

## XI : Laser et Réseau

Dans cette séance de travaux pratiques, on va déterminer plusieurs caractéristiques de la diode laser :

- Largeur de cavité
- Intervalle spectral libre
- Divergence du faisceau gaussien

Dans une deuxième partie on utilisera la spectroscopie par réseau afin de déterminer le pas d'un réseau.

Matériel à disposition :

- Laser
  - 1 interféromètre de Michelson
  - 1 jeu de lentilles (100mm, 200mm, 500mm...)
  - 6 pieds d'optique de même hauteur
  - 1 diaphragme à iris
  - 1 écran
  - 1 « mètre »
  - 1 diode-laser
  - Lunettes de protection laser rouge
  - Lampe de poche
  - 1 Caliens (2 pour l'IM motorisé)
- Réseau
  - 1 Goniomètre
  - 1 réseau par transmission (plutôt 300 traits/mm)
  - Lampes spectrales Na et He.
  - Petit miroir plan

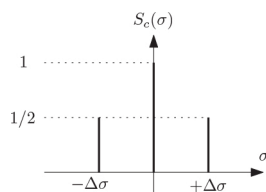
## I – Modes longitudinaux du laser

I-1) Document 1 : Modélisation de l'émission

Les modes longitudinaux d'une diode LASER correspondent aux fréquences présentes dans le spectre d'une diode LASER présentant un profil Gaussien. Ces fréquences sont distantes les unes des autres d'une même quantité appelée intervalle spectral libre et dépendant de longueur de la cavité  $L$  et de l'indice  $n$  qui dans notre cas vaut 3,5.

$$\Delta\nu = \frac{2c}{nL}$$

On va modéliser l'émission laser par :  $S_c(\sigma) = \delta_i(\sigma) + \frac{1}{2}\delta_i(\sigma - \Delta\sigma) + \frac{1}{2}\delta_i(\sigma + \Delta\sigma)$  où  $\begin{cases} \delta_i = \text{fonction dirac} \\ \sigma = \frac{1}{\lambda} \end{cases}$



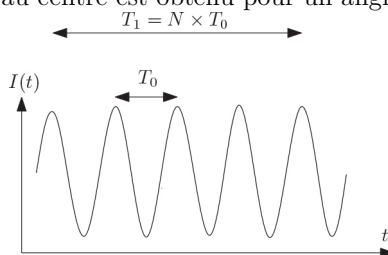
L'éclairement obtenu est de la forme :  $I(M) = 2I_0(1 + V(\delta) \cos(2\pi\delta\sigma_0))$  avec  $V(\delta) = 1 + \cos(2\pi\delta\Delta\sigma)$

## I-2) Document 2 : Mesure de la vitesse de motorisation

Comme pour le doublet du sodium, on va déterminer l'intervalle spectral libre séparant les modes longitudinaux du laser à l'aide de l'enregistrement des franges d'égale inclinaison

$$\Delta\nu = \frac{2c}{nL}$$

L'enregistrement des anneaux au centre est obtenu pour un angle d'inclinaison  $i$  nul tel que  $\delta = 2e$ .

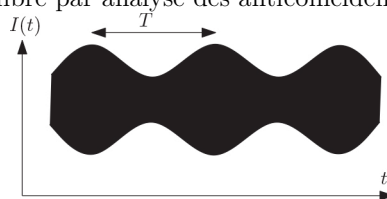


On obtiendra la vitesse de motorisation du Michelson en observant le chronogramme ci-dessus. En effet entre deux anneaux brillants on a :

$$\Delta\delta = \lambda_0 = \frac{1}{\sigma_0} = 2e = 2V T_0 \Rightarrow V = \frac{\lambda_0}{2T_0} = \frac{\lambda_0 N}{2T_1}$$

## I-3) Document 3 : Détermination de l'intervalle spectral libre

On obtiendra l'intervalle spectral libre par analyse des anticoincidences (ou des coïncidences) :



Le facteur de visibilité pris entre deux positions maximales nous permet d'écrire :

$$2\pi\delta\Delta\sigma = 2\pi \Rightarrow \Delta\sigma = \frac{1}{2VT}$$

Or :

$$\Delta\nu = \frac{2c}{nL} \Rightarrow c \Delta\sigma = \frac{2c}{nL} \Rightarrow nL = \frac{2}{\Delta\sigma}$$

Ainsi grâce à l'enregistrement on aura accès à la longueur de la cavité Laser.

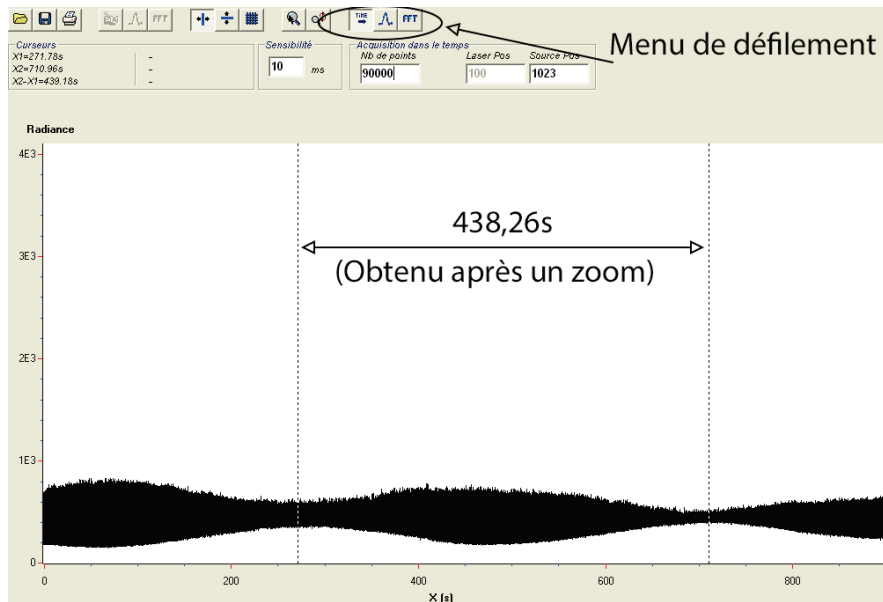
## I-4) Réalisation de l'enregistrement

## a) Réglage du Michelson

- Obtenez à l'aide du laser, les anneaux d'égale inclinaison.
- Pour l'enregistrement, il est très important d'avoir le centre des anneaux qui ne bouge quasiment pas pendant la manipulation. Il faudra donc chariotier plusieurs fois, et régler minutieusement l'angle entre les deux miroirs du Michelson
- Le « pixel » utilisé par défaut de la caméra, est le pixel central. Servez-vous d'un anneau (sur la monture de la caméra) pour bien placer le centre des anneaux au centre de la caméra.
- Une fois tous ces réglages, on règle l'acquisition pour Caliens :
  - o Menu Time : 90000 points avec sensibilité de 10 ms = 900s d'acquisition (suffisant pour la torche laser verte, par contre pour la diode laser rouge il faut 4000s)
  - o On lance l'acquisition avec le bouton à droite de « time »

Pour la torche Laser verte  $\lambda = 543 \text{ nm}$ , du Lycée on obtient les valeurs suivantes :

- o  $N=5, T_1 = 2,37\text{s}$



Pour une des diodes lasers « rouge » telle que  $\lambda_0 = 648nm$  on a :

- $N = 23, T_1 = 13,11s$
- $T = 1916s$

A l'aide de votre enregistrement :

- Déterminer la vitesse de motorisation avec son incertitude :  $u_v = \frac{\lambda_0 N}{2T_1^2} u_{T_1}$  dont on retrouvera la formule.
- Déterminer l'intervalle spectral libre en fréquence et longueur d'onde avec son incertitude.
- Déterminer la longueur de cavité et son incertitude sachant que  $n=3,5$

## II – Faisceau gaussien

II-1) Document 1 : rappel de cours

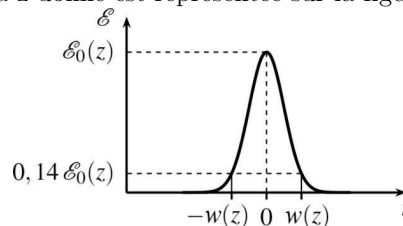
L'éclairement à la distance  $r$  de l'axe dans le plan d'abscisse  $z$  est :

$$\varepsilon(r, z) = \underbrace{\varepsilon_m \left( \frac{w_0}{w(z)} \right)^2}_{\varepsilon_0(z)} e^{-\frac{2r^2}{w(z)^2}}$$

Il s'agit d'un profil d'intensité gaussien car la fonction :  $f: x \rightarrow e^{-x^2}$  est appelée fonction de Gauss. Il apparaît trois paramètres importants pour la géométrie du faisceau :

- $w_0$  est un paramètre appelé le waist qui correspond à une largeur caractéristique du faisceau.
- $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2}$  qui est appelée le rayon du faisceau.
- $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$  est appelée longueur de Rayleigh.

La répartition radiale d'éclairement à  $z$  donné est représentée sur la figure suivante :

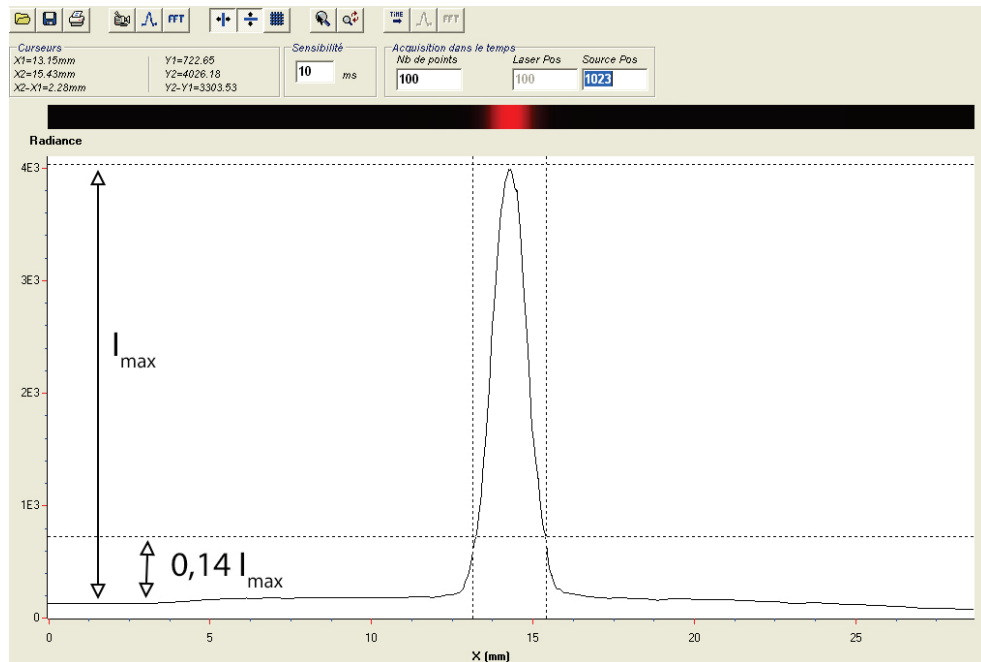


On a fait figurer les points à la distance  $r = w(z)$  de l'axe pour lesquels :  $\frac{\varepsilon(r,z)}{\varepsilon_0(z)} = \frac{1}{e^2} \sim 14\%$ .

## II-2) Principe de la mesure

Pour vérifier la forme gaussienne du faisceau, on va utiliser la barrette CCD de la caméra Caliens. On placera le laser à étudier, à une distance supérieure à 1m de la caméra, puis on placera entre les deux un système polariseur/analyseur afin d'empêcher le capteur de saturer.

- Réaliser le montage.
- A l'aide du système de polariseur, faites en sorte que le capteur ne sature pas.
- Placer le faisceau laser au centre de la caméra. Attention le centrage est important car on va comparer différentes situations. (On pourra le vérifier facilement car c'est au centre que l'intensité est maximale)
- Afin de lisser la courbe obtenue on pourra utiliser le menu « Acquisition » afin de filtrer les signaux hautes fréquences et de moyennner le signal obtenu (Par exemple, filtrage moyen et moyenne de 3 acquisitions)



- Effectuer 10 mesures entre 0,2 m et 2m, et relever les valeurs de  $w(z)$

## II-3) Waist et longueur de Rayleigh

- Représenter graphiquement  $w^2 = f(z^2)$
- En déduire  $w_0$  et  $z_R$ . Conclure.
- Commenter le caractère cylindro-conique du faisceau.

## III – Spectroscopie à réseau

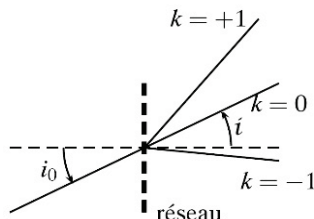
## III-1) Document 1 : Formule des réseaux

L'intensité lumineuse diffractée dans la direction  $i$  est maximale si la différence de marche  $\delta = a [\sin(i) - \sin(i_0)]$  entre les vibrations diffractées par deux fentes voisines est un multiple entier de  $\lambda$  : interférences constructives. D'où :

$$\sin(i) - \sin(i_0) = k \frac{\lambda}{a} = k \lambda n$$

## III-1) Document 1 : Formule des réseaux

L'intensité lumineuse diffractée dans la direction  $i$  est maximale si la différence de marche  $\delta = a [\sin(i) - \sin(i_0)]$  entre les vibrations diffractées par deux fentes voisines est un multiple entier de  $\lambda$  : interférences constructives. D'où :

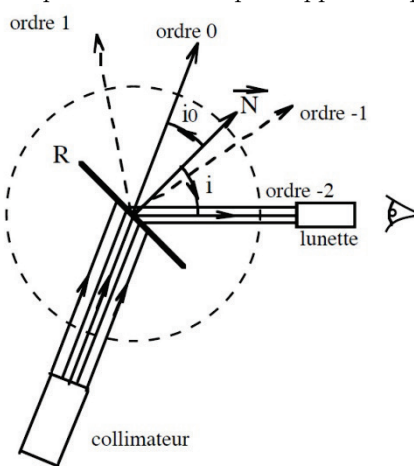


$$\sin(i) - \sin(i_0) = k \frac{\lambda}{a} = k \lambda n$$

Il s'agit de maxima principaux (il existe des maxima secondaires de très faible amplitude). Quelle que soit la longueur d'onde, nous observerons donc un maximum d'intensité dans la direction  $i = i_0$  (transmission directe), correspondant à  $k = 0$ . La direction des autres maxima dépend en revanche de la longueur d'onde. Si la lumière incidente est polychromatique, nous observons alors plusieurs spectres (la direction  $i_0$  mise à part) que  $k$  numérote :  $k$  (aussi noté  $p$ ) est appelé ordre du spectre. Il est très important de remarquer que le nombre d'ordres observables, pour une longueur d'onde donnée, est limité et dépend de l'angle d'incidence.

## III-2) Document 2 : Principe de la spectroscopie à réseau

Nous désirons pouvoir éclairer le réseau sous des incidences éventuellement fortes et de même observer des spectres correspondant à des angles  $i$  importants, tout en gardant la possibilité d'utiliser des lentilles pour la formation des images. Pour rester dans les conditions de Gauss, nous devons adopter un dispositif où les axes optiques des lentilles peuvent tourner par rapport au plan du réseau :



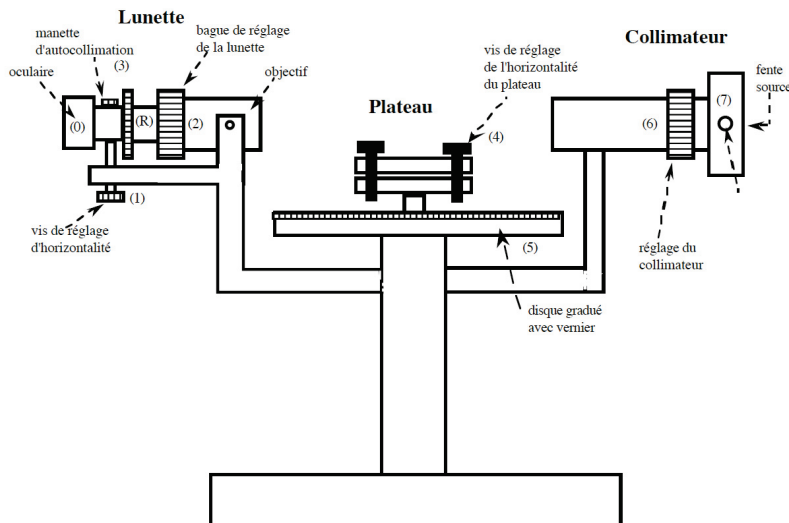
- R représente le réseau plan, il est posé sur un cercle gradué appelé limbe (ou « vernier ») qui permet de repérer des directions (il est gradué en degrés et minutes d'angles).
- Le collimateur permet d'obtenir un faisceau de lumière parallèle.
- La lunette est réglée à l'infini donc le faisceau que l'on observe est parallèle.
- $\vec{N}$  repère la normale au plan du réseau, les angles sont repérés par rapport à cette normale.

Les mesures d'angles aux différents ordres permettent de vérifier la formule du réseau et de déterminer  $a$ . Ce dispositif permet surtout de mesurer des longueurs d'onde, comme le spectromètre à prisme.

III-2) Réglage du spectromètre

a) Schéma et principe d'utilisation de l'appareil

Une source lumineuse éclaire une fente placée au foyer d'un collimateur qui fournit un pinceau cylindrique parallèle tombant sur le réseau. Le faisceau émergent parallèle est examiné à l'aide d'une lunette. L'objectif de la lunette en donne une image dans son plan focal où se trouve un réticule. Ce réticule sert à repérer l'image de façon précise. L'oculaire de la lunette sert à viser dans le plan focal de l'objectif. L'œil voit donc simultanément l'image de la fente source et le réticule situés tous deux dans le plan focal objet de l'oculaire.



b) Description des différents éléments constitutifs

- La fente source :

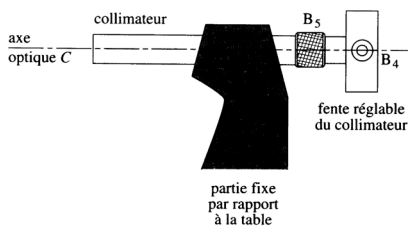
Celle-ci est située en amont du goniomètre, elle joue le rôle d'objet dans notre système. A l'aide de la petite vis on règle la largeur de la fente. On utilisera cette vis de façon raisonnable :

- Fente ouverte à 0.3 mm pour les réglages
- Fente ouverte à 0.1 mm pour les mesures sur les raies les plus visibles
- **Ne jamais forcer sur la vis on pourrait déformer les lames de la fente**

- Le collimateur :

Cet instrument permet d'avoir un objet à l'infini ; celui-ci est fixe et perpendiculaire à l'axe du goniomètre.

La vis B<sub>4</sub> permet de régler la largeur de la fente alors que la vis B<sub>5</sub> (sur certains appareils c'est un système de cylindres coulissants) permet de faire coulisser la lentille afin ici de mettre la fente dans le plan focal objet de celle-ci

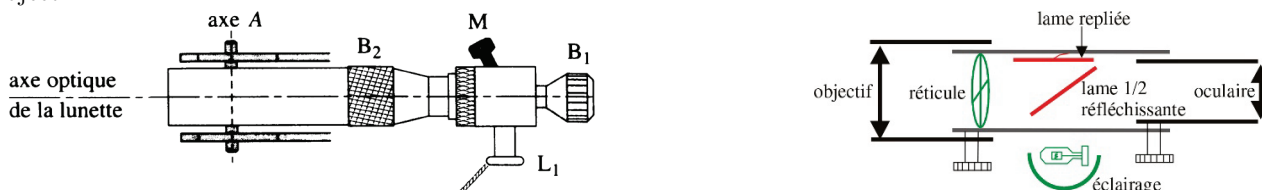


- La plate-forme :

Celle-ci est mobile autour d'un axe central Δ passant par le centre du disque gradué ; trois vis permettent en général de régler son orientation par rapport à son axe.

- La lunette :

Celle-ci est à réticule éclairé et est mobile autour de l'axe Δ. Deux vis permettent de l'orienter l'une dans un plan contenant Δ, l'autre dans un plan orthogonal. La vis B<sub>1</sub> permet de régler l'oculaire alors que la vis B<sub>2</sub> permet de régler l'objectif.



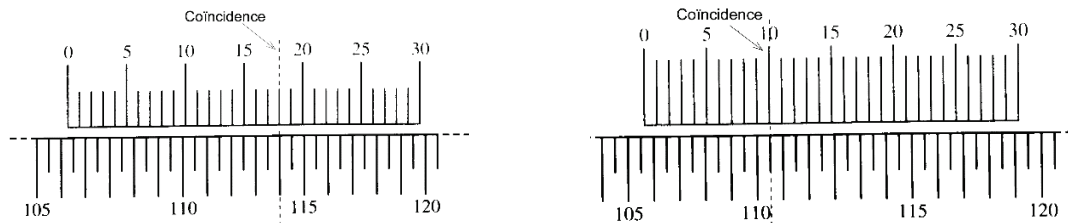
- Le vernier :

Un vernier est une règle mobile divisée en  $n$  parties égales, la division zéro étant le repère mobile lui-même. Ces  $n$  divisions correspondent à  $(n-1)$  divisions de la graduation fixe. On dit que le vernier est au  $n^{\text{ième}}$ .

Ici chaque division du cercle vaut  $\frac{1}{2}^\circ$  (ou  $1^\circ$ ) et Le vernier comporte 30 (ou 60) divisions qui couvrent 29 (ou 59) divisions du cercle. Par conséquent on lira dans un premier temps la valeur affichée en face du 0 du vernier, puis le vernier lui-même. La première lecture nous donnera la valeur de l'angle à  $30' = 0,5^\circ$  près, puis le vernier nous donnera la valeur de celui-ci à  $1'$  près

Le vernier affiche donc la valeur supplémentaire  $\alpha$  à ajouter à la première lecture, cette valeur  $\alpha$  correspond à la coïncidence entre la graduation  $\alpha$  et une graduation de la partie fixe.

Exemples :



- Dans le premier cas on lit comme angle :  $\beta = 106^\circ 0' + 18' = 106^\circ 18' = 106,30^\circ$
- Dans le deuxième cas on lit comme angle :  $\beta = 105^\circ 30' + 10' = 105^\circ 40' = 105,67^\circ$

### c) Réglages optiques

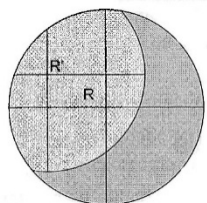
L'ordre des réglages se fait dans l'ordre inverse de propagation de la lumière dans le goniomètre

#### i- Réglage de l'oculaire :

Régler l'oculaire (0) à sa vue, de façon à voir nettement le réticule. Les élèves portant des verres correcteurs ont le choix entre les garder ou les ôter. Ce réglage peut être modifié à tout instant.

#### ii- Réglage à l'infini de la lunette :

On dispose devant l'objectif une face réfléchissante plane (lames à faces parallèles, miroir plan, réseau réfléchissant...) : méthode d'autocollimation. Si le réticule est exactement dans le plan focal de l'objectif, les rayons issus de la croisée R forment après réfraction à travers l'objectif un faisceau cylindrique de retour, mais cette face n'étant pas nécessairement normale à l'axe optique, le faisceau réfléchi aura en général une direction différente. Après une réfraction en sens inverse à travers l'objectif, le faisceau de retour vient donner en R' une image de R exactement dans le même plan que R, donc vue avec la même netteté. Le réglage consiste donc à obtenir l'apparence de la figure suivante.



Réticule et image de retour sont bien dans le même plan lorsque en donnant à l'œil de petits déplacements latéraux derrière l'oculaire, on ne constate aucun déplacement relatif de R et R'.

**A partir de ce moment, seul le réglage de l'oculaire peut être modifié, pour des utilisateurs de vue différente.**

#### iii- Réglage du collimateur

Le collimateur est un objet permettant d'obtenir un objet à l'infini. La distance objet-lentille doit être réglée de façon à donner une image à l'infini de ce réticule. Le collimateur est constitué d'une fente et d'un objectif convergent. Le réticule sera éclairé par une source de lumière extérieure au collimateur.

A l'aide de la lunette réglée sur l'infini, viser l'image de l'objet. Régler le tirage du collimateur (6) de façon à voir cet objet net.

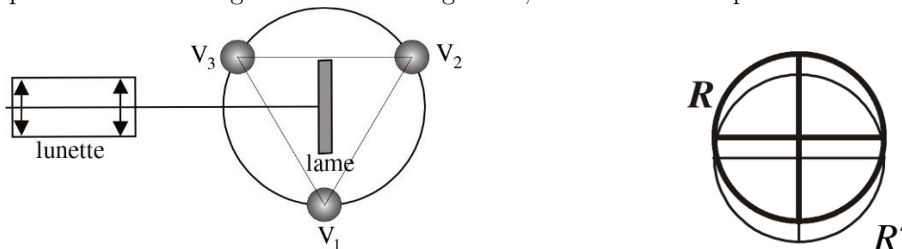
#### iv- Réglage de la plate-forme

Le but de ce réglage est de rendre l'axe de la lunette et du collimateur orthogonaux à l'axe de la platine sans que celui-ci soit nécessairement vertical.

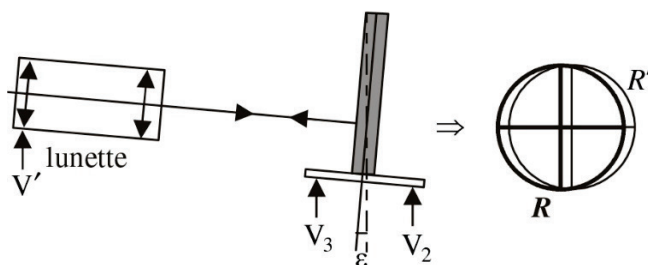
- 1) Régler la hauteur du plateau en fonction de la hauteur du réseau utilisé par la suite et bloquer la vis de blocage

de la hauteur du plateau. Descendre le plateau à l'aide des trois vis de réglage V1, V2 et V3 jusqu'à arriver en butée. Les remonter toutes les trois d'une même quantité (cinq fois un demi-tour), pour rendre le plateau à peu près horizontal.

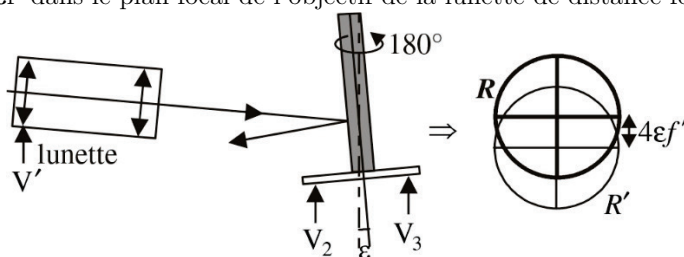
2) Poser le réseau « réflecteur » sur le plateau de façon à ce qu'elle soit approximativement perpendiculaire à l'axe V2-V3. Viser à la lunette pour observer l'image du réticule. En général, R et R' ne sont pas confondus.



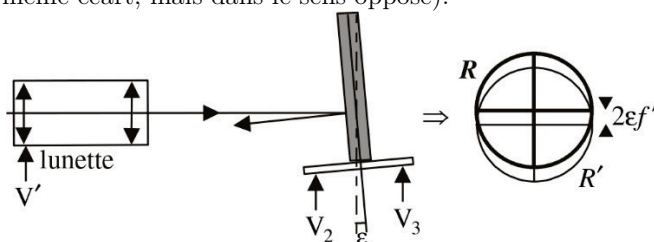
3°) En agissant sur la vis V' de réglage de l'horizontalité de l'axe de la lunette, faire coïncider les fils horizontaux de R et de R'. L'axe de la lunette est alors perpendiculaire aux faces de la lame, mais celle-ci peut être inclinée d'un angle  $\varepsilon$  avec l'axe du plateau.



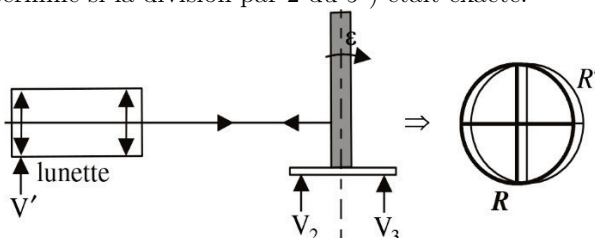
4°) Tourner le plateau de  $180^\circ$ , en général, l'image du fil horizontal R' ne coïncide plus avec celui de R. En effet, les rayons incidents provenant de la lunette arrivent sur la lame avec un angle d'incidence égal à  $2\varepsilon$  et la distance entre les traits horizontaux de R et R' vaut  $4\varepsilon f'$  dans le plan focal de l'objectif de la lunette de distance focale image  $f'$ .



5°) Agir sur la vis V' de la lunette de façon à diviser à vue l'écart entre les fils horizontaux par 2. Si cette distance est bien évaluée, cela revient à rendre l'axe de la lunette orthogonal à celui du plateau (si l'on faisait tourner de nouveau le plateau de  $180^\circ$ , on devrait retrouver le même écart, mais dans le sens opposé).

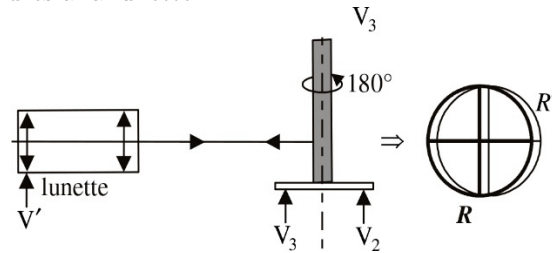


6°) Agir sur les vis V2 et V3 (sensiblement de la même quantité) de réglage de l'inclinaison du plateau de façon à faire coïncider les traits horizontaux de R et R'. Cette opération doit rendre les faces de la lame parallèles à l'axe du plateau. Le réglage de V', V2 et V3 serait terminé si la division par 2 du 5°) était exacte.





7°) Tourner le plateau de 180°. Si la coïncidence persiste, le réglage est terminé. S'il réapparaît un petit écart, il faut recommencer les opérations précédentes à partir du 5). Cependant ne perdez pas trop de temps sur ce réglage l'essentiel est dans la suite bien voir tous les ordres à la lunette.



Le réglage précédent étant effectué, ne plus toucher par la suite à la vis de réglage V' de l'horizontalité de l'axe de la lunette. On pourra toutefois modifier le réglage de l'horizontalité du plateau en jouant sur V1, V2, V3 pour que le plan du réseau soient bien parallèles à l'axe du plateau.

### III-3) Mesures

#### a) Mesure du pas du réseau au minimum de déviation

On utilise une lampe à vapeur de sodium, qui émet essentiellement les longueurs d'onde : 589,0 nm et 589,6 nm. On utilisera la plus grande de ces longueurs d'onde qui correspond à la raie la plus déviée. Toutes les mesures sont effectuées en fermant au maximum la fente du collimateur, pour faire un pointé précis. On donnera les résultats avec la précision maximale du vernier.

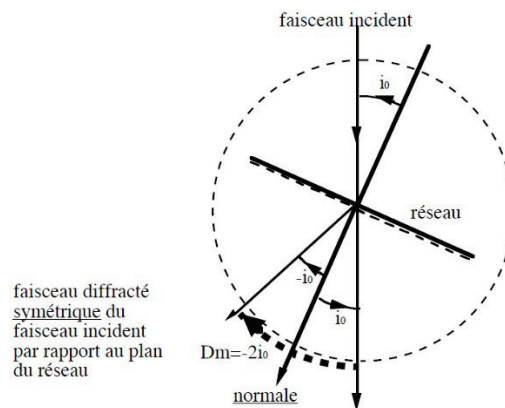
On place le réseau marqué n (100,300 ou 600 plus c'est élevé meilleur sera le pouvoir de résolution) traits par mm, indication qui constitue pour nous la valeur de référence constructeur, sur le plateau porte-réseau. On définit la déviation du réseau par la relation  $D = i - i_0$  ; celle-ci est minimale  $i = -i'$  pour un ordre d'interférence k donné. C'est à cette position que la mesure sera faite.

- Que devient la relation :  $\sin(i) - \sin(i_0) = k \frac{\lambda}{a} = k \lambda n$  au minimum de déviation.

On cherche le minimum de déviation pour un ordre d'interférence k donné du réseau. On préférera un ordre élevé,  $k=2$  (ou 1 si vous ne voyez pas l'ordre 2) par exemple, car on a une incertitude plus faible si k est grand.

- Obtention de la position  $D_m$  :

Placer le réseau à incidence normale par rapport au collimateur. Tourner la plateforme et suivez avec la lunette les raies à l'ordre k. Le minimum de déviation est obtenu lorsque le déplacement de l'image semble se ralentir juste avant de repartir en sens inverse. On mesure les deux positions angulaires  $\alpha$  et  $\beta$  (l'origine est sans importance car on opère par différence) pour les deux situations symétriques représentées sur la figure ci-dessous, pour l'ordre d'interférence  $k = 3$  du réseau.



On a alors  $D_m = \frac{|\beta - \alpha|}{2}$  et la relation  $\frac{2 \sin(D_m/2)}{k \lambda} = n$ , permet d'estimer la valeur de la grandeur n et de a.

- Donner le résultat de n et a obtenu avec son erreur élargie.

- On sait que le pouvoir de résolution de ce type d'appareil est donné par :  $\Delta \lambda = \frac{\lambda}{k n}$  où n est le nombre de traits du réseau. En déduire  $\Delta \lambda$ . Conclure

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

Prenez la lampe à vapeur d'Hélium au lieu de la lampe à vapeur de sodium et maintenant connaissant a, en déduire les longueurs d'onde des raies « fortes » de l'hélium : (Rouge, Jaune, Bleue)

- Donner le résultat de  $\lambda$  obtenu avec son erreur élargie pour les différentes raies.