendre cet axe orthogonal à l'axe de rotation, c'est-à-dire parallèle à la direction matérialisée par le réticule horizontal de la lunette utilisée pour l'observation. Suivant le pas du réseau, il sera sans doute nécessaire de faire tourner la lunette pour voir successivement les diverses raies.



La vis  $V_2$  permet le réglage de ce parallélisme. Un tel réglage modifie peu la verticalité du réseau, mais il peut être judicieux de vérifier cette verticalité à la fin de cette étape (et reprendre l'ensemble du réglage si nécessaire). Ce réglage est parfois rendu impossible lorsque la fente source n'est pas "verticale", c'est-à-dire pas parallèle au trait vertical du réticule de la lunette. Une fois les réglages terminés, penser à retirer les Post-it.

**ATTENTION!!!** Dans la suite des manipulations, il ne faut pas translater le réseau sur la plate-forme et il ne faut plus toucher ni aux vis (8), ni à la vis (11). Sinon, il faut refaire

les réglages correspondants. En cas de doute, refaire les réglages pour être sûr d'avoir de bonnes mesures par la suite.

### III - Mesures

Le réseau utilisé est un réseau de 600 traits par millimètre. Pour toutes les mesures, on étudiera l'ordre 1.

#### 1) Étude en incidence normale

Pour placer le réseau en incidence normale, une fois les réglages précédents réalisés, pivoter la lunette et la plate-forme de sorte à superposer l'ordre 0, le trait vertical du réticule et son image par autocollimation. Le réseau est alors en incidence normale. Bloquer la rotation de la plate-forme. On peut ensuite faire pivoter la lunette pour aller pointer les différentes raies de l'ordre 1.

##### a) Courbe d'étalonnage

Les longueurs d'onde des raies du mercure sont connues.

Couleur	$\lambda$ (nm)
rouge	623,6
jaune 1	579,1
jaune 2	577,0
vert (intense)	546,1
vert (peu intense)	491,6
bleu-violet (intense)	435,8
violet (très peu intense)	407,8
violet (peu intense)	404,7

En incidence normale, mesurer les déviations  $D$  pour les différentes raies de l'ordre 1. Évaluer les incertitudes. Tracer avec Regressi la courbe d'étalonnage  $\sin D$  en fonction de  $\lambda$ . Modéliser convenablement la courbe obtenue et vérifier la cohérence avec le pas du réseau.

##### b) Mesure de longueur d'onde

Mettre en place un protocole permettant de mesurer les longueurs d'onde des deux raies du doublet du sodium.

#### 2) Minimum de déviation

##### a) Courbe d'étalonnage

Pour chaque raie du mercure de l'ordre 1, mesurer la déviation minimale  $D_{min}$  et son incertitude. Tracer avec Regressi la courbe d'étalonnage  $\sin\left(\frac{D_{min}}{2}\right)$  en fonction de  $\lambda$ . Modéliser convenablement la courbe obtenue et vérifier la cohérence avec le pas du réseau.

##### b) Mesure de longueur d'onde

Mettre en place un protocole permettant de mesurer les longueurs d'onde des deux raies du doublet du sodium.