

MP09 – DIFFRACTION DES ONDES LUMINEUSES.

14 décembre 2017

Fraction !

François NICOLAS & Bruno ETCHEVERRY

UN ANONYME À L'HUMOUR DOUTEUX.

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 conditions de Fraunhofer sont remplies si l'on utilise les formules associées. Attention aux expériences de filtrage spatial qui sont 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.

Bibliographie

✍ *Physique expérimentale*, **FLTCLD**

→ Tout en fait. C'est d'la bombe.

Expériences

- ☞ Mesure de largeurs de fentes (qualitative, quantitative) ;
- ☞ Expérience quantitative diffractions Fresnel et Fraunhofer ;
- ☞ Mesure du nombre de zones de Fresnel ;
- ☞ Diffraction de Fraunhofer : transformée de Fourier, strioscopie.

Table des matières

1	Le phénomène de diffraction	2
1.1	Première approche	2
1.2	Application et vérification	2
2	Différents régimes de diffraction	3
2.1	Fresnel et Fraunhofer : champ proche et champ lointain	3
2.2	Nombre et zones de Fresnel	3
2.3	Plan et transformée de Fourier	5

Introduction

En optique géométrique, la lumière va en ligne droite, et le rayon lumineux est assimilé à un pinceau de lumière de largeur infiniment fine devant tous les obstacles qu'il rencontre. Cependant, la théorie ondulatoire de la lumière met en évidence une limite de cette approche, qui se manifeste lorsque qu'une onde lumineuse rencontre des obstacles de dimension de l'ordre de grandeur de sa longueur d'onde. Il se passe alors un phénomène particulier que l'on connaît bien maintenant, la diffraction.

I) Le phénomène de diffraction

I) 1. Première approche

Nous allons commencer par mettre en évidence cette transition grâce à l'expérience suivante :



Mise en évidence du phénomène de diffraction

🔧 Physique expérimentale, FLTCLD

⌚ 2 minutes

Matériel :

- Laser rouge $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ p5.3/2 sur support horizontal p108.8, pied fixe 0.531, hauteur 30 cm ;
- Fente réglable p115.2/7 ;

On commence avec la fente grande ouverte, le rayon laser passant au travers et faisant un point sur l'écran. On ferme progressivement la fente, jusqu'à observer une modification de la tache d'éclairement sur l'écran, due à l'interaction de la lumière avec un obstacle de dimension similaire à la longueur d'onde. C'est ce qu'on appelle la diffraction.

Il existe en réalité une relation quantitative reliant l'éclairement sur l'écran en fonction notamment de la taille de l'obstacle ; nous allons essayer de la vérifier.

I) 2. Application et vérification

Un calcul de la forme de l'éclairement sur l'écran nous donne accès à une relation liant l'intensité lumineuse en un point de l'écran repéré par la position x à la largeur de la fente :

$$I \propto \text{sinc}^2 \left(\frac{a}{\lambda D} x \right), \text{ avec}$$

- ◆ a la largeur de la fente ;
- ◆ D la distance entre la fente et l'écran ;
- ◆ x un point de l'écran, $x = 0$ correspondant à l'abscisse de l'image géométrique du laser.

On obtient alors une forme d'éclairement qui est représentée figure 1, où les zéros d'intensité sont des multiples de $\frac{\lambda D}{a}$, le sinus cardinal s'annulant tous les $p\pi$, $p \in \mathbb{Z}$.

Pour vérifier cette relation, nous avons donc remplacé la fente par des fentes de largeurs pré-mesurées et avons fixé l'écran sur le banc optique ; on compte alors le nombre de zéros d'intensité que l'on arrive à distinguer, à gauche et à droite, en pensant bien à compter l'abscisse $x = 0$ comme un "zéro" si l'on traverse la tache centrale (on compte le nombre de " $\frac{\lambda D}{a}$ "). On peut alors en déduire la largeur de la fente mesurée expérimentalement, que l'on trace en fonction des valeurs indiquées sur les fentes.

Les mesures sont très satisfaisantes, permettant efficacement de remonter à la largeur donnée, comme l'atteste la courbe figure 2.

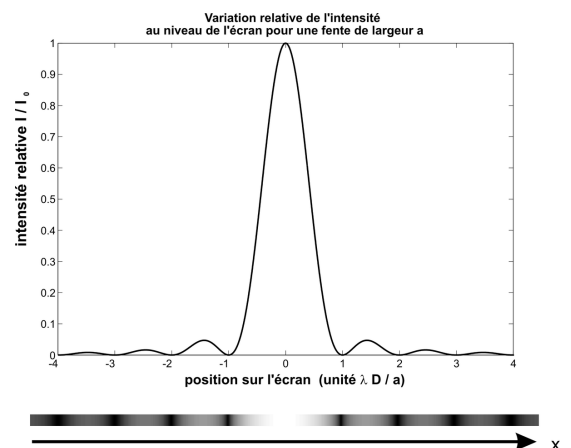


FIGURE 1 – Variation relative de l'intensité au niveau de l'écran pour une fente de largeur a .

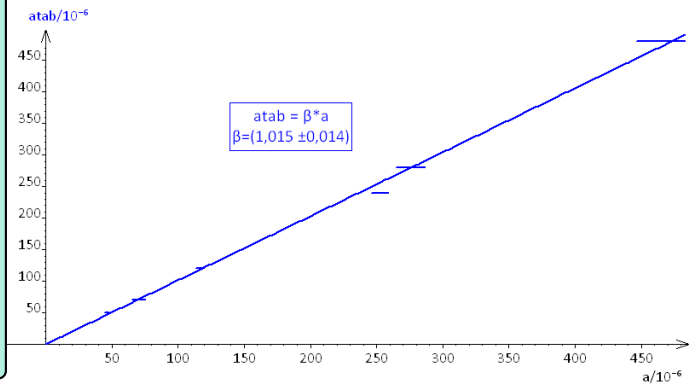


Mesure de largeurs de fente

⚡ Physique expérimentale, ⌚ 5 minutes
FLTCLD

Matériel :

- Laser rouge $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ p5.3/2 sur support horizontal p108.8, pied fixe 0.531, hauteur 30 cm ;
- Fentes tabulées B13, B19 et B3 (pour la mesure en direct, $a = 0.24 \text{ mm}$) sur statif et support à diapos.



En réalité, bien que les mesures fonctionnent bien, montrant la cohérence de la théorie ondulatoire de la lumière, lorsque l'on rapproche l'écran on voit l'éclairement se modifier : on n'a pas la même forme que ce que l'équation précédente indiquait. Il existe en réalité plusieurs régimes de diffraction, dont nous allons parler tout de suite

II) Différents régimes de diffraction

II) 1. Fresnel et Fraunhofer : champ proche et champ lointain

Pour mieux mettre en évidence les limites des régimes de diffraction, nous allons changer d'obstacle et utiliser deux lentilles permettant d'élargir les images.



Fresnel et Fraunhofer

⚡ Notre tête, tmtc

⌚ 5 minutes

Matériel :

- Laser rouge $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ p5.3/2 sur support horizontal p108.8, pied fixe 0.531, hauteur 30 cm ;
- Diapositive B169, trou de largeur 0.8 mm sur un statif, distant de 35 cm de la lentille ;
- Lentille p109.1/3, focale 50 mm, sur un pied réglable horizontalement et verticalement (PHV) ;
- Seconde lentille de 50 mm, PHV.

À l'aide d'un écran mobile, on observe que près de la lentille de projection, on a une modulation de la luminosité à l'intérieur de la tache lumineuse, alors qu'en s'écartant, on va obtenir une succession de cercles sombres et clairs à l'extérieur de celle-ci. On parle alors de diffraction en champ proche ou de diffraction de Fresnel pour la première, et en champ lointain ou de diffraction de Fraunhofer pour la seconde : c'est parce que l'écran était loin de la fente que l'on a pu faire la mesure précédente.

Nous venons de mettre en évidence deux régimes de diffraction pour lesquels l'éclairement ne prend pas la même forme ; nous allons nous intéresser à leur caractérisation en commençant par la notion de nombre de Fresnel.

II) 2. Nombre et zones de Fresnel

Outre les effets optiques que nous avons décrits précédemment, il existe un nombre appelé nombre de Fresnel, défini par

$$\mathcal{F} = \frac{\rho^2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right), \text{ avec}$$

- ◆ ρ le rayon du trou ;
- ◆ a la distance source objet diffractant ;
- ◆ b la distance objet diffractant-plan d'observation. Ici, b est donné par la relation de Descartes $\frac{1}{f} = \frac{1}{y} + \frac{1}{D-b-y}$ soit $b = \frac{D-y-fy}{y-f}$. Attention dans le Jolidon la relation donnée est fausse.

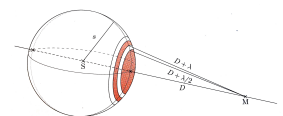


FIGURE 3 – Zones de Fresnel

On dit alors qu'on est en régime de Fresnel quand $\mathcal{F} \gg 1$, et en régime de Fraunhofer quand $\mathcal{F} \ll 1$. Ce nombre est également le nombre de zones de Fresnel, c'est à dire nombre d'anneaux à l'intérieur de la tache lumineuse principale, zones de l'espace où deux taches interfèrent (figure).

Le montage est le même que précédemment, sauf que les lentilles sont choisies telles que sur toute la longueur du banc on soit en régime de Fresnel. On va vérifier la formule donnant le nombre de zones de Fresnel en fonction de $1/b$. En pratique, on fixe toutes les longueurs sauf la position y de la lentille d'exploration que l'on fait varier. On part avec la lentille éloignée de l'objet, puis on rapproche la lentille en observant bien le centre de la figure. Quand le centre passe de noir à brillant ou inversement, on compte le nombre de zones de Fresnel $\mathcal{F}$ (donc d'anneaux, en comptant le centre) et on note la valeur de y . On trace ensuite $\mathcal{F}$ en fonction de $1/b$. La pente permet de remonter au rayon du trou, et l'ordonnée à l'origine à la distance source-objet diffractant. Il y a une discussion dans le Jolidon sur le terme $1/a$ dans le nombre de Fresnel qui est en fait affecté par la courbure du faisceau laser.

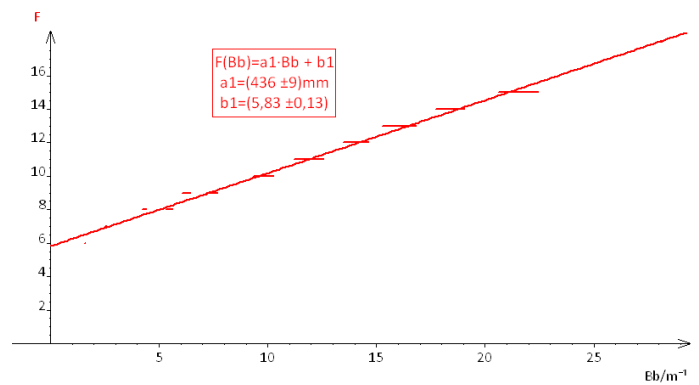


FIGURE 4 – Regression linéaire de la mesure, avec $Bb = \frac{1}{b}$. $a1$ doit valoir $\frac{\rho^2}{\lambda}$, avec ρ la demi-ouverture.

Nombre et zones de Fresnel

🔧 Physique expérimentale, FLTCLD

⌚ 10 minutes

Matériel :

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

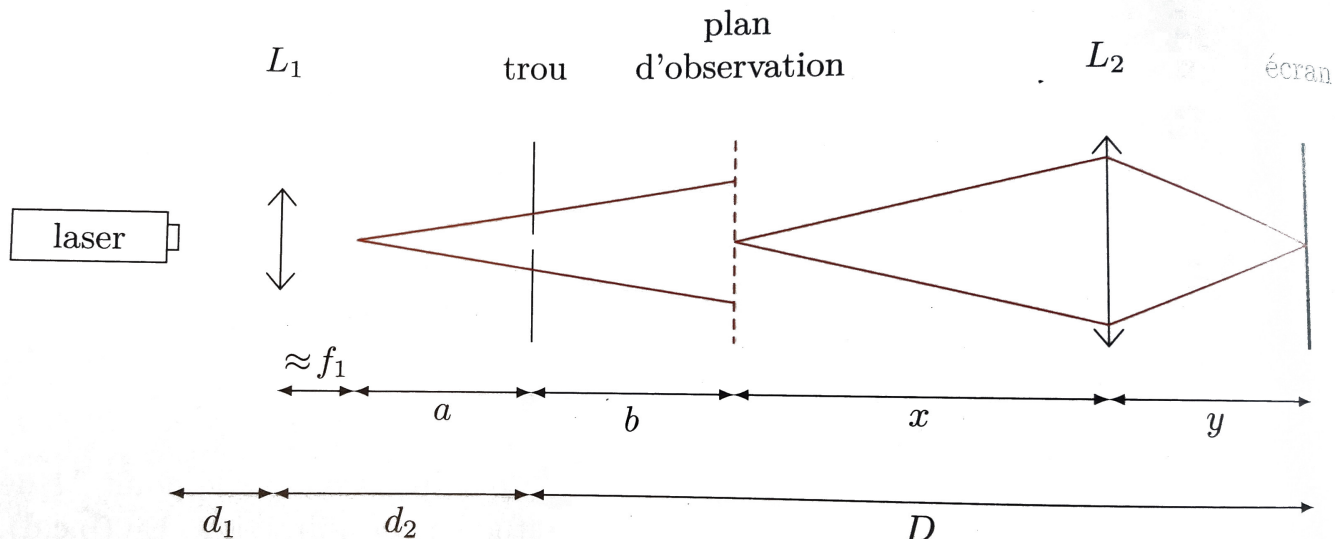


FIGURE 5 – Schéma de l'expérience (Jolidon)

II) 3. Plan et transformée de Fourier

On peut montrer que mathématiquement, la diffraction de Fraunhofer correspond à effectuer la transformée de Fourier de notre signal. Ainsi, en utilisant une lentille convergente collée à l'obstacle de diffraction, on peut observer cette transformée de Fourier à une distance finie, dans le plan de Fourier. Pour notre expérience, on commence par observer la TF d'une grille, que l'on projette sur l'écran grâce à une lentille. En enlevant la lentille on retrouve l'image géométrique de la grille. Ensuite, on vient couper des fréquences de la TF dans le plan de Fourier grâce à une fente, en reprojétant ce que l'on coupe avec la deuxième lentille. On voit alors une image filtrée en enlevant la projection !

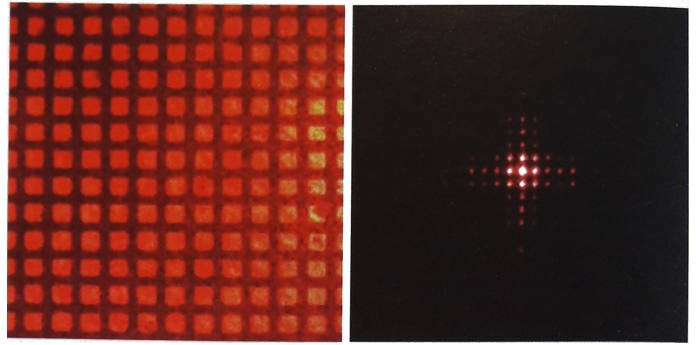


FIGURE 6 – Image et TF de la grille.

Strioscopie, transformée de Fourier

⚡ *Physique expérimentale, FLTCLD*

⌚ 10 minutes

Matériel :

- Laser rouge $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ p5.3/2 sur support horizontal p108.8, pied fixe 0.531, hauteur 30 cm ;
- Objectif de microscope p107.16/3, PHV ;
- Lentille convergente focale 50 mm, p109.1/2, PHV, espacé de 10 cm de l'objectif ;
- Grille C133 sur support à diapos p118.1/8, statif ;
- Fente réglable p115.2/7, PHV, mise dans le plan de Fourier
- Lentille de projection de focale 120 mm, p111.2/1, pied.

Un truc stylé serait de faire une expérience avec une photo striée, que l'on affiche avant filtrage et après filtrage simultanément grâce à une lame semi-réfléchissante. On peut aussi utiliser un passe-haut avec une tête d'épingle pour observer une empreinte digitale noyée dans la diffusion d'une bande de scotch. Ça marche très bien (figure 7) !



FIGURE 7 – Utilisation d'un filtre passe-haut pour révéler une image à forte fréquences noyée dans des basses fréquences.

Questions

- ♦ Au début, on est plutôt Fresnel ou Fraunhofer ?

Plutôt Fraunhofer, donc "à l'infini". Pour le vérifier on pourrait calculer $\mathcal{F}$ ou travailler vraiment à l'infini avec 2 lentilles. Plus simplement, il suffit que $D \gg x_{\text{écran}}$.

◆ Comment le LASER a-t-il été aligné ?

À l'oeil. Il faut le faire avec un diaphragme que l'on fait translater sur le banc !

◆ Pourquoi avez-vous réalisé toutes vos expériences au LASER ?

L'utilisation d'une lumière mono-chromatique rend l'interprétation des figures plus faciles, on évite les irisations. De plus, on est sûrs d'avoir une lumière bien dirigée et localisée sur l'objet. On pourrait le remplacer par une QI, avec un diaphragme et une lentille qui fait l'image d'un diaphragme pour s'assurer d'avoir un faisceau parallèle.

◆ Pourquoi avez-vous dit « Je regarde que le faisceau passe par le milieu de la lentille » ?

Pour être dans les conditions de Gauss et ne pas avoir déviation du faisceau. Faut vraiment bien le faire, c'est super important.

◆ On a des ondes sphériques en Fresnel ; on a quoi en Fraunhofer ?

Au vrai infini (avec deux lentilles), on a des ondes planes. Ici on a quand même des ondes sphériques, même si à grande distance on peut les approximer par des ondes planes.

◆ Discutez des incertitudes que vous avez marquées au tableau.

Oups. Attention à ne pas écrire les incertitudes sur les valeurs intermédiaires : si on tronque ou sur-estime 4 fois on peut arriver à des aberrations.

◆ C'est important le coefficient de corrélation ?

Il n'a aucune signification physique. r^2 sert uniquement à comparer deux modèles entre eux, pas à dire qu'un modèle est bon. Cela n'apporte aucune confirmation en montage.

◆ Nombre de zones de Fresnel = nombre de Fresnel ? Entier = réel ?

On s'est placé dans des cas particuliers où $\mathcal{F}$ est un entier, au moment où le cercle clair/sombre apparaît au centre.

◆ Vous avez dit « On voit bien le changement clair/sombre », mais on observe la même figure sur 10 cm. Que dire des incertitudes ?

La loi n'étant pas linéaire, quand la lentille d'exploration est loin on peut bouger beaucoup mais garder la même image. C'est pourquoi on a pris de plus grandes incertitudes au bout. On aurait pu prendre la plage de distance sur laquelle on garde l'image pour chaque $\mathcal{F}$, mais on n'avait pas le temps. C'est cohérent, cool.

Commentaires

- ◆ Un montage avec 2 lentilles avec un faisceau parallèle serait mieux pour Fourier. Par contre il faut bien montrer les phénomènes mis en jeu avec les projections etc, sinon cette manip ne vaut pas de point.
- ◆ Le critère de Rayleigh peut être envisagé comme manip' quantitative.
- ◆ Le qualitatif Fresnel → Fraunhofer c'était bien, même nécessaire. Pareil pour la manip' d'intro, ça donne pas de point mais ça met en confiance, ça introduit le concept...
- ◆ Attention, quand un calcul ne fonctionne pas, c'est bien de s'acharner une fois, mais sans abuser.
- ◆ Attention !, quand on fait une régression on doit vérifier la dépendance en un paramètre. Par exemple, tracer $x = f(D)$ et remonter à l'ouverture avec la pente, mais pas tracer l'ouverture mesurée en fonction de l'ouverture indiquée.
- ◆ Un peu déçus de ne pas voir le profil de sinc^2 , alors que Caliens est dispo. On pourrait acquérir la diffraction de Fresnel avec Caliens pour voir la diffraction par un bord d'écran par exemple, ou modéliser le profil avec un sinus cardinal...
- ◆ Faire tous les montages en direct, comme ils sont bien faits, c'est bien. Attention à l'alignement toute fois.
- ◆ Attention à la qualité du tableau. On doit pouvoir s'y raccrocher à tout instant, savoir ce que l'on trace et ce que l'on attend.
- ◆ Bonne justification d'une modélisation linéaire pour les fentes (si $a \rightarrow 0$, $x \rightarrow 0$). Bien penser à exploiter au maximum une modélisation affine (ordonnée à l'origine).
- ◆ Pensez à vous raccrocher à l'intro, ici la fente : revenir sur le fait que c'était Fraunhofer.