MP 20 - Diffraction des ondes lumineuses et filtrage

Sadek Al-Jibouri et Isabelle Safa

9 juin 2022

Commentaires du jury

2017 : Une condition nécessaire est de connaître la différence entre diffraction de Fraunhofer et diffraction de Fresnel, et on doit s'assurer que les conditions de Fraunhofer sont remplies si l'on utilise les formules associées. La détermination de la taille d'un fil ou d'un cheveu est d'autant plus intéressante que la valeur mesurée peut être comparée à une valeur tabulée ou mesurée par une technique complémentaire. Le jury voit trop souvent des expériences de diffraction par des fentes, généralement mal calibrées, servir à mesurer des longueurs d'ondes de lasers.

2014, 2015, 2016 : La différence entre diffraction de Fraunhofer et diffraction de Fresnel doit être connue, et l'on doit s'assurer que les contditions de Fraunhofer sont remplies si l'on utilise les formules associées. Attention aux expériences de filtrage spatial qui son souvent mal comprises. La détermination de la taille d'un fil ou d'un cheveu est d'autant plus intéressante que la valeur mesurée peut être comparée à une valeur tabulée ou mesurée par une technique complémentaire.

Expériences

- Mesure du rayon d'un trou par le nombre de zones de Fresnel ;
- Mesure du rayon d'un même trou par sa tache d'Airy ;
- Filtrage optique d'une image.

Bibliographie

✍ *Physique expérimentale*, **FLTCLD** [1] ⟶ Tout.

Table des matières

1 Diffraction de Fresnel **2**

2 Diffraction de Fraunhofer **2**

3 Optique de Fourier **3**

Introduction

La diffraction est un phénomène purement ondulatoire qu'on observe pour les ondes mécaniques comme pour les ondes lumineuses. C'est la modification du front d'onde par la présence d'un objet sur le chemin d'une onde électromagnétique.

La diffraction est une conséquence des propriétés d'une onde qui est observable quand un front d'onde est déformé après le passage à travers une ouverture de l'ordre de grandeur de sa longueur d'onde.

Pour la lumière, la diffraction est l'une des raisons qui a permis de démontrer son caractère ondulatoire et qui limite la théorie de l'optique géométrique. Pour expliquer la diffraction, on utilise le modèle scalaire de la lumière et le principe de Huygens-Fresnel. Les calcul apportent deux grandeurs caractéristiques pour la diffraction :

$$R = \frac{1}{2D}\sqrt{\frac{\rho^4}{\lambda}}$$

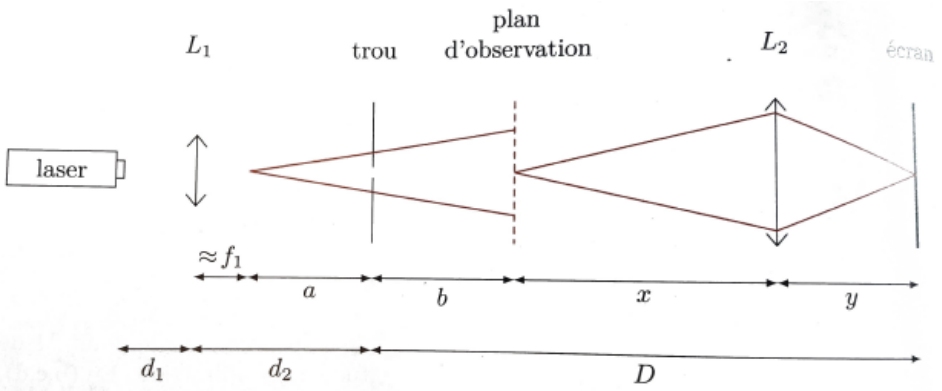

Figure 1 – Schéma du dispositif (Jolidon Bleu)

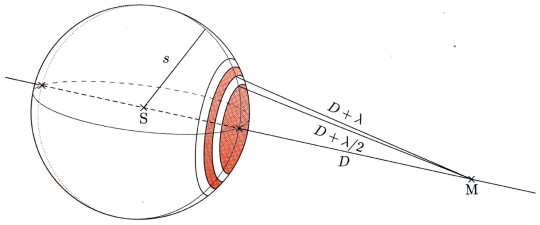

Figure 2 – Zones de Fresnel (Jolidon Bleu)

Qui doit être très petit devant 1 pour qu'il y a ait diffraction. Et le nombre de Fresnel :

$$\mathcal{F} = \frac{\rho^2}{2D\lambda}$$

Pour $\mathcal{F} \ll 1$, on dit qu'on est dans le régime de Fraunhofer, et pour $\mathcal{F} \gg 1$, on est dans le régime de Fresnel.

Dans ce montage, nous utilisons la diffraction dans ces deux régimes pour remonter au diamètre d'une même ouverture circulaire, puis nous illustrons le principe de filtrage optique avec une experience simple.

1 Diffraction de Fresnel

La première expérience consiste à utiliser un trou comme objet diffractant et à observer sa figure de diffraction dans le régime de Fresnel. On vérifie dans ce régime l'égalité entre le nombre de zones de Fresnel $\mathcal{N}$ visible (nombres d'anneaux dans la figure de diffraction, voir figure 2), et le nombre de Fresnel $\mathcal{F}$.

Mesure d'un trou à partir du nombre de Fresnel

✍ Jolidon Bleu p 310 ⏲ 10 minutes

- Laser rouge $\lambda = 632.8$nm p5.3/2 sur support horizontal p108.8, pied fixe 0.531, hauteur 30 cm ;
- Objectif de microscope p107.16/3, PHV ;
- Diapositive B169, statif, trou de 1.2mm, espacé de 10.5 cm de l'objectif ;
- Lentille d'"exploration" de focale 120mm, p111.2/1, PHV.

Par définition :

$$\mathcal{N} = \frac{\rho^2}{\lambda}\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)$$

On compte les positions où $\mathcal{N}$ semble entier, (franges sombres et clairs), puis on trace $\mathcal{N}\left(\frac{1}{b}\right)$. On en déduit ρ par le coefficiant directeur et la connaissance de λ.

2 Diffraction de Fraunhofer

Quand le nombre de Fresnel est très inférieur à 1, on passe dans le régime de Faunhofer (Fig 3). On réalise dans un premier temps une manipulation en observant uniquement la figure de diffraction dans le plan de Fourier, c'est à

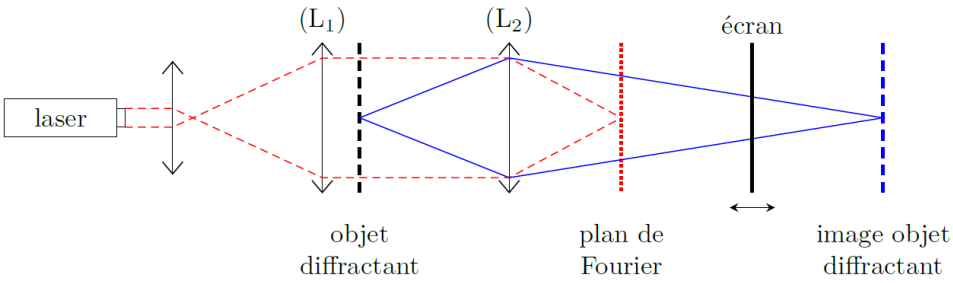

Figure 3 – Montage pour se placer en régime de Fraunhofer. On peut déplacer l'écran pour se mettre au choix sur le plan image de l'objet, ou sur le plan de Fourier, correspondant à la transformée de Fourier spatiale de l'objet.

dire le plan image de la source, dans lequel on retrouve une figure de Bessel, ou la tache d'Airy, pour un trou comme objet diffractant. La figure de Bessel possède des zéros tabulés qu'on exploite pour remonter au rayon du trou.

Mesure d'un trou à partir de la tache d'Airy

✍ Jolidon Bleu ⏲ 10 Minutes

Pour une configuration donnée, on va prendre les positions des différentes annulation dans la tache d'Airy. Pour mesurer facilement la taille des différents anneaux il faut les observer à l'aire d'une caméra située à la place de l'écran.

Points caractéristiques	x
1er 0	1.220
1er max	1.635
2ème 0	2.233
2ème max	2.679
3ème 0	3.238

Avec :

$$x = \frac{\rho r}{f\lambda}$$

On mesure r pour différents x et on trace $x\left(\frac{r}{f\lambda}\right)$, de pente ρ

3 Optique de Fourier

Comme la figure de diffraction obtenue dans le plan de Fourier correspond à la transformée de Fourier de l'objet diffractant, placer un second objet obstruant une partie de cette image permet de filtrer une partie du spectre fréquentiel du premier, ce qui se traduit par une image filtrée dans le plan image du premier objet par la dernière lentille L2.

Filtrage des lignes verticales sur une image

✍ Jolidon bleu ⏲ 5 minutes

Petite expérience ludique qui permet d'expliquer le filtrage optique.

Matériel : On change le laser par une lampe QI pour avoir de meilleures images et car la longueur d'onde ne joue plus un facteur déterminant, même si les plus grandes longueurs d'ondes ont un spectre plus étendu, une fente tournante et ajustable (objet filtrant), un écran, porte diapos + diapo avec la tête de Fourier et diapo avec des lignes parallèles (objets diffractants).

Expérience : On place les diapos dans le chemin du rayon en lumière parallèle, telles que l'image sur l'écran soit le visage de Fourier, net, avec des barreaux comme s'il était en prison. On positionne la fente dans le plan de Fourier pour filtrer les grandes fréquences spatiales de l'image (les détails). La fente est d'abord horizontale, pour filtrer les fréquences verticales, et on la tourne, ensuite à 90° pour maintenant filtrer les détails horizontaux, donc les barreaux.

Si écran tractable, montrer aussi la figure de diffraction dans le plan de Fourier pour expliciter ce qu'on filtre.

Conclusion

Autres applications du filtrage : la strioscopie (qu'on peut envisager comme manip supplémentaire ou en remplacement de la manip de filtrage), où cette fois ci on filtre les basses fréquences et on obtient donc une image avec les

détails exacerbés, permet de voir par exemple les petites variations d'indices, au point qu'on peut observer des ondes acoustiques stationnaires si on a filtre suffisamment bien par exemple.

La diffraction est aussi une limitation dans de nombreux dispositions optiques, en effet la taille finie des lentilles et miroirs utilisés implique toujours de la diffraction. La taille des atomes pose aussi une limitation dans la microscopie optique, d'où l'utilisation d'électrons, ayant une longueur d'onde de De Broglie très petite par rapport aux longueurs d'ondes du visible.

Compléments

Manip surprise :

Réaliser un filtre passe bande et trouver ses propriétés (fréquence propre, largeur de la bande passante) avec comme matériel disponible R L et C.

Mode XY permet de trouver facilement la fréquence propre car donne un segment à cette fréquence.

Questions

- **Definition de la diffraction ?** Modification du front d'onde par un obstacle de taille proche ou plus petite de la longueur d'onde.
- **Pourquoi utiliser une élargisseur de faisceau ?** Elargisseur + Diaphragme agissent pour épurer le faisceau, diminue les imperfections du faisceau. On obtient aussi un faisceau plus grand qu'avant permettant d'éclairer l'objet complet.
- **Pourquoi utiliser un laser et c'est quoi un laser ?** Le rayon des anneaux dépend de *lambda* donc plusieurs figures se superposeraient si on utilisait un faisceau polychromatique. Un laser est un appareil permettant d'émettre un faisceau monochromatique par émission spontanée (qui a lieu dans une cavité résonnante pour amplifier le signal).
- **Est ce qu'on pourrait faire la même chose avec une lampe QI et un filtre interférentiel ?** Potentiellement si largeur spectrale assez faible mais il y aurait besoin de selectionner une petite partie de la lumière pour qu'elle soit cohérente, lampe QI = source polychromatique ET étendue.
- **Pourquoi utiliser une lentille entre l'objet et l'écran pour la diffraction de Fresnel ?** Obtenir une image plus grande et choisir facilement la zone observée.
- **Quelle différence Fresnel - Fraunhoffer à l'œil ?** Pour un trou, peu de différence, tache d'Airy toujours brillante au centre dans le régime de Fraunhofer, le centre de la figure du régime de Fresnel ne l'est pas toujours et peut être sombre.

  Pour autre chose les formes sont assez différentes, Fresnel donne une figure qui a globalement la même forme que l'objet avec des altérations sur les bords (d'autant plus que le nombre de Fresnel est grand), celle de Franhofer est très différente de l'objet et correspond à sa transformée de Fourier spatiale.
- **Pourquoi avoir supposé** *lambda* **connu et en avoir déduit** ρ **et pas l'inverse ?** Comme on utilise un laser, λ est déjà donné avec une bonne précision relative $(0,1\%)$ alors que ρ est donné avec un seul chiffre significatif. Donc la mesure peut nous amener à préciser ρ. C'est intéressant si l'on vient de percer le trou et que l'on cherche sa taille.
- **Pourquoi avoir mis un polariseur, qu'est ce que ça change ?** Ici, la lumière vient d'un laser et est polarisée rectilignement, le polariseur permet simplement de diminuer ou augmenter la luminosité arrivant dans le montage. Pour de la lumière non polarisée, un polariseur permet de selectionner une polarisation donnée.
- **Quelles sources d'incertitudes pour la mesure du nombre de Fresnel ?**
- **Incertitude prise pour** $\mathcal{N}$ **?**
- **Exemples de dispositifs dans lesquels on a besoin de prendre en compte la diffraction ?** Microscopes (les petits objets diffractent la lumière), lunette astronomique.
- **Sur l'image de la caméra, de petites poussières sont visibles, comment savoir sur quelle partie du montage elles sont ?** En regardant comment est la figure de diffraction de la poussière. Si Fresnel, poussière proche de l'écran.
- **Pourquoi filtre anti-calorique avec la QI ?** Pour protéger le matériel de l'exposition longue à une grand dose d'infrarouge (filtrés par le filtre) qui peut le chauffer, faire fondre localement les lentilles...

- **Pourquoi a t on un filtrage alors que la source est polychromatique ?** Même si toutes les longueurs d'ondes donnent une figure différente, elles sont liés par homotétie entre elles, et sont suffisamment proches pour qu'en utilisant une fente très fine, on filtre les grandes fréquences de tout le visible dans le plan de Fourier.
- **C'est quoi le plan de Fourier ?** Plan image de la source, on y voir la transformée de Fourier spatiale de l'objet diffractant situé à l'infini de l'écran et de la source. Les variables de ces transformées sont liées à *lambda*.

Commentaires

- Au début, être + clair sur l'explication de la diffraction.
- Être plus bref dans les réponses.
- Ne pas paniquer si une manip marche pas, expliquer pourquoi.
- Attention à être pointilleur en optique, les jurys s'y connaissent.
- Montrer de belles et grandes images.
- Toujours être au clair sur le matériel utilisé.
- Choix du laser : parler de cohérence.
- Ne pas trop parler d'une manip qui marche pas, revenir à la fin au pire si le temps.
- Savoir comment fonctionnent les incertitudes.
-