

202770

TP : Diffraction par une fente ou un fil

FILS ET FENTES, THEOREME DE BABINET, LASER, LONGUEUR D'ONDE

INTRODUCTION

Le phénomène de diffraction se produit lorsqu'une onde lumineuse rencontre lors de sa propagation un obstacle de faible dimension (de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde incidente). On peut alors observer derrière ces obstacles des figures de diffraction dont les caractéristiques dépendent de la forme et de la dimension de l'obstacle.

Ce TP permettra de mettre en évidence et d'observer quantitativement le phénomène de diffraction d'une source lumineuse monochromatique (source laser) par divers dispositifs diffractant (fente ou fil). L'objectif du TP est de comprendre la nature des figures de diffraction observées en fonction de la forme de l'objet diffractant et d'utiliser ces figures de diffraction pour retrouver certaines grandeurs du montage.

RAPPELS THEORIQUES

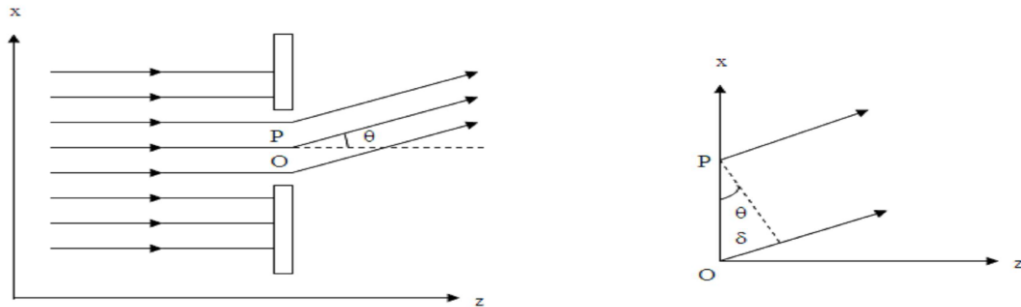
Pour expliquer le phénomène de diffraction, on fait appel à l'optique ondulatoire. On considère une source ponctuelle, monochromatique, émettant un champ électrique plan (c'est le cas par exemple du champ émis par une source laser). On considère le faisceau émis comme étant cylindrique.

Ce faisceau est envoyé sur une fente de largeur ' a ' située dans un plan orthogonal à la direction de propagation du faisceau. Lorsque la largeur de la fente est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du faisceau incident, le phénomène de diffraction est observable.

Pour tenter de comprendre le phénomène, on peut suivre la démarche qu'a eu Huygens : chaque point éclairé de la fente se comporte comme une source secondaire qui émet un champ électromagnétique sphérique. Tous les champs électromagnétiques émis par les sources secondaires sont cohérents entre eux (ils sont à la même fréquence et le déphasage entre deux des champs est constant en fonction du temps). Les conditions sont donc réunies pour qu'il y ait interférence entre toutes les composantes. Ces interférences se produisent à l'infini.

Pour observer convenablement la figure de diffraction obtenue, il faut donc se placer à une distance suffisante de l'objet diffractant. Il est possible de déterminer de manière théorique le profil d'intensité de la figure de diffraction observée sur un écran placé à une distance suffisante de la fente (écran supposé à l'infini). Ce profil d'intensité, qui est l'intensité reçue en un point de l'écran en fonction des coordonnées spatiales de ce point, est obtenu en sommant les contributions de chacune des sources secondaires.

Un point M de l'écran situé à l'infini reçoit un champ électromagnétique qui est la somme des contributions de chacun des points de la fente et dont il est possible de déterminer l'amplitude complexe. La dimension de la fente étant très faible par rapport à la distance entre l'écran et la fente, les droites (OM) et (PM) sont considérées comme parallèles et faisant un angle 'θ' avec l'axe Oz.



La différence de marche δ entre l'onde émise par le point P et celle émise par le point O s'écrit donc :
 $\delta = -x \sin(\theta)$ où x est la coordonnée selon l'axe O_x du point P.

La différence de phase entre les deux ondes est donc : $-k\delta = \frac{2\pi}{\lambda} x \sin(\theta)$.

Soit A l'amplitude des ondes émises par les sources secondaires. L'amplitude complexe de l'onde au point M est obtenue en sommant la contribution de tous les points situés sur la largeur de la fente :

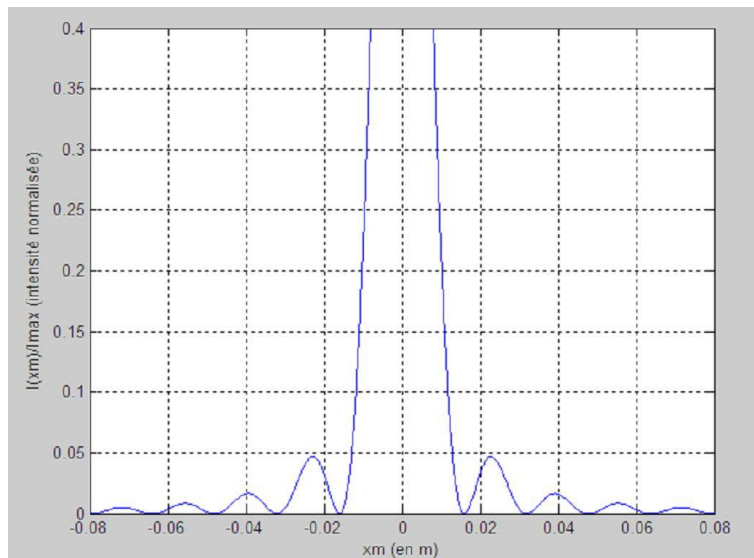
$$\int_{-a/2}^{a/2} A e^{-ik\delta} dx = \int_{-a/2}^{a/2} A e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta) x} dx = \frac{\sin(\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda})}{\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}} = \text{sinc}\left(\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}\right)$$

L'intensité au point M étant proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde reçue, l'intensité est proportionnelle à $\text{sinc}^2\left(\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}\right)$ où sinc est la fonction définie par $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$.

Soit x_m la coordonnée du point d'observation sur l'écran dans la direction de la largeur de la fente. Pour un angle θ suffisamment petit et une distance D suffisamment grande, on peut faire l'approximation $\sin(\theta) = \frac{x_m}{D}$. On obtient finalement que l'intensité dans le plan de l'écran et selon la direction de la fente est proportionnelle à $\text{sinc}^2\left(\frac{\pi a x_m}{\lambda D}\right)$. On peut remarquer que l'intensité s'annule lorsque $\text{sinc}\left(\frac{\pi a x_m}{\lambda D}\right)$ s'annule et $\frac{\pi a x_m}{\lambda D} \neq 0$. Donc, on observe une zone sombre pour

$$\frac{\pi a x_m}{\lambda D} = k\pi \quad \text{d'où} \quad x_m = k \frac{\lambda D}{a} \quad (\text{avec } k \text{ un entier relatif non nul}).$$

Le graphe de l'intensité en fonction de la coordonnée x_m du point d'observation sur l'écran dans la direction de la largeur de la fente est le suivant :



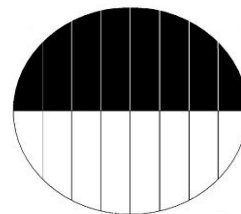
Profil d'intensité théorique de la figure de diffraction à une distance $D=1,5m$, pour une longueur d'onde incidente de $532nm$ et une fente de largeur $a=50\mu m$

Le profil d'intensité prend donc la forme d'une succession de pics d'intensité de plus en plus faible au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la position de l'axe optique sur l'écran et de zones d'intensité nulle. Sur l'écran, cela correspond à une succession de tâches de moins en moins intenses au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la tâche centrale qui est située à l'intersection de l'écran et de l'axe Oz et dirigée selon la largeur la largeur de la fente (axe O_x). La zone centrale est de largeur $\frac{2\lambda D}{a}$ et les autres sont deux fois plus petites.

Manipulation 1 : Diffraction par une fente

Dans cette manipulation, on se propose de retrouver rapidement quelques résultats sur la diffraction d'un faisceau laser par une fente.

Prendre le jeton contenant les fentes et les fils et l'orienter de manière à ce que fentes et fils soient verticaux. Le jeton se divise en deux parties : la partie la plus sombre pour les fentes et la partie la plus claire pour les fils).

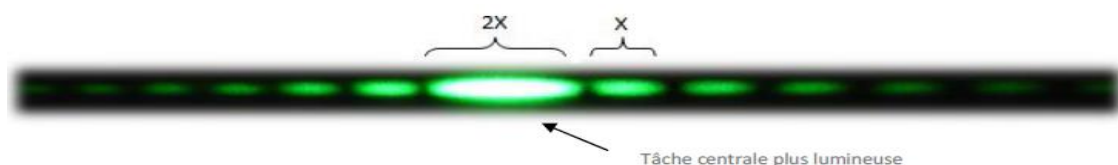


Placer la source laser à une extrémité du banc optique sur le cavalier réglable latéralement, le porte composant avec le jeton sur le cavalier réglable verticalement au centre et l'écran à l'autre extrémité du banc. Eclairer avec la source laser la fente centrale du jeton et former la figure de diffraction du faisceau laser par cette fente sur l'écran.



Décrire la figure obtenue sur l'écran et vérifier que celle-ci est bien en accord avec la théorie.

Dans quelle direction particulière le faisceau est-il diffracté? Donner une explication.



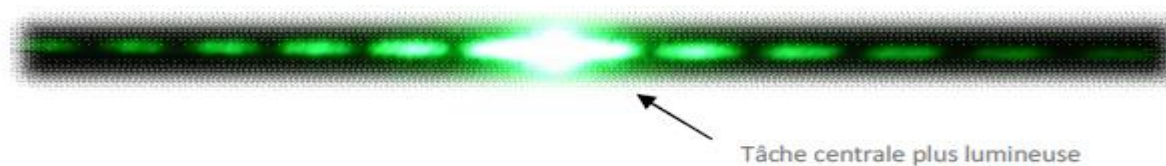
La direction dans laquelle se trouvent les tâches est perpendiculaire à la direction de la fente. La diffraction se fait dans cette direction car l'obstacle rencontré par l'onde est de faible dimension dans cet axe (c'est-à-dire, les tâches observées sont de largeur élevée).

Manipulation 2 : Diffraction par un fil

Eclairer maintenant le fil qui est dans la continuité de la fente qui a été éclairée (les fils sont tous situés dans la continuité d'une fente dont la largeur est égale à l'épaisseur du fil).

Décrire alors la figure de diffraction observée sur l'écran et la comparer avec celle obtenue avec la fente.

Quelle différence peut-on remarquer entre la figure obtenue avec un fil et celle obtenue avec une fente ?

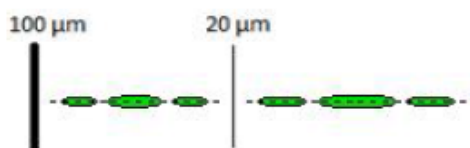


La seule différence réside dans le fait que la tâche centrale est plus lumineuse que lors de la diffraction par une fente. Cela est dû au fait que le fil laisse passer plus d'intensité lumineuse que la fente. Dans le cas du fil, toute la partie du faisceau qui n'est pas interceptée par le fil est transmise, tandis que pour une fente, la partie du faisceau qui déborde de la fente sera réfléchi et non transmise.

Manipulation 3 : Influence de la largeur de la fente

Observer maintenant sur l'écran la figure de diffraction obtenue avec une autre fente que la fente centrale.

Quelle modification de la figure de diffraction pouvez-vous observer ? A quoi cela est-il dû ?



La forme de la figure de diffraction reste globalement la même. La seule différence réside dans la taille des tâches, qui varie en fonction de la fente utilisée. On remarque que plus les fentes sont larges, plus les tâches de la figure de diffraction sont petites. Cela s'explique par le fait que plus un objet a de grandes dimensions, moins il diffracte l'onde lumineuse, ce qui se traduit par une diminution de la taille des tâches et un resserrement de ces dernières.

L'observation que vous venez de faire s'explique par la relation $\theta = \frac{\lambda}{a}$, où θ est la distance entre la fente et l'écran, a la largeur de la fente et λ la longueur de l'onde électromagnétique incidente. On se propose, grâce à cette relation, de faire une première estimation de la longueur d'onde du laser.

Manipulation 4 : Détermination de la longueur d'onde du Laser

Placer le porte-composant contenant le jeton à une dizaine de centimètres de la source laser. Placer ensuite l'écran à 1m30 de l'objet diffractant. Former sur cet écran la figure de diffraction obtenue avec la fente centrale du jeton.

Méthode 1 :

En sachant que les axes gravés sur l'écran sont gradués tous les 2mm (chaque carré figurant sur l'écran est donc de côté 1cm) et que la fente centrale du jeton a une largeur de 80µm avec une précision de 1µm, déterminer la longueur d'onde du faisceau laser.

Accompagner la détermination de la longueur d'onde d'un calcul d'incertitude sur la valeur de λ (on prendra en compte l'incertitude sur d, a et D). Indiquer quelles sont les sources d'incertitude sur l'estimation de la longueur d'onde.

Avec la fente centrale de largeur 80µm, la largeur mesurée de la tache centrale est $d = 17 \text{ mm}$ à une distance D de 1 m 30. L'incertitude sur la mesure de d est estimée à 2 mm et est due à la précision de la mesure effectuée, qui dépend principalement de l'appréciation de l'observateur, de la luminosité ambiante. On a donc $d = 17 \pm 1 \text{ mm}$.

L'incertitude sur la distance D peut être estimée à 1 mm. Comme $\frac{da}{2D} \approx 5,23 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, l'incertitude sur λ est $\Delta\lambda = \frac{a}{2D} \Delta d + \frac{d}{2D} \Delta a + \frac{da}{2d^2} \Delta D \approx 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}$.

Au final, on a donc $\lambda = 523 \pm 40 \text{ nm}$.

Détermination de λ avec la fente de 80 µm	
Distance D (en m)	1,3
Incertitude sur D (en m)	$1 \cdot 10^{-3}$
Largeur a (en m)	$8,00 \cdot 10^{-5}$
Incertitude sur a (en m)	$1 \cdot 10^{-6}$
Diamètre d (en m)	$1,7 \cdot 10^{-2}$
Incertitude sur d (en m)	$1 \cdot 10^{-3}$
Longueur d'onde λ (en m)	$5,23 \cdot 10^{-7}$
Incertitude sur λ (en m)	$4 \cdot 10^{-8}$
λ réel (en m)	$5,32 \cdot 10^{-7}$
Erreur	1,68%

Nous allons maintenant utiliser une autre méthode pour déterminer la longueur d'onde du laser, basée sur l'utilisation de plusieurs fentes de largeur différentes. Conserver le montage précédent.

Méthode 2 :

Effectuer la diffraction de la source laser par la fente la plus fine (les fentes sont classées par ordre de largeur : identifier à l'œil parmi les deux fentes aux extrémités du jeton celle qui est la plus fine).

Observer et décrire la modification de la figure de diffraction et du profil d'intensité. Vérifier donc de manière qualitative la relation entre la largeur de la fente et la largeur de tâches de la figure de diffraction donnée par la formule $\lambda = \frac{da}{2D}$.

Avec la fente dont la largeur est la plus faible, on observe une figure de diffraction plus étendue et dont la tâche centrale et les taches secondaires sont plus larges qu'avec la fente de 80 μm utilisée dans la méthode précédente. De même, le profil d'intensité est spatialement plus étendu et les pics d'intensités sont plus large. La largeur de la tâche centrale semble donc bien inversement proportionnelle à la largeur de la fente.

Mesurer la largeur l de plusieurs pics (lorsque cela est possible). Effectuer les mêmes opérations pour chacune des fentes. La relation entre la largeur l mesurée et le diamètre de la tâche centrale est $d = \frac{2l}{N+1}$ où N est le nombre de pics pris en compte dans la mesure.

Sachant que les fentes ont pour largeur 30 μm, 60 μm, 80 μm, 100 μm, 150 μm et 200 μm, tracer la courbe $d = f(1/a)$. Expliquer la forme particulière du graphe et en déduire une méthode d'estimation de la longueur d'onde du laser.

Expliquer en quoi cette méthode est plus fiable que la précédente. Quel est l'intérêt d'effectuer les mesures sur plusieurs pics et pas uniquement sur le pic central.

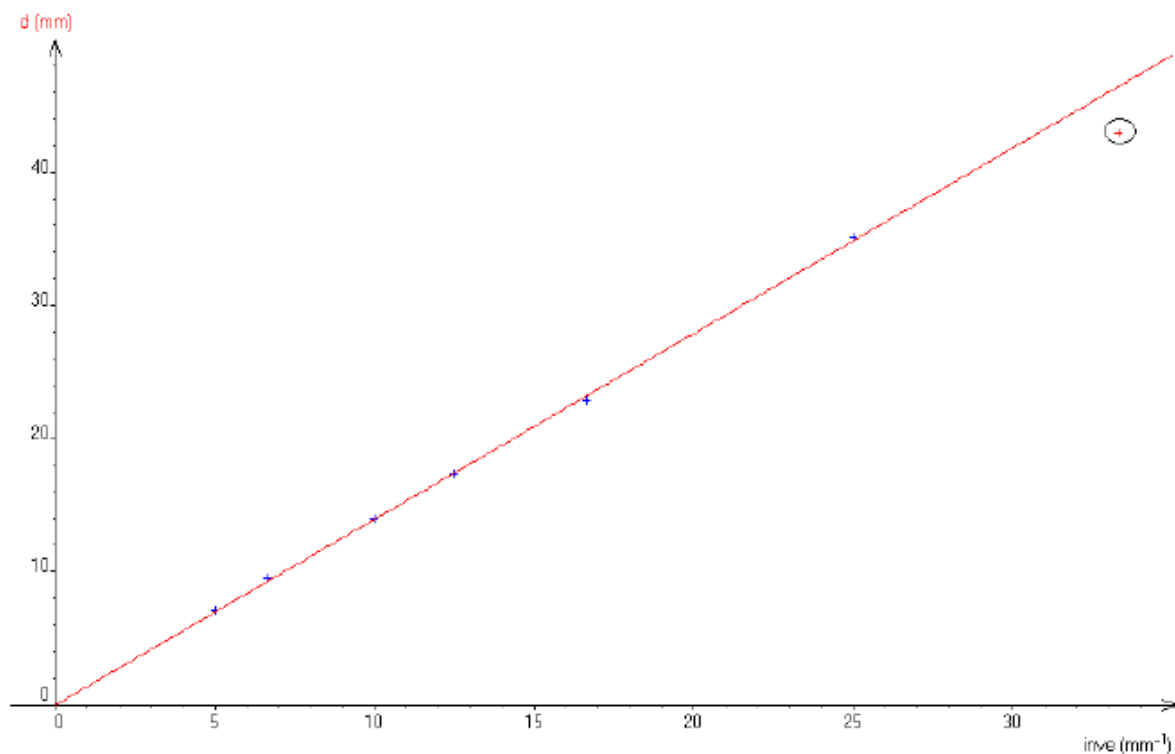
Les mesures de la largeur l de plusieurs pics sur le profil d'intensité obtenus avec les différentes fentes donne les résultats suivants :

	Fente 1	Fente 2	Fente 3	Fente 4	Fente 5	Fente 6	Fente 7
Distance D	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Largeur a de la fente	$3,00.10^{-5}$	$4,00.10^{-5}$	$6,00.10^{-5}$	$8,00.10^{-5}$	$1,00.10^{-4}$	$1,50.10^{-4}$	$2,00.10^{-4}$
Largeur l de N taches	$4,29.10^{-2}$	$3,51.10^{-2}$	$2,28.10^{-2}$	$3,46.10^{-2}$	$3,50.10^{-2}$	$3,32.10^{-2}$	$3,88.10^{-2}$
Nombre N de taches	1	1	1	3	4	6	10
Diamètre tâche centrale d	$4,29.10^{-2}$	$3,51.10^{-2}$	$2,28.10^{-2}$	$1,73.10^{-2}$	$1,40.10^{-2}$	$9,49.10^{-3}$	$7,05.10^{-3}$

A partir de la mesure de l , on estime la largeur d de la tâche centrale à partir de la relation $d = \frac{2l}{N+1}$. Sur le graphe de $d=f(1/a)$, on remarque que les points semblent répartis selon une droite passant par l'origine, mis à part le point correspondant à la mesure pour la fente de 30 μm de largeur. En effet, on remarque que ce point est largement en dehors de la droite formée par les autres points. Cela est dû à la mesure qui est, pour cette fente, difficile à réaliser : les minima d'intensité autour de la tâche centrale ne sont pas tout à fait visibles.

Compte tenu de la relation $\lambda = \frac{da}{2D}$, qui peut être mise sous la forme $d = \frac{2D\lambda}{a} = k \frac{l}{a}$, il semble logique d'obtenir une droite dont le coefficient directeur est $2D\lambda$.

Le graphe obtenu est le suivant :



Avec le coefficient directeur de cette droite, on peut en déduire une estimation de la longueur d'onde du laser.

Pente k (en mm ²)	1,39
Incertitude sur k (en mm ²)	0,02
λ (en nm)	535
Incertitude sur λ (en nm)	8

On obtient $\lambda = 535 \pm 8$ nm. Cette méthode est plus précise que la précédente car elle prend en compte plusieurs mesures, ce qui permet de compenser les erreurs de mesure.

De plus, le résultat obtenu est plus fiable car les mesures effectuées sur plusieurs pics ont une incertitude relative plus faible (l'incertitude sur la mesure de d à l'écran reste toujours la même mais elle est faite sur une distance plus grande, ce qui limite l'incertitude relative $\frac{\Delta d}{d}$ et donc l'incertitude sur l'estimation de λ).

Des services au quotidien

Obtenir des conseils, un devis, une demande de démo



> Service technico-commercial

Pour la Métropole

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

E-mail : optique@ovio-instruments.com

Web : www.ovio-optics.com

Pour l'International

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

E-mail : export@ovio-instruments.com

Commander, suivre une commande

> Administration des ventes

Passer une commande

Fax : +33 (0)1 30 44 25 40

E-mail : optique@ovio-instruments.com

Courrier : OVIO Instruments - Service Clients

468, rue Jacques-Monod

CS 21900, 27019 Evreux CEDEX France

Suivre une commande

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

E-mail : optique@ovio-instruments.com



Obtenir des conseils, un devis, une demande de démo



> Support technique, SAV

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

E-mail : SAV@ovio-instruments.com

Web : www.ovio-optics.com

Pour l'International

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

Attention : pour tout retour de matériel en SAV, merci de nous appeler au préalable.