

SPECTROSCOPE À RÉSEAU

Un spectroscopie est un appareil qui permet d'analyser des spectres lumineux, c'est-à-dire de mesurer les longueurs d'ondes des diverses raies spectrales observées.

Un goniomètre est un appareil qui permet de mesurer des angles. Il est très fragile ! Manipuler avec soin ! Ne pas forcer sur les vis !

DANGER : *Ne pas regarder directement la lampe spectrale au mercure en raison des rayons ultraviolets émis : c'est un lampe à bronzer ! Par contre, si vous regardez la lampe spectrale au mercure à travers une ou plusieurs lentilles, il n'y a quasiment plus de rayons UV.*

Ne pas éteindre une lampe spectrale si on en a besoin à nouveau au cours de la séance. Il vaut mieux la laisser allumée pendant toute la séance plutôt que l'éteindre et la rallumer !

Si par erreur, vous avez éteint une lampe spectrale, vous devez attendre au moins 20 minutes avant de la rallumer.

I – DESCRIPTION DU GONIOMÈTRE

Il est composé de quatre parties :

- un **support** métallique horizontal et fixe, sur lequel des graduations en périphérie permettent des mesures d'angles,
- une **plate-forme** (ou **platine**) mobile autour d'un axe central (Δ) vertical, passant par le centre du disque ; trois vis permettent de régler son orientation par rapport à l'axe (Δ) ; on place sur cette plate-forme un prisme ou un réseau ;
- un **collimateur** constitué par une fente lumineuse, de largeur réglable, placée au foyer objet d'une lentille achromatique ; en général, le collimateur est fixe par rapport au support ;
- une **lunette** de visée réglable (généralement autocollimatrice) mobile autour du même axe (Δ) ; l'inclinaison de l'axe de la lunette est réglable à l'aide d'une vis V_1 située sous son support ; un vernier solidaire de la lunette permet de mesurer sa position par rapport au disque.

II – RÉGLAGE DU GONIOMÈTRE

Le réglage des différents éléments du goniomètre s'effectue dans l'ordre suivant :

- réglage de la lunette autocollimatrice à l'infini,
- réglage du collimateur à l'infini,
- réglage de l'horizontalité de la lunette,
- positionnement du réseau sur la plate-forme.

1) Réglage de la lunette autocollimatrice :

La lunette autocollimatrice comporte un réticule et une lame semi-réfléchissante inclinée à 45° , que l'on peut escamoter à l'aide d'un bouton latéral. Cette lame est éclairée par une petite ampoule latérale alimentée sous 6 V. Cette lame sera escamotée après chaque autocollimation pour que l'observateur ne soit pas gêné par l'éclairage de la lunette qui ne présente alors aucune utilité.

a) Mise au point de l'oculaire sur le réticule :

- Allumer l'ampoule latérale et mettre en place la lame semi-réfléchissante pour éclairer le réticule.
- Régler l'oculaire (bague B_1) pour voir net le réticule. Pour cela, éloigner l'oculaire du réticule jusqu'à ce que l'image du réticule cesse d'être nette ; rapprocher ensuite lentement l'oculaire du réticule jusqu'à ce que l'image soit nette : l'image du réticule donnée par l'oculaire est alors à l'infini pour un œil normal n'accommodant pas.
- Orienter le réticule pour que l'un des traits soit vertical.

b) Réglage de l'objectif par autocollimation :

Le réticule éclairé par l'ampoule latérale sert d'objet pour l'objectif de la lunette et permet le réglage de celle-ci par autocollimation.

- Placer sur la plate-forme une surface réfléchissante (un miroir, une lame à faces parallèles ou la face d'un prisme ...) devant l'objectif de la lunette et perpendiculairement à l'axe de la lunette.

- Régler l'objectif (bague B_2) pour que le réticule et l'image de retour du réticule soient dans un même plan ; on peut le vérifier en déplaçant l'œil latéralement ou verticalement : il ne doit pas y avoir de déplacement entre les deux réticules observés.

Attention ! Le champ de vision de la lunette est très faible et il faut être très proche de l'orthogonalité pour voir l'image du réticule.

Si vous ne voyez pas l'image du réticule, rapprochez la surface réfléchissante de la lunette.

Si ce réglage est correct, alors le réticule R est dans le plan focal objet de l'objectif ; ce dernier en donne une image à l'infini. Après réflexion sur le miroir, l'objectif en redonne une image R' située également dans le plan focal de l'objectif ; R et R' sont donc dans un même plan (le plan focal de l'objectif) et ils sont vus nets en même temps à travers l'oculaire.

Ne plus toucher au réglage de l'objectif jusqu'à la fin de la séance ! Par contre, en cas de changement d'observateur, il suffit de changer le réglage de l'oculaire (bague B_1) pour voir net le réticule.

- Escamoter la lame semi-réfléchissante.

2) Réglage du collimateur :

Le collimateur comporte une fente dont la largeur est réglable à l'aide de la bague B_4 (il faut visser la bague pour élargir la fente).

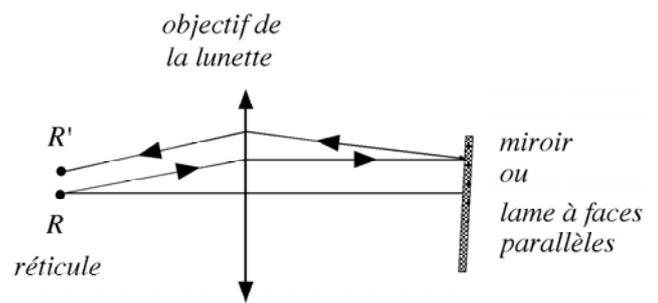
- Éclairer la fente avec une lampe spectrale quelconque (la lampe au mercure peut être utilisée sans problème car les rayons U.V. seront arrêtés par les différentes lentilles).
- Placer la lunette dans l'axe du collimateur et observer l'image de la fente éclairée.
- Tourner la bague B_5 du collimateur pour que l'image de la fente soit nette à travers l'oculaire : elle doit se former dans le même plan que le réticule ; on peut le vérifier en déplaçant l'œil latéralement ou verticalement : il ne doit pas y avoir de déplacement entre l'image de la fente et le réticule.
- Régler la finesse de la fente à l'aide de la bague B_4 du collimateur ; il faut que la fente soit aussi fine que possible mais suffisamment lumineuse.

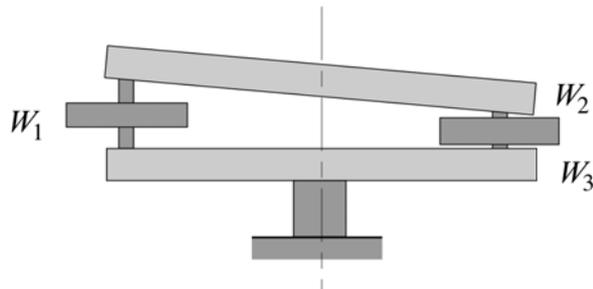
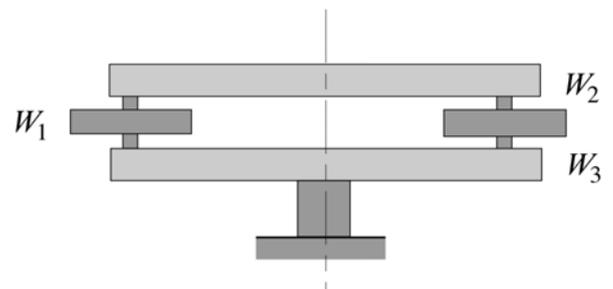
Si ce réglage est correct, alors la fente est dans le plan focal de la lentille du collimateur ; tout point de la fente donne naissance, à la sortie du collimateur, à un faisceau de rayons parallèles .

3) Réglage de l'horizontalité de la lunette :

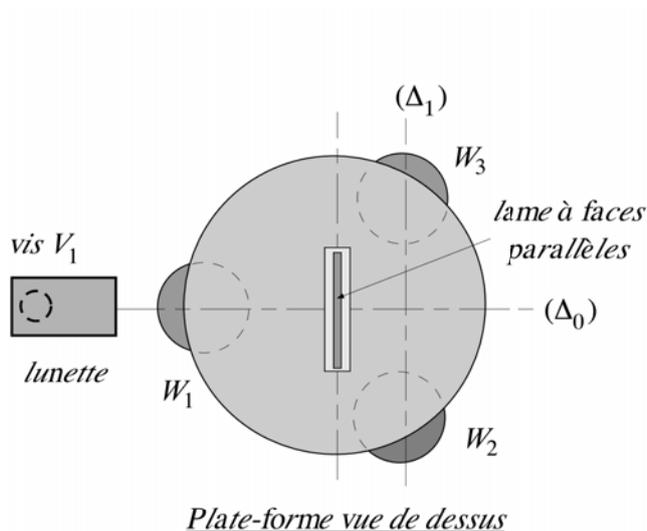
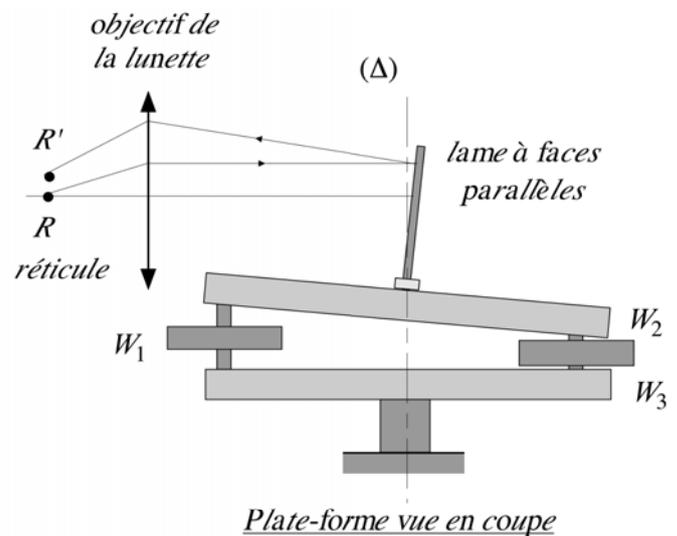
a) Méthode précise :

- Régler au mieux l'horizontalité de la plate-forme en l'observant en incidence rasante et en faisant tourner le plateau. Agir sur les vis W_1 , W_2 et W_3 pour que la plate-forme soit parallèle au support.



*Plate-forme vue en incidence rasante**Mauvais réglage de l'horizontalité**Plate-forme vue en incidence rasante**Bon réglage de l'horizontalité*

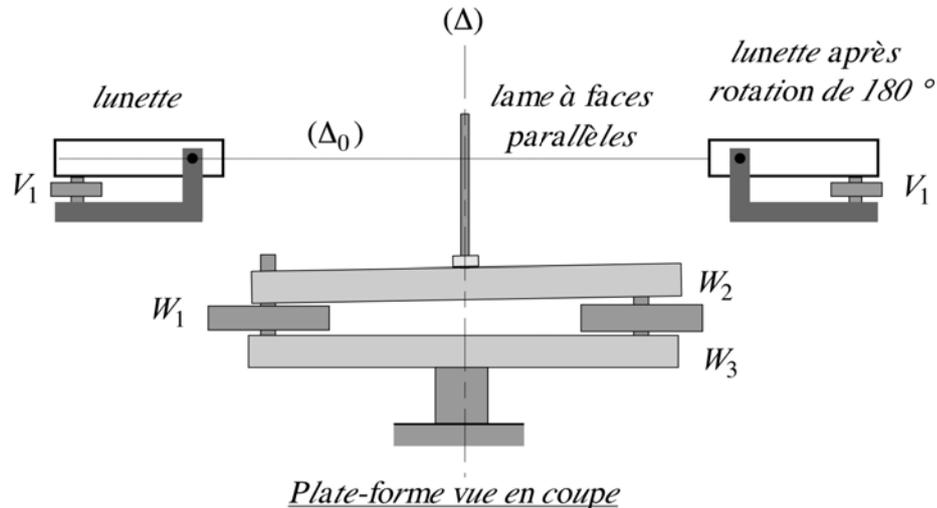
- Placer une lame à faces parallèles sur la plate-forme comme indiqué ci-dessous. La vis W_1 permet le réglage de la verticalité de la lame par rotation de la plate-forme autour de l'axe (Δ_1) passant par les points d'appui des vis W_2 et W_3 .

*Plate-forme vue de dessus**Plate-forme vue en coupe*

- Orienter la plate-forme pour avoir autocollimation sur une des faces de la lame à faces parallèles ; mettre en place la lame semi-réfléchissante de la lunette et observer le réticule et l'image retour du réticule obtenue par réflexion sur la lame à faces parallèles (on n'utilise pas la lumière issue du collimateur).
- Agir à moitié sur la vis calante W_1 de la plate-forme et à moitié sur la vis V_1 de la lunette pour que les deux traits horizontaux des réticules coïncident.
- Tourner la plate-forme de 180° et recommencer la double correction pour que les deux traits horizontaux des réticules coïncident à nouveau.

Remarque : la rotation de la plate-forme autour de l'axe (Δ) vertical est équivalente à la rotation de la lunette autour du même axe (Δ) .

- Recommencer plusieurs fois l'opération précédente ; on est alors dans la situation suivante où l'axe (Δ_0) de la lunette est orthogonal à l'axe (Δ) de rotation vertical.



b) Méthode moins précise mais plus rapide :

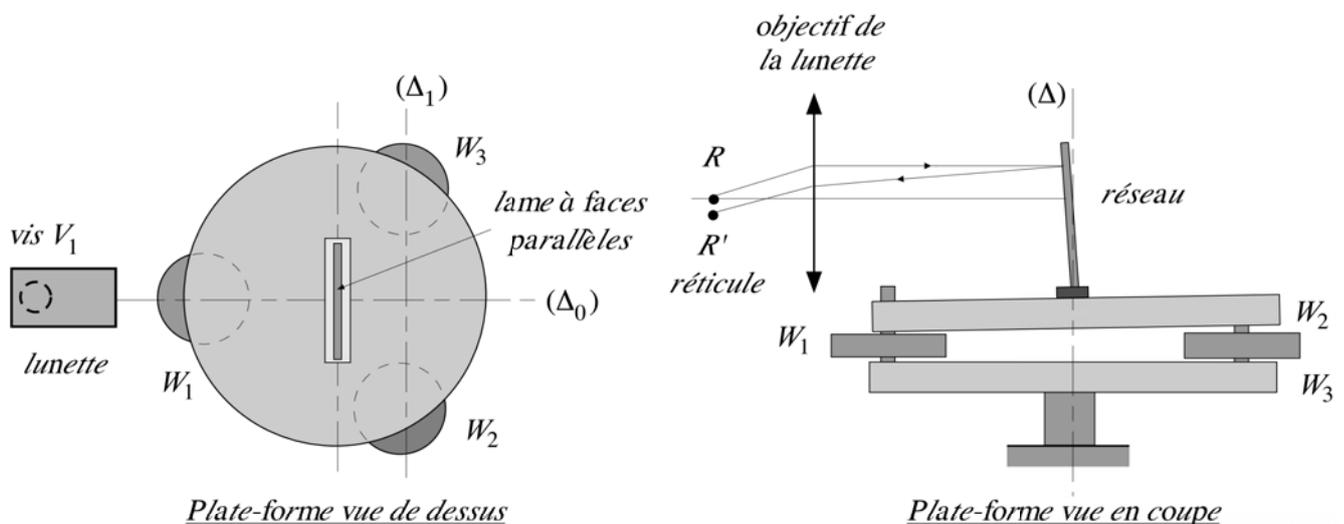
- Placer la lunette dans l'axe du collimateur.
- Observer la fente à travers la lunette et tourner la vis V_1 située sous la lunette pour que le centre de la fente du collimateur se trouve à l'intersection des traits du réticule ; on peut éventuellement disposer un cache à mi-hauteur de la fente (ruban adhésif opaque ...) pour repérer le centre de la fente (mettre le ruban adhésif sur le support de la fente et non sur la fente elle-même, pour ne pas l'endommager).

4) Positionnement du réseau sur la plate-forme :

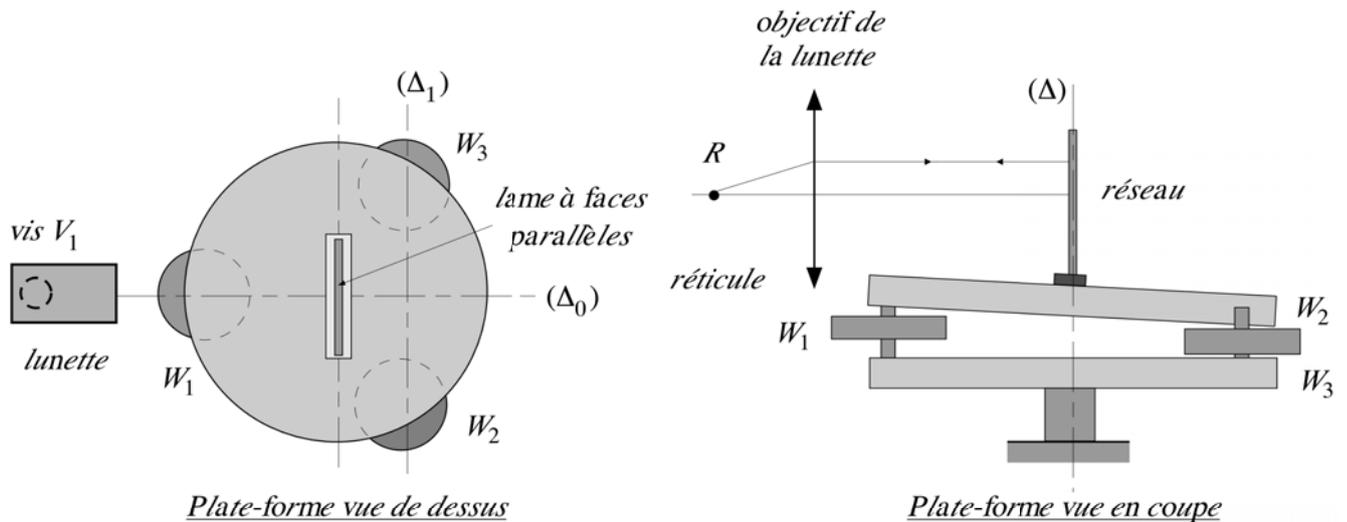
L'axe (Δ_0) de la lunette est normal à l'axe vertical (Δ) : il ne faut plus toucher à la vis V_1 de la lunette.

Le réseau est fixé sur un support dont la base n'est pas forcément orthogonale au réseau.

- Placer le réseau sur la plate-forme comme indiqué ci-dessous. La vis W_1 permet le réglage de la verticalité du réseau par rotation de la plate-forme autour de l'axe (Δ_1) passant par les points d'appui des vis W_2 et W_3 .



- Orienter la plate-forme pour avoir autocollimation sur une des faces du réseau ; mettre en place la lame semi-réfléchissante de la lunette et observer le réticule et l'image retour du réticule obtenue par réflexion sur le réseau (on n'utilise pas la lumière issue du collimateur).
- Agir sur la vis W_1 de la plate-forme pour que les deux traits horizontaux des réticules coïncident.



Remarque : Il se peut que la lumière réfléchiée par le réseau soit très peu intense ; on ne peut alors pas voir l'image retour du réticule obtenue par réflexion sur le réseau. Dans ce cas, on peut observer une raie et la suivre lorsque l'on fait tourner la plate-forme ; il faut vérifier que la raie reste bien centrée verticalement. Si ce n'est pas le cas, agir sur les vis calantes de la plate-forme.

III - MESURES AVEC LE GONIOMÈTRE

1) Théorie du réseau :

On sait qu'un faisceau de rayons parallèles, monochromatiques et arrivant sur un réseau sous un angle d'incidence θ_i est dévié de manière sélective dans des directions θ telles que :

$$\sin \theta - \sin \theta_i = p \frac{\lambda}{a} \quad (1)$$

p : ordre du spectre (nombre entier relatif)

a : pas du réseau

Cette relation est difficilement exploitable car la normale au réseau n'est pas toujours repérable de façon précise.

La déviation des rayons est alors donnée par :

$$D = \theta - \theta_i$$

Minimum de déviation D_{min} :

Pour une longueur λ donnée et pour un spectre d'ordre p donné, la déviation D ne dépend que de l'angle d'incidence θ_i ; cette déviation passe par un minimum quand θ_i varie. On montre qu'au minimum de déviation :

$$\theta = -\theta_i = \frac{D_{min}}{2}$$

$$\Rightarrow \boxed{2 \sin \frac{D_{min}}{2} = p \frac{\lambda}{a}} \quad (2)$$

Cette relation (2) est facilement exploitable car la détermination de D_{min} est aisée.

Remarque : si l'ordre p du spectre est égal à zéro, les rayons ne sont pas déviés (la déviation est nulle quelle que soit la longueur d'onde λ) ; dans ce cas, l'axe de la lunette est dans le prolongement de l'axe du collimateur.

La mesure de l'ordre p du spectre est facile : il suffit de compter combien de fois on observe une raie d'une couleur donnée en partant du spectre d'ordre zéro (rayons non déviés).

La mesure du pas du réseau peut se faire en observant le réseau à travers un microscope.

La mesure de l'angle de déviation minimale permet :

- soit de mesurer le pas a du réseau si l'on connaît la longueur d'onde d'une raie donnée ; on peut choisir l'une des raies du doublet jaune d'une lampe spectrale au sodium ;
- soit de mesurer une longueur d'onde inconnue connaissant le pas a du réseau : c'est le but de la spectroscopie.

Si l'on ne connaît pas le pas du réseau, on peut néanmoins comparer entre elles deux longueurs d'onde.

Soit une raie de longueur d'onde λ_1 observée au minimum de déviation dans son spectre d'ordre p_1 :

$$2 \sin \frac{D_{min_1}}{2} = p_1 \frac{\lambda_1}{a}$$

Soit une raie de longueur d'onde λ_2 observée au minimum de déviation dans son spectre d'ordre p_2 :

$$2 \sin \frac{D_{min_2}}{2} = p_2 \frac{\lambda_2}{a}$$

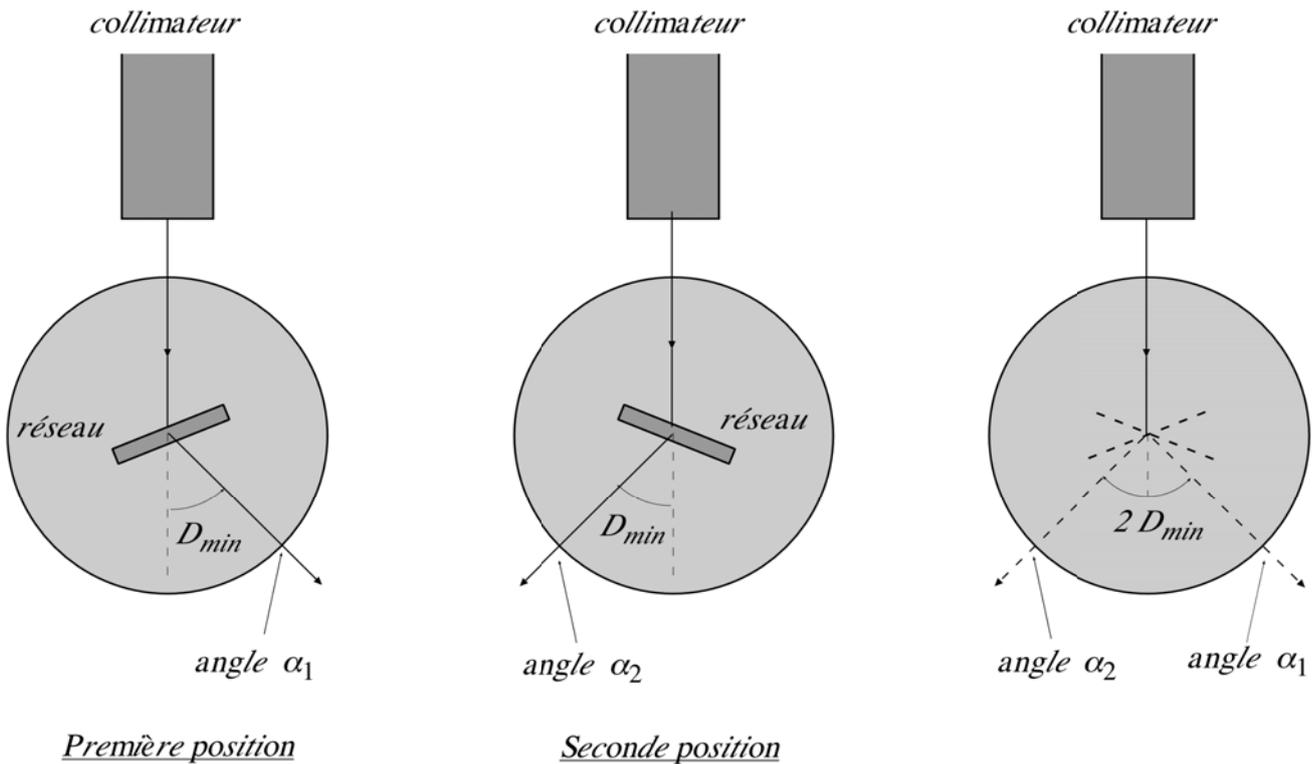
En faisant le rapport :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{p_1}{p_2} \frac{\sin \frac{D_{min_2}}{2}}{\sin \frac{D_{min_1}}{2}}$$

Si l'on connaît la longueur d'onde λ_1 , on peut en déduire la longueur d'onde λ_2 .

2) Principe de la mesure du minimum de la déviation :

- Éclairer la fente du collimateur avec la lampe spectrale au sodium.
- Observer une raie dans le spectre d'ordre p désiré (cela dépend du pas du réseau choisi).
- Tourner la plate-forme tout en observant la raie choisie pour rendre l'angle de déviation minimal : la raie doit se rapprocher le plus possible de l'axe du collimateur. Faire coïncider la raie choisie avec le trait vertical du réticule.
- Mesurer alors la position de la lunette par rapport au support (angle α_1) ; vérifier à l'œil nu que le plan du réseau est approximativement bissecteur des rayons incident et diffracté.



- Tourner la plate-forme et se placer dans la position de déviation minimale symétrique (cela revient à changer p en $-p$).
- Mesurer alors la position de la lunette par rapport au support (angle α_2) ; vérifier à l'œil nu que le plan du réseau est approximativement bissecteur des rayons incident et diffracté.
- En déduire l'angle de déviation minimale par :

$$D_{min} = \frac{1}{2} |\alpha_1 - \alpha_2|$$

Attention ! Si la graduation 0° ou 360° se situe entre α_1 et α_2 , il faut modifier la relation précédente !

3) Mesure du pas a du réseau :

- Éclairer la fente du collimateur avec la lampe spectrale au sodium.
- Mesurer l'angle de déviation minimale pour une des raies du doublet jaune pour un ordre p donné du spectre :

On donne : $\lambda_1 = 0,5890 \mu\text{m}$ pour la longueur d'onde la plus petite du doublet jaune.

- En déduire la valeur du pas a avec la relation :

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

Calcul d'incertitude sur a :

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

On prend le logarithme de chaque membre et on différentie (différentielle logarithmique) :

$$\ln a = \ln p + \ln \lambda - \ln 2 - \ln \left(\sin \frac{D_{min}}{2} \right)$$

Ne pas écrire la ligne ci-dessus qui est une étape intermédiaire "incorrecte" !

$$\frac{da}{a} = \frac{dp}{p} + \frac{d\lambda}{\lambda} - \frac{\cos \frac{D_{min}}{2}}{\sin \frac{D_{min}}{2}} \frac{dD_{min}}{2}$$

On passe ensuite aux incertitudes absolues car, dans le pire des cas, les incertitudes s'ajoutent :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \left| \frac{\cos \frac{D_{min}}{2}}{\sin \frac{D_{min}}{2}} \right| \frac{\Delta D_{min}}{2}$$

L'incertitude sur p est nulle car p est un nombre entier (il suffit de ne pas se tromper en déterminant p).

L'incertitude sur λ est supposée négligeable devant celle sur D_{min} .

L'incertitude sur D_{min} est la somme de deux incertitudes :

- l'une d'environ 5' qui correspond à l'appareil (réglage imparfait du parallélisme entre l'axe (Δ) et les fentes du réseau, mauvais alignement des axes du collimateur et de la lunette ...),
- l'autre due à l'incertitude de mesure de l'angle D_{min} .

$$D_{min} = \frac{1}{2} |\alpha_1 - \alpha_2| \quad \Rightarrow \quad \Delta D_{min} = \frac{1}{2} (\Delta \alpha_1 + \Delta \alpha_2)$$

On peut considérer que :

$$\Delta \alpha_1 \approx 2'$$

En déduire l'incertitude sur le pas a .

Calcul du nombre N de traits par mm :

$$N = \frac{1}{a}$$

Incertainitude sur N :

On calcule la différentielle logarithmique :

$$\ln N = -\ln a \quad (\text{ne pas écrire cette étape intermédiaire "incorrecte"})$$

$$\frac{dN}{N} = -\frac{da}{a} \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta a}{a}$$

En déduire ΔN .

Faire si possible deux mesures pour deux valeurs de p différentes.

4) Mesures de longueurs d'ondes inconnues :

a) Mesure d'une longueur d'onde inconnue en mesurant la déviation D_{min} correspondante :

- Mesurer la longueur d'onde λ_2 de la deuxième raie du doublet jaune du sodium, puis la raie vert clair. On pourra utiliser la formule :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{p_1}{p_2} \frac{\sin \frac{D_{min_2}}{2}}{\sin \frac{D_{min_1}}{2}}$$

- Remplacer la lampe spectrale au sodium par une lampe spectrale au mercure (ne pas éteindre la lampe au sodium car elle servira plus tard et elle s'use si on l'éteint et si on la rallume quelques minutes après).

Ne pas regarder directement la lampe à mercure à cause des rayons ultraviolets émis : danger !

- Pour chacune des raies les plus visibles de cette lampe, mesurer la déviation D_{min} correspondante et en déduire la longueur d'onde de la raie (faire un tableau comportant les valeurs de α_1 , α_2 , D_{min} , λ et $\Delta\lambda$).

b) Mesure de longueurs d'ondes inconnues en traçant la courbe d'étalonnage du spectroscopie :

- Tracé de la courbe d'étalonnage :

On choisit une lampe spectrale donnant un grand nombre de raies réparties dans tout le spectre visible et de longueurs d'ondes connues ; on choisit la lampe à mercure (**ne pas la regarder directement à cause des rayons ultraviolets émis**).

- Placer le réseau en position de déviation minimale pour un raie située environ au milieu du spectre (on choisit la raie verte du mercure dans le spectre d'ordre 1).
- Faire coïncider chaque raie de la lampe à mercure avec le trait vertical du réticule et repérer l'angle α correspondant à la position de la lunette.
- Tracer la courbe d'étalonnage : angle α en abscisse et longueur d'onde λ en ordonnée.

On donne pour le mercure les longueurs d'onde (en μm) des raies les plus intenses :

Violet : **0,4047** ; 0,4078 ; *indigo* : **0,4358** ; *vert-bleu* : 0,4916 ; *vert* : **0,5461** ; *jaune* : **0,5761** ; **0,5790** ; *orange* : 0,6234 ; *rouge* : 0,6907 .

- Détermination d'une longueur d'onde inconnue :

On va déterminer les longueurs d'onde du doublet jaune du sodium.

- Mettre la lampe au sodium devant la fente du collimateur.
- Mesurer les angles α correspondant à chacune des raies du doublet.
- En déduire leurs longueurs d'onde.

5) Observation des spectres de la lumière blanche

- Éclairer la fente du collimateur en lumière blanche (ne pas éteindre la lampe spectrale au sodium qui resservira plus tard).
- Observer les spectres d'ordre 0, 1, 2 ... en prenant des réseaux de pas différents. Observer les éventuels chevauchements des spectres.

IV - ANNEXE : LECTURE D'UN VERNIER

Un vernier permet de faire une mesure très précise d'une distance ou d'un angle. Il évite la gravure de graduations trop serrées qui seraient illisibles.

Deux ensembles de graduations sont gravés, l'un sur la partie fixe et l'autre, le vernier, sur la partie mobile de l'instrument de mesure. La longueur de n graduations sur le vernier correspond à la longueur de $n - 1$ graduations sur la partie fixe (en général, les valeurs de n sont 10, 20, 30 ...).

Vernier au 1/10 :

Vernier au 1/30 :

Vernier au 1/20 :

Le schéma ci-dessous correspond à un vernier de goniomètre gradué en degré.
Quel est l'angle correspondant ? Quelle est la précision de cette mesure ?

T.P. n°1 : SPECTROSCOPE À RÉSEAU**MATÉRIEL À PRÉVOIR PAR BINÔME****Goniomètre****Alimentation 6 V pour le goniomètre****Réseau à 600 traits / mm****Prisme****Miroir plan à poser sur la plate-forme du goniomètre****Lampes spectrales (Na, Hg, Cd)****2 alimentations PHYWE (lampes spectrales)****Feuille millimétrée**

$$2 \sin \theta - \sin \theta_i = p \frac{\lambda}{a} \quad 2 \sin \frac{D_{min_1}}{2} = p_1 \frac{\lambda_1}{a}$$