

MP 09 – Diffraction des ondes lumineuses

26 novembre 2021

Clément Gidel & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

✍ *Le nom du livre, l'auteur*¹

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

➤ prérequis

Expériences

- ☞ Optique de Fourier (expérience d'Abbe)
- ☞ Diffraction d'un bord d'écran
- ☞ Diffraction d'une fente de taille variable

Table des matières

1	Diffraction de Fresnel d'un bord d'écran	2
1.1	Expérience	2
1.2	Transition	2
2	Diffraction de Fraunhofer par une fente	2
3	Application : Optique de Fourier et expérience d'Abbe	3

Introduction

La diffraction est un phénomène qu'on voit au quotidien, lorsqu'on ferme progressivement les yeux en regardant une source lumineuse, ou l'éclairement d'un lampadaire. On va explorer le phénomène de diffraction dans deux régimes différents, où la physique est différente mais le phénomène est le même.

1 Diffraction de Fresnel d'un bord d'écran

1.1 Expérience

☛ Si on utilise le terme champ proche au tableau, il faut savoir le définir, est ce que le champ proche équivaut à la condition $L^2/\lambda D \ll 1$, c'est à dire nombre de Fresnel très petit devant 1 ? On fait avec un bord d'écran car on a la formule théorique pour la distribution d'intensité : $I(u) = I_0((1/2 + S(u))^2 + (1/2 + C(u))^2)$ avec $S(u), C(u)$ les intégrales spéciales de Fresnel (cf Fruchart) et $u = a^2/(2\lambda D)$.

Mise en place :

1. On monte la diffraction en champ proche avec une source à l'infini. Pour cela, on utilise l'épurateur de faisceau (Pour que l'épurateur donne une bonne image, ne pas hésiter à bien faire l'image du premier faisceau sur le trou. On doit avoir en sortie quelque chose de bien lumineux **sans diffraction notable**. Si on a de la diffraction c'est qu'on a pas fait l'image du faisceau laser sur le trou mais qu'on tape à côté et donc on diffracte).
2. Une fois qu'on a un faisceau bien lumineux et homogène en sortie, on place une lentille de focale $\sim 20\text{cm}$ pour faire un faisceau collimaté.
3. On envoie le faisceau collimaté sur notre objet diffractant. C'est là qu'on a plutôt choisit une fente qu'un cheveu, car l'étendue spatiale du faisceau étant important, on éclaire toute la diapo et on diffracte via la diapo et l'image du cheveu est pas bien visible. On prend donc une fente réglable pour Fraunhofer. Pour Fresnel, on prend un bord d'écran ou une lame de rasoir.
4. Ce qui est important c'est qu'on utilise un capteur simple (sans objectif) et on utilise imageJ pour avoir notre profil d'intensité en moyennant sur une petite tranche dans la direction orthogonale (cf Fruchart). On repère aisément les oscillations. On note la distance D entre le rasoir et le capteur, qu'on mesure avec l'incertitude (assez difficile de repérer début et fin sur banc optique).
5. On traite ensuite le profil d'intensité sur Python et on peut faire varier la distance théorique D_{th} pour que les oscillations d'intensité sur le bord d'écran matchent celles du profil réel. Il peut y avoir une décroissance d'intensité, c'est normal et c'est du au fait que la lame est pas uniformément éclairée mais c'est pas très grave.
6. Normalement, le match est plutôt bon et dans l'idéal on peut même avoir une incertitude sur D_{th} et voir si les deux valeurs de D se recouvrent ou non.

Remarques : Si on demande un nombre de Fresnel pour justifier le régime dans lequel on se place, la distance caractéristique qu'il faut prendre est la taille du faisceau.

1.2 Transition

Ce qui est important, c'est de montrer qu'on parle en II du même phénomène physique, donc faire le passage de Fresnel à Fraunhofer est incontournable. On change la lame de rasoir par une fente et on augmente la distance progressivement.

2 Diffraction de Fraunhofer par une fente

Mise en place

- L'idée est qu'on remplace maintenant la lame de rasoir par une fente et on regarde à l'infini, donc en pratique au foyer image d'une lentille convergente. ☛ Il faut s'assurer qu'on est bien au foyer image, donc on regarde que la distance écran/lentille est bien de l'ordre de la distance focale, et ceci avant d'ajuster plus précisément sur la caméra.
- On voit la diffraction de Fraunhofer quasiment partout, mais les pics sont quand même plus nets à un certain endroit.

- On enregistre les pics avec Image J et pour différentes taille de fentes on peut remonter à la distance $\Delta x = \lambda f / b$ avec b largeur de la fente. On peut effectuer une régression linéaire et vérifier que la loi marche bien.
- Le repérage des pics se fait en moyennant sur plusieurs écarts, on repère l'écart entre plusieurs pics ou bien la tache centrale, mais plusieurs pics semble être plus malin parce qu'on s'affranchi des problèmes de symétrie.

Remarques importantes :

1. On ne peut pas repérer précisément une position au vernier de la fente, ainsi on repère seulement des positions relatives. Ainsi, la valeur b est repérée par rapport à une valeur de référence qu'on va mesurer dans notre modélisation affine par une ordonnée à l'origine non nulle.
2. Si on a une erreur systématique sur la valeur de notre pente, c'est qu'on était pas à la position exacte de la diffraction de Fraunhofer (d'où la nécessité de voir si on y est approximativement avant de vérifier si on y est précisément).
3. La discussion sur les incertitudes se fait plutôt bien, c'est la difficulté de repérer deux pics.

3 Application : Optique de Fourier et expérience d'Abbe

A faire seulement si on a le temps, mais c'est pas mal et ça montre une application. On fait comme dans le Fruchart où on réalise le filtrage optique d'une grille avec une fente dans le plan de Fourier. Selon la position de la fente l'image de la grille est changée (grille seulement horizontale, verticale ou oblique). On pourrait faire des mesures quantitatives mais on a quand même bof le temps !

Remarques générales :

- Préciser au tableau les hypothèses et le régime dans lequel on se place.
- Sur les schéma avec l'épurateur de faisceau, représenter correctement les faisceau gaussiens !
- Attention à la définition de champ proche.
- Connaitre la façon dont Python calcule les incertitudes sur les paramètres de la régression.

Compléments/Questions

Passage

Plan

Introduction. On peut observer la diffraction de vagues sur l'embouchure d'un port. Ceci est dû au caractère ondulatoire de la vague. Cela s'applique à la lumière qui a aussi un caractère ondulatoire, notamment lorsqu'elle rencontre des obstacles de taille comparable à la longueur d'onde.

Principe de Fresnel : intégrale sur la source, les termes d'ordre supérieur à 1 sont difficile à analyser. On utilise le nombre de Fresnel pour estimer l'ordre de grandeur des premiers termes non-linéaire.

Présentation du plan. [Tableau sur tablette de Laura]

I) Principe de la diffraction (diffraction de Fresnel).

Montage : Laser, rendu source ponctuelle par lentille de microscope, trou diffractant (roue), lentille de projection.

Observations qualitatives en déplaçant la lentille de projection : on voit des taches caractéristiques de phénomènes d'interférence.

Mesure du nombre de zones de Fresnel observées en fonction du déplacement de la lentille → on remonte à la largeur du trou diffractant.

Hypothèse : rayons paraxiaux.

La figure de diffraction est difficile à analyser lorsque les non-linéarités sont importantes.

Cas plus simple : Fraunhofer.

II) Diffraction de Fraunhofer.

Propriétés de la TF/figure de diffraction de Fraunhofer : dilatation/compression, invariance par translation. Théorème de Babinet. Mesure de la taille d'un cheveu par étalonnage : mesure de la largeur de la tache de diffraction (compter quelques franges) en fonction de la largeur de la fente. L'ordonnée à l'origine est due au vernier qui n'indique pas 0 lorsque la fente est fermée ???

III) L'optique de Fourier. Filtrage d'une grille. En tournant le filtre à 45 degrés, on voit des lignes diagonales non présentes dans l'objet initial.

On a fait du filtrage analogique.

Ouverture : diffraction : inconvénient dans les télescopes. Mais utile pour sonder la matière comme la diffraction des rayons X.

Questions

Condition pour observer de la diffraction ? $\lambda \sim a$ mais ici $\lambda \sim 0.1\text{microns}$ alors que $a = 1\text{mm}$, en fait $\theta = \lambda/a = x/D$ peut être très petit mais si on prend D grand on peut le voir.

Choix des focales de lentilles ? Compromis entre grandissement et encombrement (4f).

Pourquoi pas de laser épuré ? Il faut des petits trous.

Si la CCD est inclinée ? Cela introduit une dissymétrie sur l'image, ce qu'on peut checker. Mais l'erreur introduit un $\cos \theta$ qui est d'ordre 2 $\cos \theta \sim 1 - \theta^2/2$.

NB : la tache centrale est deux fois plus large que les autres pour une fente rectangle (le sinus saute une annulation à l'origine).

Pourquoi ne pas avoir utilisé de lumière blanche ? On aurait difficilement eu une source ponctuelle et les figures de diffraction des différentes longueurs d'onde se superposeraient, on voit des irisations.

Passage : Clément Gidel

Plan :

I) Diffraction de Fresnel II) Diffraction de Fraunhofer III) Optique de Fourier

Commentaires/remarques

- On peut prendre des images que l'on a fait en préparation.
- Le but c'est d'être pédagogique, même si on fait des choses archi-classique.
- Bien penser à faire des belles images au plan focal en vérifiant avec un mètre.
- Attention à prendre la formule des incertitudes pour deux mesures indépendantes.
- Savoir comment Python fait la régression linéaire.
- Les deux premières parties ne sont pas assez liées, même avec la troisième, d'un point de vue pédagogique. Il faut raconter une histoire au jury qui paraît cohérente. Ici il aurait fallu prendre une fente de manière à garder le même objet et voir différents régime de diffraction, à partir de l'intégrale de Huygens-Fresnel.
- Faire des dessins plus propre, avec des faisceaux élargies.
- Il faut s'assurer que le trou de l'épurateur est bien positionné au waist du laser.
- C'est cependant extrêmement dur de faire des choses parfaite, alors qu'il est facile de faire des choses qui marche quand c'est à peu près bien réglé.
- Essayer de mettre le laser (et l'épurateur) sur le banc laser.
- Peut-être juste faire la lame de rasoir en introduction pour montrer qu'on a une alternance blanc/noir.
- On peut faire 3 manips en 30min la dessus, mais on peut en préparer 4 si une foire, sachant que le filtrage peut se moduler facilement, en rajoutant ou non de la strioscopie.
- L'utilisation du numérique et du traitement numérique est nickel ici.
- Essayer d'être le plus direct, par exemple dire simplement qu'on a un offset sur la lecture du vernier.
- Ne pas se dévaloriser, même si on a l'impression que ce que l'on fait n'est pas top.

Questions

- Quel est le sens physique du nombre de Fresnel ? Compare les termes de diffractions Fresnel/Fraunhofer dans l'intégrale de Fresnel.
- Définition du champ proche et du champ lointain, Physiquement ça veut dire quoi ? On compare la distance de l'image formé à la longueur d'onde.
- A quoi sert la première lentille dans le l'épurateur de faisceau ?
- Quelle est la définition du waist d'un laser ?
- Ou est le Waist dans le montage ?
- Comment sort le faisceau gaussien du laser ? Onde plane a peu près.
- Comment est la source si l'onde est plane ? A l'infinie.
- Comment fonctionne un épurateur de laser ?
- Comment pouvez-vous expliquer le Nombre de Fresnel sur un bord d'écran semi-infinie ? Quelle taille caractéristique prendre ? On a pris celle des oscillations. Mais la longueur naturelle à prendre est la taille du faisceau qui arrive sur la lame de rasoir, c'est plus physique que prendre une longueur lié elle-même à la diffraction.
- Le profil théorique sur la la lame de rasoir, comment l'obtenir ? Comment le code fonctionne ?
- Quelle sont les incertitudes sur la droite d'étalonnage de Fraunhofer ? Pourquoi prendre plusieurs pic alors que les pics secondaires semble plus étalé sur les pixels ? ON divise l'incertitude par le nombre de pics qu'on prend ?
- Quelle incertitude sur le positionnement des pics ? ± 10 pixels. Faut-il utiliser le $\frac{\sqrt{2}}{3}$.
- Pourquoi les pics s'étalent sur la figure ? Mauvais alignement de la fente, et problème de cohérence temporelle, on multiplie le sinus cardinal par une fonction qui décroît depuis l'origine, et la largeur de cette fonction est proche de la cohérence temporelle du laser.
- Lorsqu'on fait la mesure pour la diffraction de Fraunhofer, l'incertitude sur la pente est calculé comment ? A partir de la méthode des moindres carrés, cf test du χ^2 .
- Application du filtrage spatial ? On peut faire de la strioscopie, pour des images on regarde les variations d'intensités, pour la strioscopie on regarde des variations d'indices (panaches de fumé).