

TP d'optique n°5
Optique physique
 Interférences et diffraction

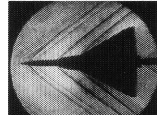


FIGURE 1 – Sillage supersonique visualisé par strioscopie.

Ce T.P. prolonge le cours d'optique physique. Il se compose de trois parties indépendantes :

- ✱ l'étude qualitative et quantitative d'un dispositif interférentiel : le bi-prisme de Fresnel,
- ✱ l'étude essentiellement qualitative de la diffraction à l'infini,
- ✱ une ouverture sur l'utilisation de l'optique physique pour le traitement des images : la strioscopie.

Pour une meilleure gestion du matériel disponible, les binômes devront respecter le temps imparti sur chaque expérience.

I. Biprisme de Fresnel (1h30).

1. Un peu de théorie.

Deux prismes en verre d'indice n et de petit angle α sont accolés par leur base. Eclairés sous incidence normale par une source ponctuelle à l'infini, ils dévient la lumière d'un petit angle β vers leurs bases. Montrer rapidement que, dans l'approximation de petits angles, on a $\beta = (n - 1)\alpha$. Là où les deux faisceaux se superposent, c'est-à-dire dans un volume dont l'intersection avec le plan de figure est le parallélogramme OABC, il y a interférence (cf figure 2).

L'amplitude totale est somme des amplitudes des deux faisceaux, c'est à dire de deux ondes planes ; on a donc :

$$\underline{s}(\mathbf{M}) = \underline{s}_0 \exp(j\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{\text{OM}}) + \underline{s}_0 \exp(j\omega t - \vec{k}_2 \cdot \vec{\text{OM}})$$

$$\underline{s}(\mathbf{M}) = \underline{s}_0 \exp(j\omega t) \left(\exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}_1 \cdot \vec{\text{OM}}\right) + \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}_2 \cdot \vec{\text{OM}}\right) \right)$$

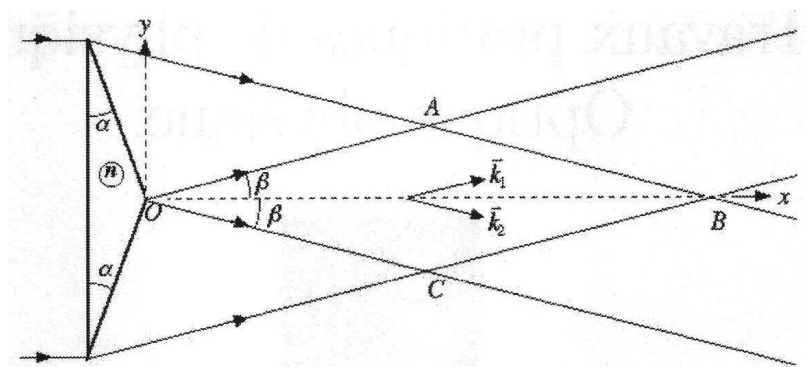


FIGURE 2 – Biprisme de Fresnel.

où $\vec{u}_1 = \cos \beta \vec{u}_x + \sin \beta \vec{u}_y$ et $\vec{u}_2 = \cos \beta \vec{u}_x - \sin \beta \vec{u}_y$ sont les vecteurs unitaires de $\vec{k}_1$ et $\vec{k}_2$.

L'intensité est alors :

$$I = |s(M)|^2 = \underline{s}(M) \cdot \underline{s}^*(M) = \dots = 2|\underline{s}_0|^2 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} (\vec{u}_1 - \vec{u}_2) \cdot \overrightarrow{OM} \right) \right]$$

$$I = \frac{I_{\max}}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} 2y \sin \beta \right) \right] \simeq \frac{I_{\max}}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} 2y \beta \right) \right]$$

(On s'attend à ce que vous détailliez les calculs intermédiaires.)

L'interfrange dans un plan $x = C^{\text{te}}$ est donc indépendante de x et vaut $i = \frac{\lambda}{2\beta}$.

2. Le dispositif expérimental.

A l'entrée d'un banc d'optique on dispose une lampe spectrale au mercure (haute pression) alimentée par une tension de 480 V. L'usage d'un filtre (ici jaune ou vert) permet d'isoler une longueur d'onde. À l'aide d'un condenseur $\mathcal{C}^1$, on concentre la lumière sur une fente rectiligne très fine $\mathcal{F}$, elle-même placée au foyer d'une lentille convergente $\mathcal{L}$. L'onde plane qui en sort arrive sur le biprisme de Fresnel $\mathcal{B}$ et on veillera au parallélisme de la fente et de l'arête du biprisme.

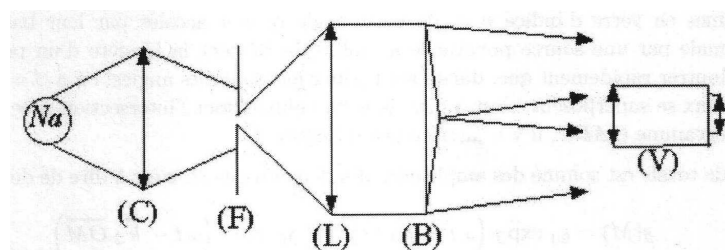


FIGURE 3 – Interférences avec le biprisme

1. lentille de très courte focale, ici 5 cm.

On observera le champ d'interférences grâce à un oculaire de Fresnel ou viseur à oculaire micrométrique $\mathcal{V}$ (cf figure 3). Celui-ci permet de grossir les franges d'interférence ; il est muni d'un réticule dont le déplacement est repéré par une vis micrométrique sur le tambour latéral. Ce qui permet d'effectuer des mesures, en outre d'interfrange.

3. Réglages et observations.

Il est nécessaire de respecter soigneusement les conditions de Gauss (rayons lumineux proches de l'axe optique du système et peu inclinés sur celui-ci) ; on veillera donc à l'alignement en hauteur et en horizontalité des différents éléments.

Concentrer la lumière émise par la lampe à mercure sur la fente source S à l'aide du condenseur. La fente source étant correctement éclairée, la placer au foyer de la lentille ($f' = 45$ cm par exemple) par autocollimation. On ne modifiera plus les positions des quatre éléments {lampe, condenseur, fente et lentille} au cours de la manipulation.

Positionner le biprisme en veillant à ce qu'il soit bien éclairé puis observer sur un écran mobile le champ d'interférence du biprisme. Améliorer le contraste en jouant sur la largeur de la fente source et sur le parallélisme de la fente et de l'arête du biprisme.

Interposer le filtre jaune entre le condenseur et la fente source (attention à ne pas faire fondre le filtre en plastique).

Observer les franges d'interférence à travers l'oculaire de Fresnel, le lieu de l'observation importe peu pour l'instant, donc choisir un position proche du biprisme de façon à pouvoir améliorer la figure d'interférence en regardant et en réglant simultanément. Bien sûr c'est l'œil qui décide qu'on est arrivé au contraste optimum. On réalisera aussi, en jouant sur la largeur de la fente, un compromis entre bon contraste et bonne luminosité.

Décrire l'aspect de la figure obtenue.

4. Mesure de l'angle du prisme.

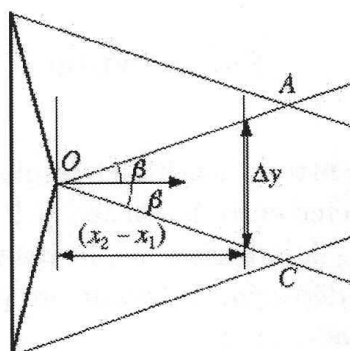


FIGURE 4 – Mesure de l'angle.

Déplacer le viseur et observer l'évolution de la figure d'interférences. La théorie prévoit que l'interfrange est constante ; est-ce bien le cas ? Par contre la largeur du champ d'interférences augmente quand on recule le viseur, pourvu qu'on ne vise pas plus loin que le plan qui contient les points A et C de la figure 4.

Mesurer la largeur Δy du champ d'interférences à l'aide de l'oculaire de Fresnel et la distance $(x_2 - x_1)$ entre le biprisme d'abscisse x_1 et l'oculaire d'abscisse x_2 .

Montrer que $\Delta y = 2(x_2 - x_1) \tan \beta \simeq 2(x_2 - x_1)\beta$.

En déduire la valeur de l'angle β . Évaluer l'incertitude $\Delta\beta$. Conclure quant à la valeur de l'angle α de chaque prisme, sachant que le biprisme est en verre ($n = 1,5$).

5. Mesure de l'interfrange.

Dans la dernière position du viseur, compter le nombre de franges visibles dans le champ d'interférences et en déduire la valeur de l'interfrange i .

Vérifier la formule théorique $i = \frac{\lambda}{2\beta}$ établie plus haut. La longueur d'onde du doublet jaune du mercure est $\lambda = 578 \text{ nm}$.

6. Mesure d'une longueur d'onde inconnue (spectroscopie).

Remplacer le filtre jaune par le filtre vert.

L'interfrange i est proportionnel à la longueur d'onde λ ; on peut déduire la valeur λ' d'une longueur d'onde inconnue en mesurant l'interfrange i' **dans les mêmes conditions expérimentales** que pour la longueur d'onde λ .

On a

$$\frac{i'}{i} = \frac{\lambda'}{\lambda}$$

Mesurer i' et en déduire la valeur de λ' . Commenter le résultat. Pourquoi préfère-t-on cette mesure relative à la méthode directe ?

7. Quelques expériences qualitatives supplémentaires.

On pourra effectuer rapidement les expériences qualitatives suivantes :

- ✿ observer la baisse du contraste lorsqu'on augmente la largeur de la fente source,
- ✿ observer la baisse du contraste lorsque la fente source n'est plus parallèle à l'arête du prisme,
- ✿ observer des interférences en lumière polychromatique en ôtant le filtre de la lampe au mercure,

II. Diffraction à l'infini (1h30).

Le montage est très simple : la source est un laser qui délivre un faisceau parallèle et se comporte donc comme une source à l'infini; elle est monochromatique. Un écran est disposé à grande distance D , comparée à la taille des objets diffractants; on peut donc considérer qu'il est à l'infini. (cf figure 5).

On a à disposition sur des plaques de verre toutes sortes d'objets diffractants et on en profitera pour vérifier de visu tous les résultats du cours et des exercices « classiques ».

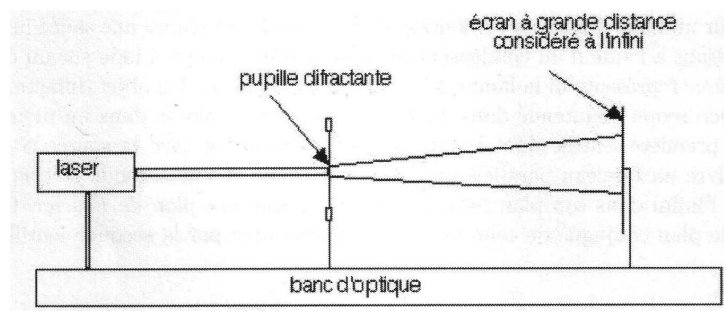


FIGURE 5 – Montage pour la diffraction à l'infini.

Dans les expériences suivantes la petitesse du pinceau lumineux pourra être contournée en utilisant un dispositif d'élargissement du faisceau. On se reportera au cours pour choisir habilement les focales des lentilles.

Théorème des écrans complémentaires

Une fente de largeur a et un fil de même largeur donnent la même tache de diffraction. De même pour une pupille circulaire et un cercle opaque sur fond transparent de même rayon. Une plaque ad hoc figure dans le lot.

Diffraction par une fente

On vérifiera les points suivants :

1. la tache s'étale dans la direction orthogonale à la fente,
2. la largeur l de la tache principale est inversement proportionnelle à la largeur a de la fente,
3. on essaiera de pousser jusqu'à la vérification de la formule $l = 2 \frac{\lambda D}{a}$, avec $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ (laser hélium-néon),
4. on pourra pousser le zèle jusqu'à mesurer l'épaisseur d'un de ses cheveux selon un protocole à établir.

Diffraction par une pupille circulaire

Même démarche, à savoir vérifier que :

1. le rayon r de la tache d'Airy est inversement proportionnelle au diamètre d de la pupille,
2. on essaiera de pousser jusqu'à la vérification de la formule $r = 1,22 \frac{\lambda D}{d}$.

Diffraction par deux fentes parallèles

Pour cette expérience et la suivante, on pourra être amené, si nécessaire, à élargir le faisceau laser grâce à un objectif de microscope placé à la sortie du laser. On dispose de jeux de fentes doubles de largeur b et d'écartement a donnés. On observera la figure d'interférences de deux fentes minces écartées de a , modulée par la tache de diffraction d'une fente de largeur b ; en déduire de façon théorique le nombre d'interfranges contenus dans la tache centrale de diffraction et le vérifier expérimentalement.

Diffraction par deux pupilles circulaires

On observera ici la tache d'Airy zébrée par les franges rectilignes d'interférences. On comparera théorie et expérience comme pour les fentes doubles.

Diffraction par un motif à répétition aléatoire

Dans cette expérience, on veut visualiser la tache d'Airy créée par la diffraction de la lumière sur un ensemble de motifs (spores de lycopode) répartis aléatoirement sur une lame de verre. Pour les y déposer, humifier légèrement la lame mince, déposer une petite quantité de lycopode et souffler pour ôter le surplus (il faut que la lumière puisse passer). Proposer une explication. En déduire la taille moyenne d'un spore.

III. Strioscopie (45 min).

On réalise sur un banc d'optique le montage de la figure 6. On réalise une source lumineuse de bonne qualité en focalisant à l'aide d'un condenseur le faisceau d'une lampe à iode sur un diaphragme à iris, noté S (la figure ne représente ni la lampe à iode, ni le condenseur). Un objet diffractant sera déposé sur une lame de microscope maintenue dans un support à pince et placée dans un montage de diffraction à l'infini : une première lentille dont le foyer-objet est confondu avec la source S (le diaphragme à iris en fait) délivre un faisceau parallèle qui traverse la lame et une seconde lentille permet d'étudier la diffraction à l'infini dans son plan focal-image, qu'on appellera plan de Fourier. On place en outre un écran dans le plan conjugué de celui de la lame diffractante par la seconde lentille, qu'on appellera plan-image.

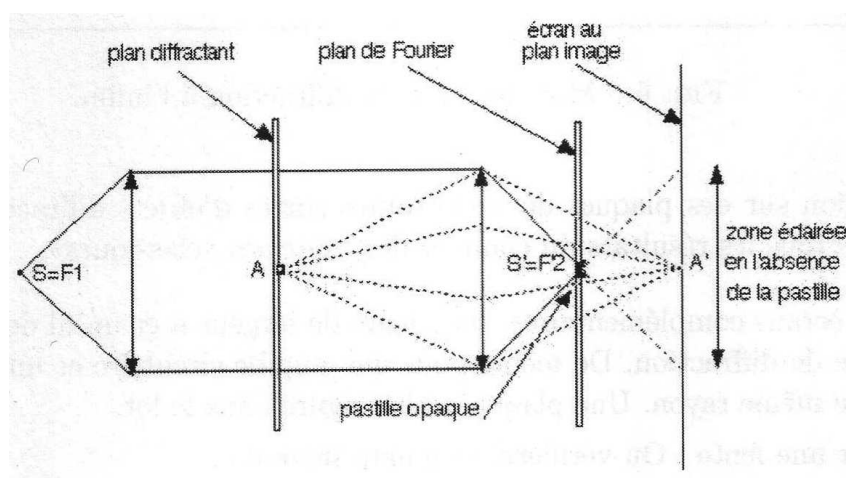


FIGURE 6 – Montage pour la strioscopie.

1. Réflexion théorique.

Supposons qu'il n'y a qu'un seul objet diffractant A quasi-ponctuel, qui se comporte donc comme une source secondaire, principe de Huygens-Fresnel oblige. Répondre aux questions suivantes :

1. Quelle doit être la position relative de l'objet A et de la seconde lentille pour que l'image de A soit la moins éloignée possible ?
2. Où se focalise le faisceau parallèle ? Que prévoient l'optique géométrique et l'optique physique ?
3. Où se focalisent les rayons issus de l'objet diffractant ?
4. Que se passe-t-il dans le plan de Fourier ?
5. Que se passe-t-il dans le plan-image ? En particulier, peut-on espérer y voir l'image A' de A ?
6. On place sur une seconde lame de microscope, placée dans le plan de Fourier, une pastille opaque de petit diamètre au foyer-image de la seconde lentille. Que se passe-t-il désormais dans le plan image ?
7. Quelle taille optimale faut-il donner à la pastille opaque ?

2. Mise en œuvre expérimentale.

Installer la lampe à iode et le condenseur ; placer le diaphragme à iris au foyer, en pratique, là où la tache de lumière sur l'iris fermé est la plus petite ; ouvrir l'iris à un diamètre un peu inférieur à la tache de lumière.

Installer la première lentille de courte distance focale (15, 20 ou 25 cm) et la placer par autocollimation de sorte que l'iris soit au foyer.

Placer une lame, pour l'instant vierge de toute saleté autre que celles qui s'y trouvent naturellement, sur un support placé assez près de la première lentille et disposer une seconde lentille de courte distance focale (15, 20 ou 25 cm) à une distance de la lame à peu près double de la distance focale choisie.

Placer une seconde lame vierge sur un support au foyer de la seconde lentille, c'est-à-dire là où se forme l'image de l'iris.

Placer l'écran au niveau de l'image de la première lame ; en général, on voit bien l'image du bord de la lame, ce qui facilite la mise au point.

Maintenant, l'expérience est prête à fonctionner.

Repérer sur la seconde lame placée au plan de Fourier la taille de la tache de diffraction due au faisceau parallèle, enlever la lame de son support et y déposer un cercle de blanc effaceur de rayon un peu plus grand que la tache et remettre la lame en place sans chercher à ce stade à occulter la tache de diffraction.

Déposer sur la première lame un objet diffractant, par exemple une empreinte digitale déposée par un doigt préalablement humecté, observer ce qu'on voit sur l'écran au plan-image, puis régler en position verticale et latérale la lame du plan de Fourier de façon à occulter la tache de diffraction du faisceau parallèle et observer à nouveau l'écran.

Réitérer avec divers objets diffractants : poussières, peluches², cheveux, plumes.

2. pas des nounours, des poils d'objets pelucheux

Matériel

Biprisme de Fresnel ($\times 3$)

- * banc en U et supports
- * lampe à mercure haute pression
- * filtres vert et jaune
- * fente réglable
- * condenseur
- * lentille +45 cm
- * biprisme de Fresnel
- * oculaire de Fresnel
- * miroir
- * écran

Diffraction à l'infini ($\times 3$)

- * banc diffraction (les plus plats)
- * 5 supports et 2 supports de précision
- * LASER
- * lentilles (+25 cm, +50 cm) à monter sur les support en plexi
- * lentilles (+5 cm)
- * support de diapo
- * objectif de microscope + support universel
- * écran (le plus large possible, avec papier millimétré)
- * fentes, doubles fentes (3 tailles sur chaque diapo)
- * lame mince

Diffraction à l'infini (en libre accès pour les 3 postes)

- * boîte avec toutes les diapos (trous, fentes, etc.)
- * un épurateur de faisceau
- * poudre de lycopode
- * un ensemble de lentilles de toute focale (divergentes, longues focales convergentes) avec pied (pour qu'ils aient le choix de la lentille)

Strioscopie ($\times 1$)

- * banc en U
- * 6 support (hors lampe)
- * lampe halogène blanche + alimentation
- * condenseur
- * diaphragme à iris
- * 2 lentilles +25 cm sur pied
- * 2 supports de diapo
- * 2 lames minces
- * tipex
- * écran
- * miroir
- * une plume d'oiseau (si tu as : à Paris, moi je n'en ai pas...)