

TP 3 : INTERFÉRENCES ET DIFFRACTION

PARTIE I : INTERFERENCES ET DIFFRACTION (fentes et réseaux) (1H20)

L'objectif de cette partie est de mettre en évidence les phénomènes de diffraction et d'interférences des ondes lumineuses et d'étudier l'influence de différents paramètres sur les figures d'intensité observées à grande distance et obtenues avec des fentes simples, des bifentes et des réseaux.

PARTIE II : RÉSEAU DE DIFFRACTION (1H20)

Cette partie est dédiée à l'étude d'un réseau de fentes par transmission monté sur un plateau goniométrique et à son utilisation pour mesurer les longueurs d'onde de raies spectrales d'une lampe à vapeur de mercure (Hg).

Compte-rendu : Le rapport devra présenter les mesures effectuées avec une description du mode opératoire employé (instruments utilisés (banc optique, règle, goniomètre, œil...) et les précisions associées. Une analyse des résultats est également demandée. **En aucun cas, il ne doit être une collection de résultats sans aucune explication ou interprétation.**

Remarque : Manipuler les éléments optiques avec précaution. Éviter de mettre vos doigts sur les surfaces optiques (lentille, réseau, fente...).

Précautions à observer lors de l'utilisation de lasers :

Les lasers utilisés en TP sont sans danger (classe II) à condition de respecter quelques règles élémentaires de sécurité:

- éviter les risques de réflexions parasites par des éléments réfléchissants placés sur le trajet du faisceau
- **/!\ NE JAMAIS REGARDER DIRECTEMENT LE FAISCEAU A L'OEIL NU. /!**

PARTIE I : INTERFERENCES ET DIFFRACTION (fentes et réseaux) (1H20)

A) DIFFRACTION À L'INFINI PAR UNE FENTE DE LARGEUR b

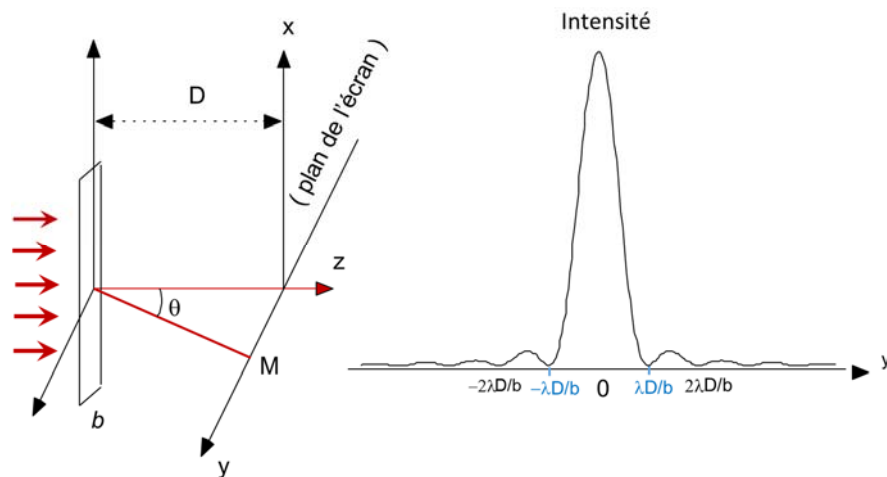
Le phénomène de diffraction apparaît expérimentalement lorsque l'image géométrique d'un objet est perturbée par la présence d'un obstacle sur le chemin de la lumière. La diffraction est l'ensemble des modifications de l'éclairement sur l'écran qui ne sont pas dues à l'image géométrique de l'objet. L'obstacle doit avoir une petite taille, de l'ordre de la centaine de fois (ou moins !) la longueur d'onde de l'onde incidente, pour que l'on puisse observer clairement ce phénomène. La résolution mathématique de la diffraction est généralement très complexe mais, dans le cas du régime de Fraunhofer, ou régime en champ lointain, les phénomènes de diffraction obtenus avec des obstacles particulièrement simples, comme une fente ou un trou, peuvent être modélisés par des fonctions elles aussi assez simples.

Théorie :

Une fente de largeur b éclairée en incidence normale par un faisceau parallèle (collimaté) de lumière monochromatique de longueur d'onde λ , assimilée à une onde plane, diffracte la lumière principalement par sa plus petite dimension (sa largeur b). La lumière est répartie suivant une direction perpendiculaire à la hauteur de la fente (dans le plan horizontal pour une fente verticale). Le calcul de la répartition de l'intensité lumineuse à grande distance de l'ouverture conduit à :

$$I = I_0 \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 \quad \text{avec } x = \pi a \frac{\sin \theta}{\lambda} \approx \pi a \frac{\theta}{\lambda},$$

avec I_0 calculable à partir de l'intensité (irradiance) de l'onde incidente. L'observation de la figure de diffraction, soit au foyer image d'une lentille convergente, soit dans un plan suffisamment éloigné de la fente, conduit au résultat représenté sur la figure ci-dessous pour le cas d'une observation sur un écran situé à grande distance de l'objet diffractant ($D \gg b$).



Comme l'indique l'expression de l'intensité I , sa valeur maximale est située au centre (en $y = 0$) et ses minima sont obtenus pour : $y = k \lambda D / b$, où k est un entier (positif ou négatif).

Les conditions d'observation dans le régime de Fraunhofer (diffraction à l'infini) sont satisfaites lorsque le « nombre de Fresnel » N est petit devant l'unité $\left(N = \frac{a^2}{\lambda D} < 1 \right)$, où a est la taille typique de l'ouverture diffractante (dans notre cas, la largeur b de la fente fine de grande hauteur) et D la distance d'observation.

Matériel :

- On utilise le faisceau rouge d'un laser compact (une diode laser) dont les propriétés de monochromaticité, de cohérence et de directivité nous permettent de le considérer comme une onde plane.
- On dispose d'une fente fine dont la largeur variable peut être ajustée à l'aide d'une vis de réglage.
- Une série de fentes fines sont disponibles sur une diapositive contenant 7 fentes simples de largeur calibrée : 400, 280, 120, 100, 50 et 40 μm . Une fente « mystère » est placée en bout de rangée, après la fente la plus fine.

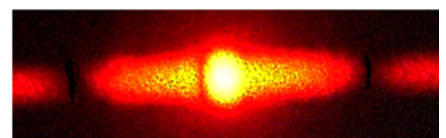
Manipulation :

- ✓ Placer le laser sur le banc optique ainsi que la fente fine réglable. Ajuster les hauteurs de ces éléments et positionner le faisceau bien au centre de la fente afin de visualiser la figure de diffraction sur un écran blanc éloigné (placé à une distance $D > 1$ m parallèlement au plan de la fente), voire directement sur le mur de la salle. Modifier la largeur de la fente et observer son effet sur la figure de diffraction.
- ✓ Rapprocher l'écran et observer les modifications de la répartition spatiale de la lumière diffractée. Préciser l'influence de la distance D sur la figure observée. Placer l'écran à quelques dizaines de cm derrière la fente. La condition du régime de Fraunhofer, donnée par le nombre de Fresnel, est-elle encore vérifiée ? Conclusion.
- ✓ Remplacer la fente réglable par la diapositive contenant 7 fentes simples (diapositive noire). Ajuster le dispositif afin d'observer sur un écran à grande distance la figure de diffraction d'une fente. Mesurer avec soin la largeur Δy du maximum central (limitée par les 2 positions symétriques d'intensité nulle).
- ✓ Recommencer la mesure pour chaque fente de la diapositive.
- ✓ Représenter la largeur Δy du maximum central en fonction de l'inverse de la largeur b des fentes ($\Delta y = f(1/b)$). Conclusion.
- ✓ Déterminer la largeur de la fente « mystère ».

Mesure du diamètre d'un cheveu (Bonus)

Théorème de Babinet : Le théorème de Babinet dit que, en dehors de l'image géométrique, les figures de diffractions données par deux objets complémentaires¹ sont identiques. Ainsi, la figure de diffraction produite par un fil est identique (sauf au centre) à celle produite par une fente simple ayant la même largeur que le diamètre du fil utilisé.

- ✓ Fixer à l'aide d'un bout de ruban adhésif un cheveu sur le porte échantillon.
- ✓ Faire diffracter le faisceau laser par le cheveu. En déduire son diamètre à partir de la mesure de la largeur de la tache de diffraction. Précision ?

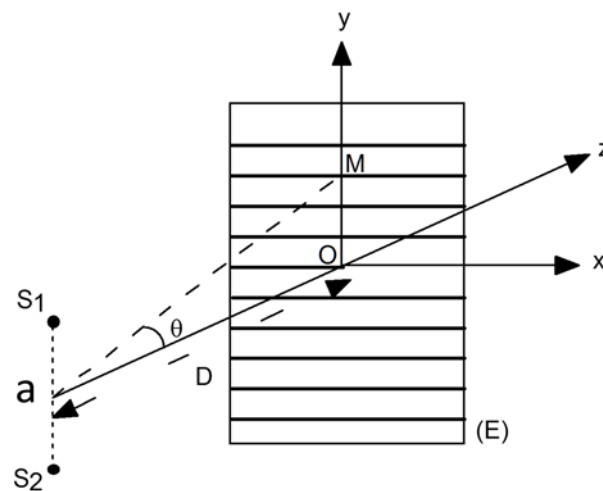


¹ Deux objets sont dits complémentaires si la partie opaque de l'un correspond aux parties transparentes de l'autre.

B) INTERFÉRENCES À DEUX ONDES – DISPOSITIF DE YOUNG

Théorie :

Deux sources ponctuelles monochromatiques identiques distantes de a créent dans l'espace où les ondes qu'elles émettent se superposent une figure d'interférences constituée d'une alternance de franges claires et sombres (non localisées). Les lieux des points M d'égale différence de marche δ , $\delta = (S_1M - S_2M)$ sont des hyperboloïdes de révolution de foyers S_1 et S_2 . Si on interpose un écran plan (E) placé parallèlement à la droite S_1S_2 à une distance D , la figure obtenue apparaît comme une succession de franges lumineuses quasi-droites au voisinage du point O de l'écran situé sur la médiatrice de S_1S_2 . Ces franges alternativement sombres (lorsque M est tel que $\delta = (2p+1)\frac{\lambda}{2}$, avec p entier) et brillantes (lorsque M est tel que $\delta = p\lambda$) sont des franges perpendiculaires au segment S_1S_2 (voir figure ci-dessous).



On peut montrer (cf. cours) que l'intensité en M est donnée par la relation :

$$I = I_0 \left(1 + \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right) \text{ avec } \delta = a \sin \theta.$$

Proche de l'axe (θ petit), nous avons $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{D}$ et donc $\delta \approx a \frac{y}{D}$. L'ordre d'interférence

$p = \frac{\delta}{\lambda} = a \frac{y}{\lambda D}$ (p réel quelconque) est nul au centre ($y = 0$), entier au niveau des franges brillantes (maxima d'intensité) et demi-entier au niveau des franges sombres (minima nuls d'intensité). Les directions des maxima d'intensité sont donc données par la relation: $\sin \theta = p \frac{\lambda}{a}$ avec p entier. La distance entre franges

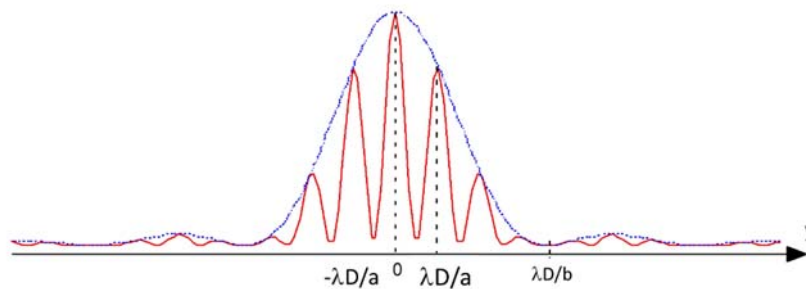
d'égale intensité, appelée interfrange i , est donnée par : $i = \lambda \frac{D}{a}$.

Le champ d'interférences dépend fortement de la manière dont sont réalisées pratiquement les deux sources secondaires. Celles-ci doivent impérativement être dérivées de la même source primaire (cohérence mutuelle). Le dispositif utilisé ici est celui des « fentes d'YOUNG » dans lequel la source primaire éclaire un ensemble de deux fentes fines parallèles de largeur b et distantes de a (l'emploi de fentes à la place de trous permet d'observer la figure d'interférences dans des meilleures conditions d'éclairement). L'onde issue de la source primaire est diffractée par les deux fentes fines. Dans la région où les ondes diffractées par ces deux

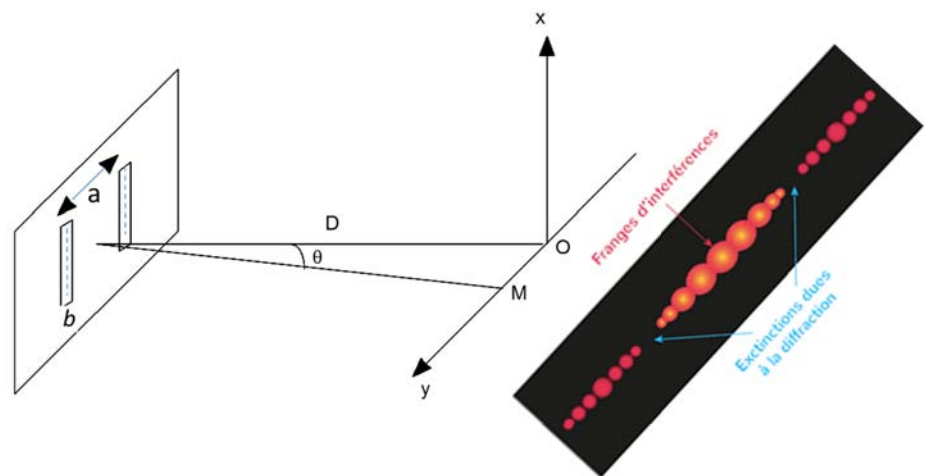
fentes se superposent, elles interfèrent. Dans ces conditions, on montre que l'intensité en un point M de l'écran (dans la direction θ), qui résulte de la diffraction (due à la largeur très faible des fentes) **et** de l'interférence (due à la présence des deux fentes) (voir figure ci-dessous), est donnée par :

$$I = I_0 \underbrace{\left(\frac{\sin x}{x} \right)^2}_{\text{diffraction}} \underbrace{(1 + \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda})}_{\text{interférence}} \quad \text{avec } x = \pi b \frac{\theta}{\lambda}, \theta = \frac{y}{D} \text{ et } \delta = a \frac{y}{D}$$

On reconnaît le produit de la fonction de diffraction d'une fente de largeur b (enveloppe) par la fonction d'interférences de deux fentes. Sur l'axe y , on observe alors la répartition d'intensité représentée sur la figure ci-dessous.



Remarque : la largeur des fentes n'étant pas négligeable, a représente la distance entre les milieux des deux fentes.



Matériel :

- 3 lasers à disposition (rouge, vert et bleu)
- 3 bifentes sur un jeton métallique inséré sur un porte-composant rotatif.

Manipulation :

- ✓ Positionner le porte-composant rotatif de façon à placer la bifente choisie sur l'axe du faisceau du laser rouge. Ajuster la position du support pour optimiser la figure d'interférence sur un écran situé à une distance D suffisamment éloigné (au bout du banc) pour obtenir des franges bien définies et avec un bon contraste. Noter la valeur de D .
- ✓ Mesurer l'interfrange i en faisant la moyenne sur le plus grand nombre de franges possible. Mesurer également la largeur de l'enveloppe des franges. À partir des relations théoriques, en déduire l'écartement a de la bifente étudiée et la largeur b d'une fente avec leurs précisions.

- ✓ Recommencer ces mesures avec les 2 autres bifentes présentes sur le jeton.
- ✓ Replacer la bifente qui présente le plus fort écartement a et mesurer l'interfrange i pour différentes valeurs de la distance D (au moins 4 valeurs). Représenter l'interfrange i en fonction de D ($i = f(D)$). Conclusion.
- ✓ Remplacer le laser rouge par le laser vert et replacer l'écran au bout du banc. Mesurer l'interfrange observé et déterminer la longueur d'onde du laser avec sa précision.
- ✓ Recommencer la mesure précédente avec le laser bleu. (On aura intérêt à observer la figure d'interférences sur une feuille de papier positionnée au niveau de l'écran pour améliorer sa visibilité.)
- ✓ Vos résultats sont-ils en accord avec la variation attendue de l'interfrange en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente ?

C) INTERFÉRENCES À N ONDES – RÉSEAU

Théorie :

Si on éclaire un ensemble – on parle de réseau – de N fentes identiques de mêmes caractéristiques (largeur b , espacées de a), toutes parallèles entre elles, la figure obtenue est similaire à la précédente avec des franges alternativement sombres et brillantes dont l'enveloppe est modulée par la fonction de diffraction d'une fente. Cependant, la largeur des franges brillantes étant inversement proportionnelle au nombre N de fentes éclairées, les franges brillantes deviennent très fines et l'on observe le phénomène de diffraction-interférence typique d'un réseau. La direction des maxima d'irradiance est donnée, comme dans le cas des fentes d'Young, par :

$$\sin \theta_p = p \frac{\lambda}{a}, \text{ avec } p \text{ entier.}$$

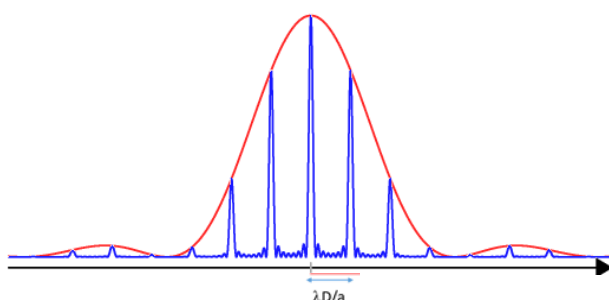
$p = 0; \pm 1; \pm 2 \dots$ sont les ordres de diffraction du réseau. La distance a séparant 2 fentes consécutives est appelé « pas » du réseau et $n = 1/a$ est le nombre de fentes (ou nombre de traits) par unité de longueur.

Pour une observation sur un écran situé à une distance D grande devant a , on peut admettre que l'intensité lumineuse recueillie en un point M sur l'écran dans la direction θ , après diffraction (due à la largeur des fentes) **et** interférence (due à la présence des N fentes), est donnée par :

$$I = I_0 \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 \left(\frac{\sin \left(\frac{N}{2} 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right)}{\sin \left(\frac{1}{2} 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right)} \right)^2 \quad \text{avec } x = \pi b \frac{\theta}{\lambda}, \theta = \frac{y}{D} \text{ et } \delta = a \frac{y}{D}$$

Autour de la frange brillante centrale ($p = 0, I = I_{\max} = N^2 I_0$), chaque frange brillante est à la même position que la frange brillante correspondante lors de l'expérience avec les deux fentes (l'interfrange est donc

$i = \lambda \frac{D}{a}$). Sur l'axe y , on observe alors la répartition d'intensité représentée sur la figure ci-dessous.



Manipulation

- ✓ Vous disposez d'un support contenant 3 réseaux de pas différent. Placer le support sur le banc. Éclairer un des réseaux sous incidence normale avec le faisceau laser rouge et placer l'écran de manière à visualiser les différents *maxima* de lumière correspondant aux différents ordres de diffraction. Mesurer les angles θ_p correspondant aux quatre premiers ordres (à droite et à gauche) et en déduire le nombre N ($N=1/a$) de traits/mm du réseau.
- ✓ Recommencer ces mesures avec les 2 autres réseaux.
- ✓ Utiliser le réseau de votre choix pour déterminer la longueur d'onde du laser bleu avec son incertitude.

PARTIE II : RÉSEAU DE DIFFRACTION (1H20)

L'objectif de cette partie est d'étudier un réseau de fentes par transmission monté sur un plateau goniométrique pour des mesures spectroscopiques de longueurs d'onde d'une lampe à vapeur de mercure (Hg).

Remarques :

- Ne posez pas les doigts sur les réseaux !
- /!\ N'éteignez pas les lampes au mercure. Il faut attendre qu'elles refroidissent avant de les rallumer. Le temps de chauffe nécessaire à leur bon fonctionnement est assez long.

Théorie :

Un réseau est une structure périodique imposant à une onde plane incidente une variation périodique de son amplitude, de sa phase ou des deux à la fois. Dans son principe général de fonctionnement, un réseau diffracte l'onde incidente. Cela revient aussi à considérer un phénomène d'interférences à ondes multiples produit par l'ensemble des motifs élémentaires du réseau. Un réseau est obtenu par une modulation périodique d'une surface plane (réseau plan) ou sphérique (ce qui permet la formation d'images en même temps que la dispersion des longueurs d'ondes). Elle est obtenue soit par gravure d'une matrice métallique et reproduction sur support plastique (réseau gravé, réseau échelle), soit par des procédés holographiques utilisant des résines photosensibles (réseau holographique). Le profil de la gravure peut être sinusoïdal ou plus carré, donnant ainsi des propriétés dispersives différentes. Le réseau le plus simple est constitué par un ensemble de fentes parallèles espacées de manière régulière (dans ce cas, une fente est donc le motif élémentaire du réseau).

Propriétés dispersives des réseaux de diffraction : un réseau est caractérisé par sa période de modulation a (pas du réseau) ou son inverse, le nombre de traits par millimètre ($N=1/a$). Il peut être utilisé en réflexion ou en transmission. Pour une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ , d'intensité I_0 et d'angle d'incidence i_0 , on peut montrer que l'intensité diffractée par un réseau de N fentes dans une direction faisant l'angle i avec la normale au réseau (voir figure ci-dessous) est définie par :

$$I(i) = N^2 I_0 \underbrace{\text{sinc}^2\left(\pi b \frac{\sin i}{\lambda}\right)}_{\text{diffraction d'une fente}} \underbrace{\left[\frac{\sin(N \frac{\varphi}{2})}{N \sin(\frac{\varphi}{2})} \right]^2}_{\text{interférence des } N \text{ ondes}}$$

avec $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} a(\sin i - \sin i_0)$ et où N représente le nombre total d'éléments diffractants et b la largeur d'un élément diffractant.

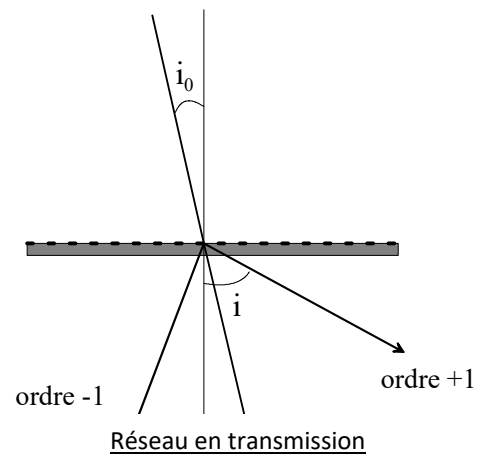
Remarque : L'étalement angulaire de la lumière diffractée (identique) par chaque fente sera d'autant plus grand que la largeur b de la fente sera faible. Cette diffraction (identique pour chaque fente) permet aux différentes ondes issues des N fentes de se recouvrir et d'interférer, l'interférence totale produite étant décrite par la fonction réseau (terme entre crochets dans l'équation ci-dessus).

L'intensité diffractée par le réseau $I(i)$ est pratiquement nulle, sauf pour les valeurs de i_0 et i qui annulent simultanément numérateur et dénominateur, c'est-à-dire lorsque le déphasage φ entre deux fentes successives est tel

que : $\sin i_p - \sin i_0 = p \frac{\lambda}{a}$, où p est un nombre entier, appelé

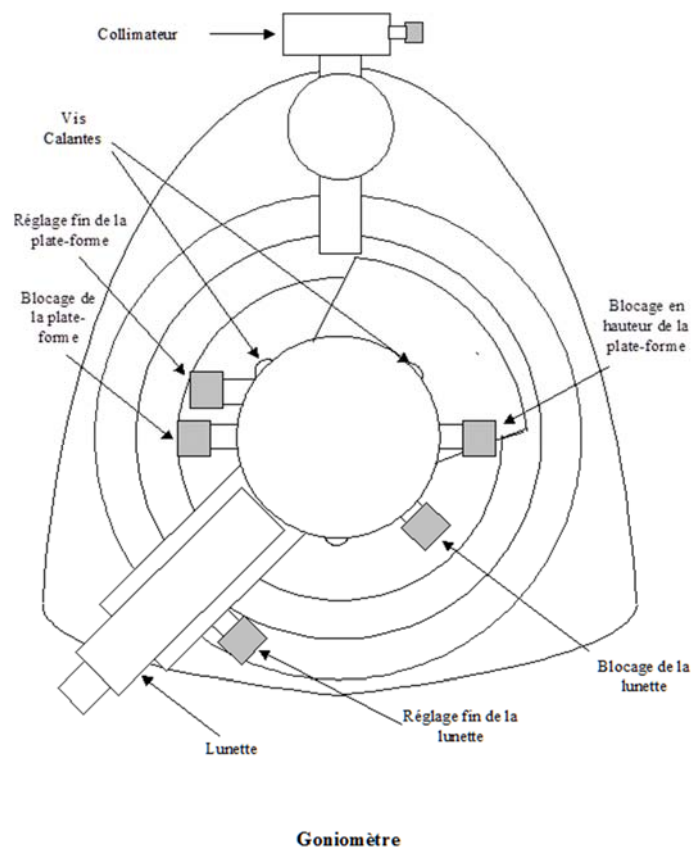
« ordre d'interférence ».

Pour $p = 0$, on observe la transmission du réseau. Dans ce cas, l'angle i ne dépend pas de la longueur d'onde et toutes les longueurs d'onde sont transmises dans la même direction. On dit que l'ordre zéro n'est pas dispersif. Par contre, pour $p \neq 0$, il y a dispersion de la lumière : les différentes longueurs d'onde sont diffractées dans des directions i_p différentes.



Appareillage utilisé :

L'instrument utilisé s'appelle un **goniomètre**. C'est un instrument de mesure précise des angles.



Le goniomètre comporte :

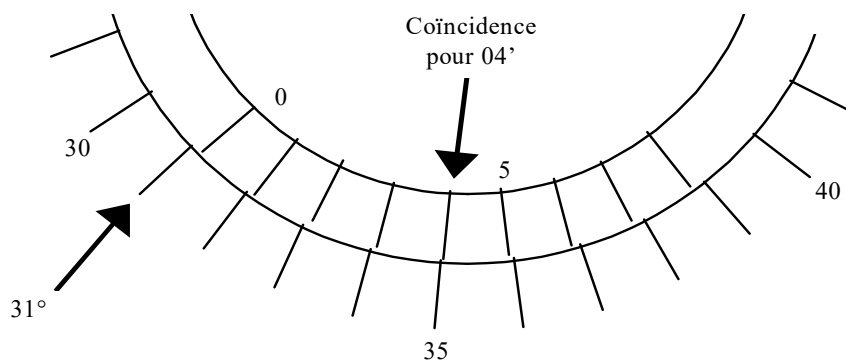
- une plateforme mobile supportant le réseau,

- une lunette collimatrice, composée d'une fente verticale réglable et d'un objectif, qui permet d'éclairer le réseau en lumière parallèle,
- une lunette de visée autocollimatrice mobile autour d'un axe vertical pour une observation directe à l'œil dont on peut repérer la position à l'aide de graduations.

Lecture d'une mesure d'angle au goniomètre :

Pour faire une mesure, on doit prendre sur le cercle divisé la valeur, en degrés, de la graduation juste inférieure au 0 du vernier, puis la valeur du trait du vernier, en minute d'arc ($1/60^\circ$), qui est en correspondance avec un des traits du cercle divisé.

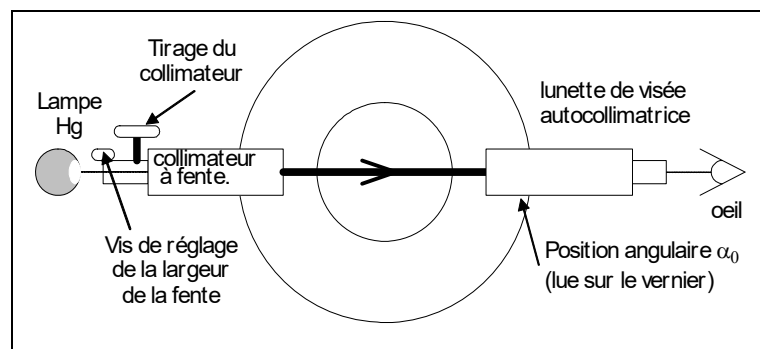
Exemple : sur le schéma ci-dessous on lira : $\alpha = 31^\circ 04' \pm 1'$



Montage :

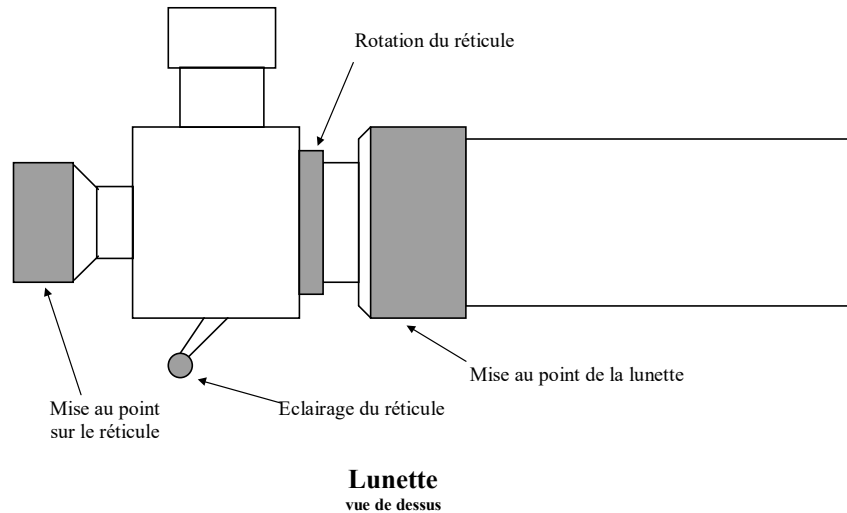
Un réseau par transmission est placé sur le plateau du goniomètre. Il est éclairé par un faisceau de lumière polychromatique provenant de la lampe spectrale à vapeur de mercure. Les mesures vont s'effectuer en incidence normale ($i_0 = 0$). Pour s'assurer que le réseau est bien placé perpendiculairement au faisceau de lumière incidente, effectuez les réglages suivants :

- Sans réseau, alignez la lunette de visée et la lunette collimatrice sur un même axe : placez la lunette de visée dans le prolongement de la lunette collimatrice de façon à observer dans la lunette de visée l'image de la fente donnée par la lunette collimatrice. Diminuez la largeur de la fente pour observer à la lunette des raies aussi fines que possible et ainsi augmenter la précision de la mesure.



- Positionnez le fil du réticule de la lunette de visée en coïncidence exacte avec l'image de la fente. Tourner la bague mise au point du réticule (voir figure ci-dessous) afin de voir nettement les fils du réticule. Puis tourner la bague de mise au point de la lunette (cf. figure ci-dessous) pour observer une image nette de la

fente. Normalement, après ce réglage, on doit voir simultanément le réticule et l'image de la fente nets. Bloquez alors la rotation de la lunette de visée.



- Placez le réseau (**300 traits/mm**) sur le plateau mobile. Cachez la source de lumière de la lampe spectrale, et allumez le rétro-éclairage de la lunette de visée (levier éclairage du réticule ci-dessus). Tournez le plateau mobile jusqu'à ce que la lumière de rétro-éclairage revienne dans le champ de vision de la lunette de visée, après réflexion sur le réseau. Bloquez le plateau mobile. *Le réseau est alors en autocollimation et la lumière de la source est maintenant en incidence normale.* Notez la valeur de l'angle associé à cette position de la lunette. Éteignez le rétro-éclairage.
- Repérez l'ordre $p = 0$ pour lequel la lumière n'est pas diffractée.
- Déplacer la lunette pour observer les raies. FAIRE VERIFIER VOTRE MONTAGE PAR L'ENSEIGNANT

Mesures :

- Observez à travers la lunette le spectre transmis par le réseau, **dans l'ordre ± 1** , en tournant la lunette de visée vers la droite ou la gauche.
- Notez les positions angulaires α_p des ordres $+1$ et -1 associées à chaque raie spectrale observée. En déduire les angles i_p correspondants.
- A partir de ces mesures, déterminez les longueurs d'ondes des raies spectrales observées avec leurs incertitudes.
- Conclure.