

204 556 – Diffraction et Interférences sur banc Basix



Notice d'utilisation et d'applications pédagogiques

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| I. INTRODUCTION..... | 2 |
| II. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES | 3 |
| 1) Descriptif du matériel | 3 |
| 2) Précautions d'emploi..... | 3 |
| 3) Garantie..... | 3 |
| III. IDEES D'UTILISATION EN TRAVAUX PRATIQUES..... | 4 |
| 1) Diffraction par une fente ou un fil..... | 4 |
| 2) Dispositif des fentes doubles d'Young..... | 5 |
| 3) Diffraction par un trou de faible diamètre | 5 |
| 4) Interférences par des trous d'Young | 6 |
| 5) Diffraction par un carré..... | 7 |
| IV. CORRECTIONS..... | 7 |
| 1) Diffraction par une fente ou un fil..... | 7 |
| 2) Dispositif des fentes doubles d'Young..... | 9 |
| 3) Diffraction par un trou de faible diamètre | 9 |
| 4) Interférences par des trous d'Young | 10 |
| 5) Diffraction par un carré..... | 11 |
| V. RESSOURCES..... | 11 |
| 1) Présentation de la diffraction | 11 |
| 2) Diffraction par deux fentes de même largeur : dispositif des fentes d'Young..... | 13 |
| 3) Diffraction par un trou circulaire..... | 15 |
| 4) Introduction à l'optique de Fourier et ouverture carrée diffractante..... | 15 |

I. *Introduction*

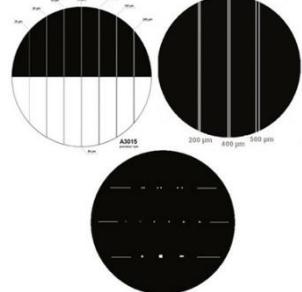
Le phénomène de diffraction se produit lorsqu'une onde lumineuse rencontre lors de sa propagation un obstacle de faible dimension (de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde incidente). On peut alors observer derrière ces obstacles des figures de diffraction dont les caractéristiques dépendent 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 diffractants : fentes et fils, fentes doubles (dispositif des fentes d'Young), des trous circulaires ou encore carrés.

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 caractéristiques du montage.

II. Caractéristiques Techniques

1) Descriptif du matériel

| <i>Ensemble Diffraction & Interférences sur Basix 204 556</i> | |
|--|--|
| <i>Banc & Cavaliers</i> | 1 banc Basix 2 m 2 cavaliers simples 1 cavalier à réglage latéral |
| <i>Source</i> | 1 laser vert 532 nm classe II, 1 mW |
| <i>Ecran</i> | 1 écran blanc plastique gradué 15x15 cm |
| <i>Supports</i> | 3 porte-composants simples pour Basix |
| <i>Composants</i> | 3 jetons micro-lithographiés diamètre 40 mm : <ul style="list-style-type: none"> - 7 fentes-7 fils - 3 fentes doubles - trous, trous d'Young et carrés  |

2) Précautions d'emploi

Depuis leur mise au point en 1960 par Townes, les lasers se sont largement implantés dans la vie de tous les jours. Etant donné que ces outils sont actuellement omniprésents dans des secteurs d'activités aussi variés que l'industrie ou la médecine, les réglementations les concernant sont régulièrement actualisées et normalisées à différentes échelles (nationale, européenne et internationale).

Il existe actuellement 7 classes différentes des sources laser (voir par ex. : www.laserconseil.fr/guide ou www.cnsi.fr/images/docslibres/CNSI%20-%20Les%20classes%20laser.pdf). Selon leur puissance, les faisceaux laser peuvent brûler des matériaux (découpage laser en industrie), la peau mais aussi et surtout les yeux.

Le module laser utilisé ici possède une lumière visible d'environ 1 mW (classe 2). Il faut savoir que ce faisceau laser est peu dangereux pour une observation latérale grâce au réflexe palpbral mais sa vision directe peut tout de même provoquer un **éblouissement plus ou moins sévère**.



3) Garantie

La garantie est de 3 ans pour une utilisation dans des conditions normales. Si un problème est rencontré, le matériel doit être retourné dans nos ateliers après appel préalable (tél : +33 (0)2 32 29 40 50).

OVIO Instruments

468, rue Jacques Monod – ZI N°1 Nétreville – CS 21900

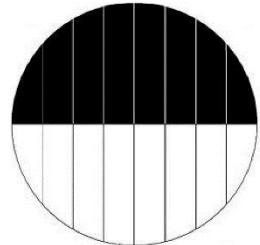
27019 EVREUX Cedex – France

III. Idées d'utilisation en Travaux Pratiques

1) Diffraction par une fente ou un fil

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

- Insérer le jeton « fentes et fils » dans un porte-composant Basix et l'orienter de manière à ce que fentes et fils soient verticaux
- Placer la source laser à une extrémité du banc optique sur le cavalier simple et l'écran à l'autre extrémité du banc dans un cavalier simple.
- Dans le cavalier à réglage latéral mettre le porte-composant avec le jeton à la suite.
- 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.



Q.1-1 : 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.

- 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).

Q.1--2 : 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 ?

Q.1-3 : Observer maintenant 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 ? Vérifier 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 $\lambda = da/2D$.

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

Q.1--4 : En sachant que les axes gravés sur l'écran sont gradués tous les 2 mm (chaque carré de l'écran fait donc 1 cm de côté) et que la fente centrale du jeton a une largeur de 80 μm avec une précision de 2 μm , 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.

Nous vous proposons une autre méthode pour déterminer la longueur d'onde du laser en utilisant la diffraction du laser par des fentes de différentes largeurs.

- 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).

Q.1-5 : 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 tache centrale est $d=2l/(N+1)$ où N est le nombre de pics pris en compte dans la mesure. Sachant que les fentes ont pour largeur $30 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$ et $200 \mu\text{m}$, 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.

2) Dispositif des fentes doubles d'Young

Nous avons jusqu'à présent observé le phénomène de diffraction par une fente ou un fil. Nous allons dans cette partie nous intéresser à la diffraction d'un même faisceau monochromatique par deux fentes. Il se produit, en plus de la simple diffraction du faisceau, un phénomène d'interférences. Le profil d'intensité de la figure alors obtenue (qui n'est plus une figure de diffraction) est semblable à celui présenté dans la partie IV - Ressources.



- Placer l'écran à environ 80 cm du porte-composant avec e jeton.
- Aligner le montage de manière à ce que la figure d'interférence soit au centre de l'écran. Pour cela, éclairer les deux fentes les moins espacées et regarder où se forme la figure d'interférence. Si l'image n'est pas au centre de l'écran, vous pouvez ajuster en tournant légèrement le jeton dans sa monture et en vous déplaçant latéralement.

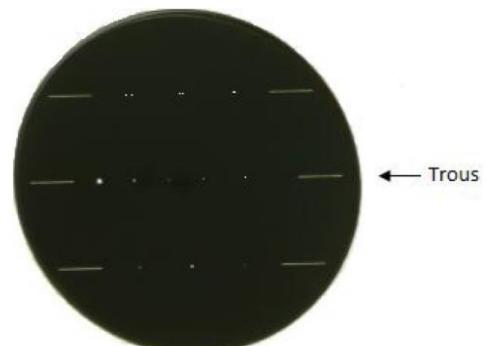
Q.3-1 : Décrire la forme de la figure. Vérifier qu'elle correspond à ce qu'on attend en théorie. Expliquer pourquoi il est nécessaire d'éclairer les deux fentes avec la même source laser.

Q.3-2 : Identifier l'effet produit par la diffraction par une fente et l'effet produit par l'interférence entre les faisceaux transmis par les deux fentes

Q.3-3 : Deux paramètres importants sont la largeur ' a ' des fentes et la distance ' e ' entre deux fentes. Toutes les fentes du jeton sont de la même largeur, seule la distance entre les deux fentes change d'une paire de fentes à l'autre. Déplacez-vous sur le jeton à l'aide de la translation latérale du cavalier, et comparer les différentes figures obtenues.

3) Diffraction par un trou de faible diamètre

Dans cette manipulation, on se propose de caractériser la figure de diffraction obtenue avec un trou de diamètre a . Comme il est mentionné dans la partie théorique, la figure de



diffraction obtenue avec un trou circulaire est une tache centrale circulaire entourée d'une succession d'anneaux concentriques dont l'intensité décroît au fur et à mesure que le rayon des cercles augmente.

- Insérer le jeton « trous, trous d'Young et carrés » dans le porte-composants. Ce jeton possède trois axes particuliers, indiqués par des segments gravés sur les bords du jeton. L'axe central possède six trous de diamètre variable.
- Eclairer le trou de plus grand diamètre.

Q-1 : Décrire la figure de diffraction observée.

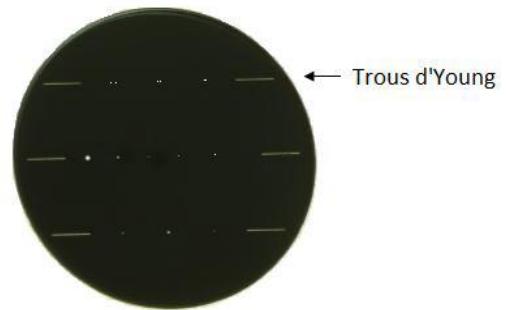
Q-2 : Observer maintenant la figure obtenue avec le trou de diamètre directement inférieur. Commentez la modification de la figure obtenue. En particulier, sur quel(s) paramètre(s) influe la variation du diamètre du trou?

Q-3 : A l'aide des figures observées, pourriez-vous donner une estimation du diamètre du trou utilisé ?

4) Interférences par des trous d'Young

L'objectif de cette manipulation est d'observer la figure obtenue lorsqu'on éclaire avec un même faisceau laser deux trous circulaires de même diamètre 'a', espacés d'une distance 'e' (dispositif des trous d'Young) et de comprendre quels paramètres peuvent influencer sur la forme de la figure d'interférence obtenue.

Pour réaliser l'expérience des trous d'Young, le jeton contenant la série de trous de diamètre variable possède également trois paires de trous de diamètre 50 µm. La distance entre les trous de chaque paire est différente d'une paire à l'autre.



- Repérer sur le jeton les paires de trous (situées le long d'un des deux axes extérieurs gravés sur le jeton). Eclairer la paire de trous séparés par la distance la plus faible. Conserver l'écran avec les carrés pour cette observation.
- Placer l'écran à une distance d'environ 30 cm du jeton.

Q.4-1 : Expliquez la forme de la figure en vous aidant de la figure de diffraction obtenue avec un trou et de la figure du dispositif des fentes d'Young. En faisant le lien avec le dispositif des fentes d'Young, deviner l'effet de la variation de la distance entre les deux trous. Vérifier l'hypothèse en observant la figure obtenue avec les autres paires de trous.

Q.4-2 : Compte tenu des observations précédentes, décrire l'allure de la figure qu'on obtiendrait avec des trous de diamètre 100 µm séparés 100 µm.

5) Diffraction par un carré

Repérer sur le jeton multiple l'axe contenant les trous carrés et le trou rectangulaire.

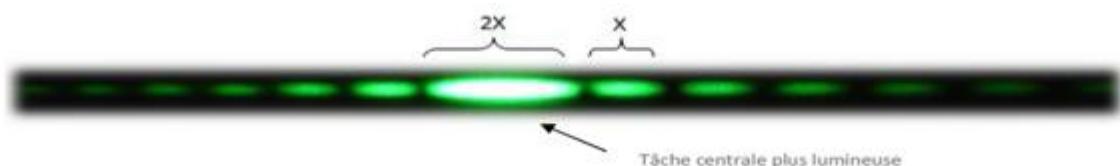
Q.5-1 : A l'aide de la partie théorique, prévoir quelle sera la forme du profil d'intensité obtenu par la diffraction du faisceau laser par le rectangle. Identifier alors la forme avec laquelle vous effectuez la diffraction.

Q.5-2 : En généralisant à deux dimensions les résultats obtenus lors de la diffraction par une fente, retrouver, en expliquant votre démarche, les dimensions de l'objet à partir du profil d'intensité. (On rappelle que la longueur d'onde du laser est de 532nm).

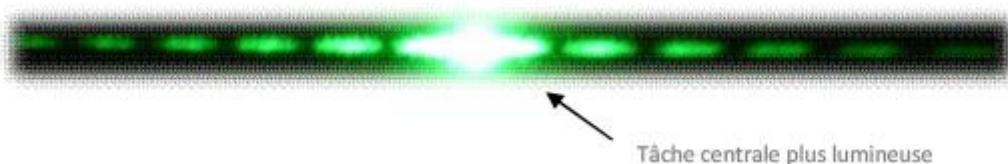
IV. Corrections

1) Diffraction par une fente ou un fil

Q.1-1 : 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 taches observées sont de largeur élevée).



Q.1-2 : La seule différence réside dans le fait que la tache 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 réfléchie et non transmise). On vérifie ainsi le principe de Babinet : la figure de diffraction obtenue avec un fil est avec une fente sont de la même forme car leur transmission sont complémentaires.



Q.1-3 : 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.

Q.1-4 : Avec la fente centrale de largeur 80 µm, la largeur mesurée de la tâche centrale est $d=17$ mm à une distance D de 1m30. L'incertitude sur la mesure de d est estimée à 2 mm (au mieux 1 mm) et est due à la précision de la mesure effectuée, qui dépend principalement de l'appréciation de l'observateur, de la luminosité ambiante (mais aussi de l'orientation de l'écran, qui a cependant une influence presque négligeable). On a donc $d = 17 \pm 1$ mm. L'incertitude sur la distance D peut être estimée à 1 mm.

On sait que : $\lambda = da / 2D \approx 5,23 \cdot 10^{-7}$ m.

L'incertitude sur le calcul de la longueur d'onde peut s'approximer par la relation :

$$\Delta\lambda = (a/2D)\Delta d + (d/2D)\Delta a + (da/2d^2)\Delta D$$

$$\Delta\lambda \approx 4 \cdot 10^{-8} \text{ m. Finalement, } \lambda = (523 \pm 40) \text{ nm}$$

| Données expérimentales | |
|----------------------------------|----------------------|
| Distance D (en m) | 1,3 |
| Incrtitude sur D (en m) | $1 \cdot 10^{-3}$ |
| Largeur a (en m) | $8,00 \cdot 10^{-5}$ |
| Incrtitude sur a (en m) | $2 \cdot 10^{-6}$ |
| Diamètre d (en m) | $1,70 \cdot 10^{-2}$ |
| Incrtitude sur d (en m) | $1 \cdot 10^{-3}$ |
| Longueur d'onde λ (en m) | $5,23 \cdot 10^{-7}$ |
| Incrtitude sur λ (en m) | $4 \cdot 10^{-8}$ |
| λ réel (en m) | $5,32 \cdot 10^{-7}$ |
| Erreur | 1,68 % |

Q.1-5 : Les mesures de la largeur l de plusieurs pics sur le profil d'intensité obtenus avec les différentes fentes donnent les résultats suivants :

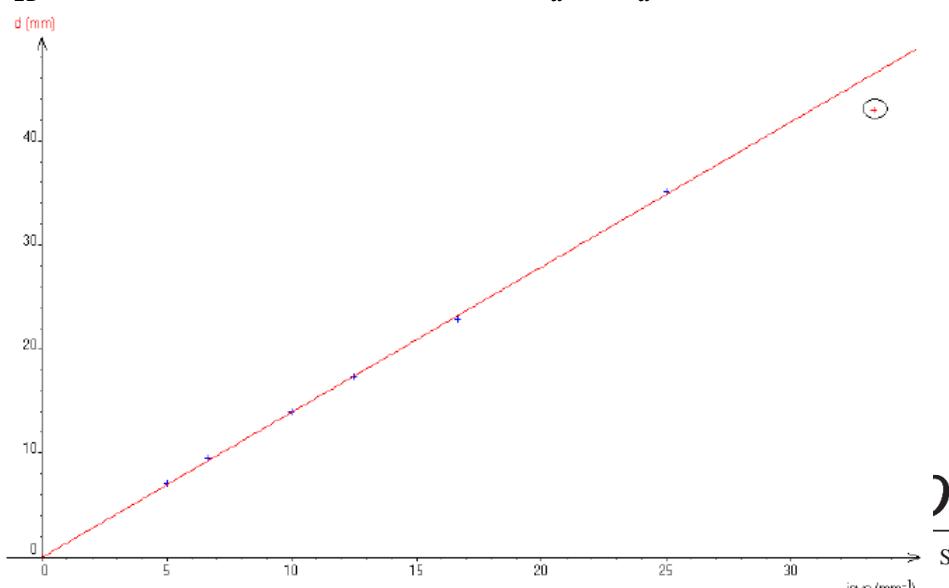
| | Fente 1 | Fente 2 | Fente 3 | Fente 4 | Fente 5 | Fente 6 | Fente 7 |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Distance D | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |
| Largeur a de la fente | $3,00 \cdot 10^{-5}$ | $4,00 \cdot 10^{-5}$ | $6,00 \cdot 10^{-5}$ | $8,00 \cdot 10^{-5}$ | $1,00 \cdot 10^{-4}$ | $1,50 \cdot 10^{-4}$ | $2,00 \cdot 10^{-4}$ |
| Largeur l de N taches | $4,29 \cdot 10^{-2}$ | $3,51 \cdot 10^{-2}$ | $2,28 \cdot 10^{-2}$ | $3,46 \cdot 10^{-2}$ | $3,50 \cdot 10^{-2}$ | $3,32 \cdot 10^{-2}$ | $3,88 \cdot 10^{-2}$ |
| Nombre N de taches | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 6 | 10 |
| Diamètre tache centrale d | $4,29 \cdot 10^{-2}$ | $3,51 \cdot 10^{-2}$ | $2,28 \cdot 10^{-2}$ | $1,73 \cdot 10^{-2}$ | $1,40 \cdot 10^{-2}$ | $9,49 \cdot 10^{-3}$ | $7,05 \cdot 10^{-3}$ |

A partir de la mesure de l , on estime la largeur d de la tâche centrale à partir de la relation $d = 2l/(N+1)$. 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 $2D\lambda$.

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 |
| Incrtitude 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 $\Delta d/d$ et donc l'incertitude sur l'estimation de λ).

2) Dispositif des fentes doubles d'Young

Q.2-1 : On observe un ensemble de taches réparties sur un axe. On observe une succession de bandes claires et sombres qui peuvent être regroupées par bloc. Chaque bloc forme une tache ovale, dont la centrale est plus large et beaucoup plus intense que les autres. Plus les taches sont éloignées de la tache centrale, moins elles sont intenses (les taches secondaires ont cependant toutes la même taille). On peut remarquer que la figure représentée par les blocs est similaire à la figure de diffraction obtenue avec une fente. La différence observée entre les deux est la présence de franges sombres et claires, dues aux interférences entre les champs émis par les deux fentes. Pour que ces interférences aient lieu, il faut que les deux ondes lumineuses soient temporellement cohérentes (le déphasage entre les deux champs émis est constant au cours du temps, d'où l'intérêt de les éclairer avec le même faisceau laser).

Q.2-2 : Les caractéristiques de l'enveloppe observée semblent donc liées à la forme et aux dimensions des fentes (qui sont identiques) et la modulation de l'enveloppe (présence d'une série de pics d'intensité dont les maximums coïncident avec l'enveloppe) semble être dûe à la présence d'interférences entre les deux ondes émises par chacune des fentes.

Q.2-3 : La modification de la distance entre les deux fentes ne modifie pas l'enveloppe du profil d'intensité mais modifie la position des minimums et maximums dus aux interférences et donc de la taille des franges observées. L'écart entre deux franges (sombres ou brillantes) successives diminue et les franges deviennent plus fines, lorsque la distance entre les fentes augmente. On peut en déduire une dépendance entre la largeur des franges d'interférence et la distance ' e ' entre les fentes.

3) Diffraction par un trou de faible diamètre

Q-1 : La figure de diffraction observée est une tache centrale circulaire intense entourée d'anneaux concentriques (centrés sur la tache centrale) de moins en moins intenses au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la tache centrale. L'observation est assez difficile car si la tache centrale est trop intense, la diffusion implique un recouvrement du premier anneau, qui n'est alors plus visible.



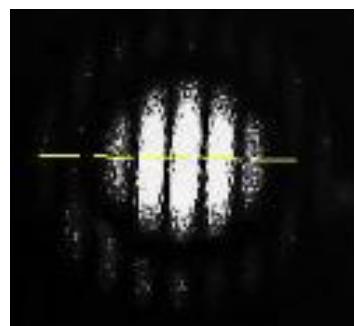
Q-2 : On observe une figure de diffraction de la même forme que celle obtenue précédemment, à la différence près que les anneaux sont moins resserrés et que la tache centrale est plus étendue : cela laisse supposer que le diamètre de la tache centrale est inversement proportionnel au diamètre de la fente. La diffraction par ce trou est plus facile à observer car l'intensité de la tache centrale est moins élevée, ce qui limite le problème rencontré dans la question précédente.

Q-3 : D'après la partie théorique, le diamètre d de la tache centrale et le diamètre a du trou sont reliés par la relation $d=1,22 \cdot 2D\lambda/a$. On mesure $d=6,1$ mm à une distance $D=90$ cm. On a alors $a=1,22 \times 2D\lambda/d \approx 192$ μm .

4) Interférences par des trous d'Young

Q.4-1 : La figure de diffraction obtenue est constituée d'une tache centrale et d'anneaux concentriques (semblable à la figure de diffraction obtenue avec un trou circulaire simple) possédant des alternances de franges sombres et brillantes. Les franges semblent être dirigées perpendiculairement à l'axe contenant les deux trous. Le profil d'intensité selon un axe passant par le centre de la tâche est de la forme suivante :

Les alternances de minimum et maximum au sein de cette enveloppe sont dues aux interférences entre les champs émis par les deux trous.



Interférences visualisées avec une caméra Ovisio.

Q.4-2 : La modification du diamètre des trous n'a d'influence que sur la taille de la tache centrale et la position et la taille des anneaux composant la figure d'interférence obtenue. On observera donc une figure dont la forme générale est similaire à celle obtenue par la diffraction par un trou de diamètre 100 μm (pour lequel la tache centrale est plus petite et les anneaux plus fins et moins espacés). On observera aussi des franges d'interférence dont l'interfrange sera la même que celle obtenue avec les trous de 50 μm séparés d'une distance de 100 μm .

5) Diffraction par un carré

Q.5-1 : La figure de diffraction donnée par un rectangle est composée d'une tache centrale très lumineuse et de taches secondaires réparties selon deux axes qui sont parallèles aux côtés du carré. Selon les deux axes, les taches sont de même largeur. La largeur de ces taches est déterminée par la longueur du côté qui est parallèle à l'axe sur lequel elles sont situées : on en déduit que la modification de la longueur d'un des côtés modifiera la largeur des taches de la figure de diffraction selon l'un des axes. Dans le cas d'un rectangle, on obtiendra donc des taches qui n'ont pas la même largeur selon les deux axes, ce qui permet de l'identifier. On observera une figure de diffraction et un profil d'intensité similaires à ceux présentés sur la figure suivante :

Q.5-2 : Dans le cas de la diffraction par une fente, la largeur de N taches de la figure de diffraction (tache centrale comprise) est reliée à la largeur de la fente par la relation $a = (N+1)D\lambda/l$

En mesurant la largeur 'l' de plusieurs taches de diffraction sur un axe, on peut en déduire la dimension de l'objet diffractant selon la direction de l'axe où sont situées les taches étudiées.

V. Ressources

1) Présentation de la diffraction

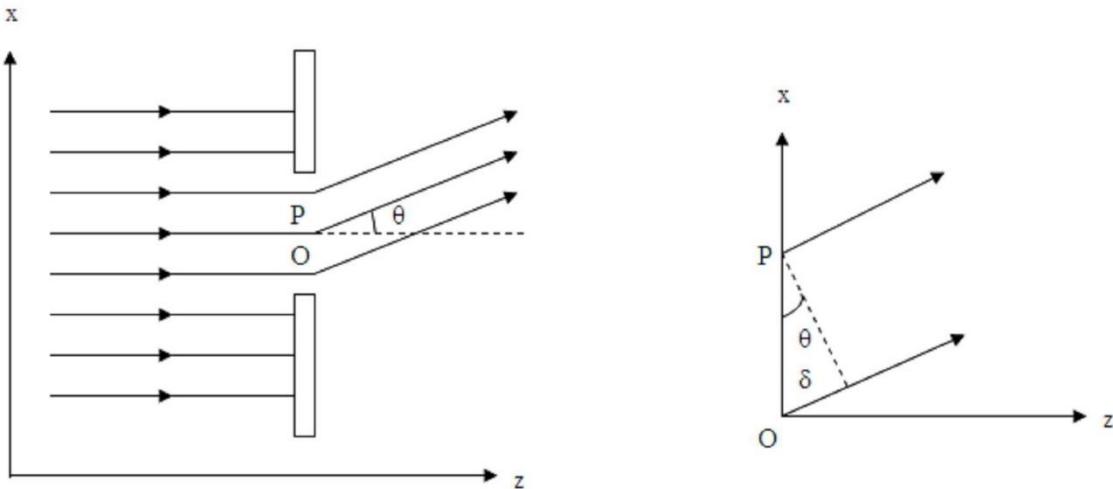
Pour expliquer le phénomène de diffraction, on fait appel à l'optique ondulatoire. On considère une source ponctuelle, monochromatique, émettant un champ électrique plan (c'est le cas par exemple du champ émis par une source laser). On considère le faisceau émis comme étant cylindrique.

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 de 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 Ox 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 :

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

L'intensité au point M étant proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde reçue, l'intensité est proportionnelle à :

$$\text{sinc}^2\left(\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}\right), \text{ où } \text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$$

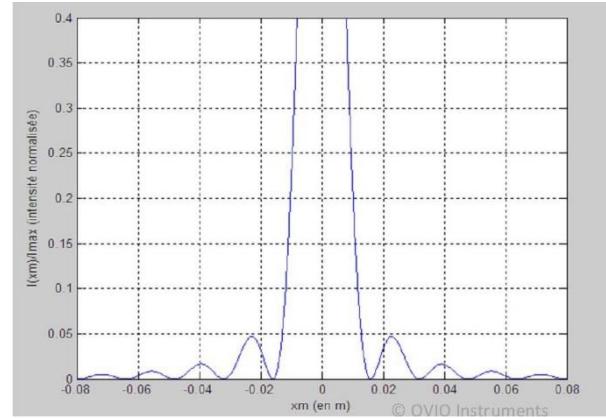
Soit x_m la coordonnée du point d'observation sur l'écran dans la direction de la largeur de la fente. Pour un angle θ petit et une distance D suffisamment grande, on peut faire l'approximation $\sin(\theta) = x_m/D$. On obtient finalement que l'intensité dans le plan de l'écran et selon la direction 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 le sinc s'annule et pour $(\pi a x_m)/\lambda D \neq 0$. On observe donc des zones sombres pour : $\frac{\pi a x_m}{\lambda D} = k\pi$ d'où pour tous les $x_m = k \frac{\lambda D}{a}$, et k entier relatif non nul.

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 de la fente (axe Ox).

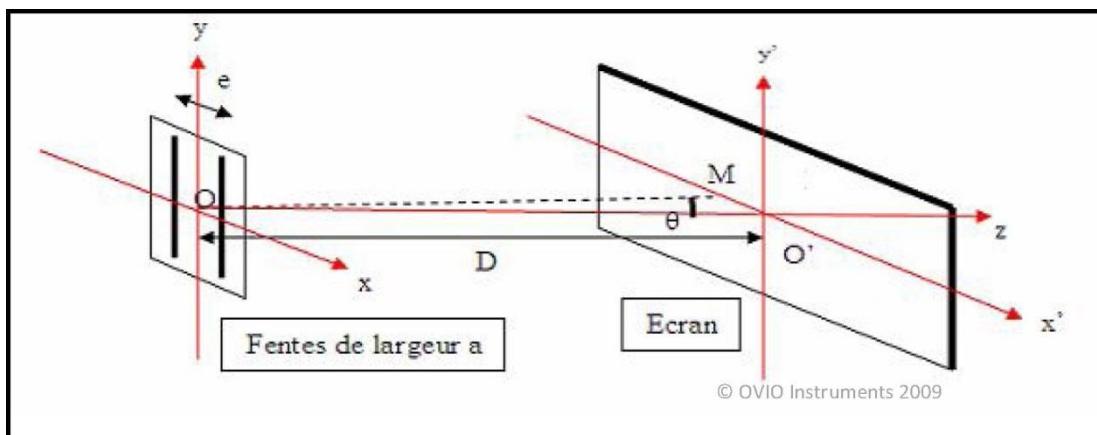
La zone centrale est de largeur $2\lambda D/a$ et les autres sont deux fois plus petites.



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

2) Diffraction par deux fentes de même largeur : dispositif des fentes d'Young

Ce profil d'intensité est valable en prenant une fente comme objet diffractant. Il est cependant modifié si on considère un faisceau laser éclairant simultanément deux fentes. Dans ce cas, on parle de dispositif des fentes d'Young. Le dispositif est représenté sur le schéma suivant :



Dans ce cas, le phénomène d'interférences entre en jeu : les deux faisceaux diffractés par chacune des fentes vont interférer dans la zone où ils se recouvrent. Ce phénomène se produit si les deux faisceaux sont cohérents entre eux, c'est-à-dire, si leur fréquence est identique et si le déphasage entre les deux champs électriques est constant au cours du temps. Ces conditions sont remplies ici car les fentes sont éclairées par le même faisceau laser.

On peut par le calcul retrouver l'intensité reçue en un point M du plan de l'écran situé sur l'axe Ox'. Comme les deux sources (ici les fentes éclairées par le faisceau laser) sont cohérentes, on ne peut pas simplement additionner l'intensité émise par chacune des fentes : il faut additionner les amplitudes du champ électrique émis par chacune des fentes.

L'expression de l'amplitude du champ électrique émis par une fente dans le plan de l'écran a été donnée dans la partie précédente. Ces calculs (obtenus en sommant les contributions de chacun des points de la fente) peuvent être repris en modifiant la position de la fente dans le calcul de l'intégrale.

Pour la fente centrée en ' $-e/2$ ', l'amplitude complexe ' A_1 ' du champ électrique émis par la fente est :

$$A_1(M) = \int_{-\frac{e}{2} - \frac{a}{2}}^{-\frac{e}{2} + \frac{a}{2}} A e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta)x} dx$$

L'amplitude A_2 pour le champ émis par la fente centrée en ' $e/2$ ' est :

$$A_2(M) = \int_{\frac{e}{2} - \frac{a}{2}}^{\frac{e}{2} + \frac{a}{2}} A e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta)x} dx$$

L'amplitude totale vue au point M est alors obtenue en sommant les deux amplitudes et en effectuant les changements de variable $u = x + e/2$ (calcul de A_1) et $u = x - e/2$ (calcul de A_2). On obtient finalement :

$$A(M) = \left(e^{i\frac{\pi \sin(\theta)e}{\lambda}} + e^{-i\frac{\pi \sin(\theta)e}{\lambda}} \right) \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} A e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta)u} du = \cos\left(\frac{\pi \sin(\theta) e}{\lambda}\right) \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} A e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta)u} du$$

On remarque que l'intégrale est la même que celle donnant l'amplitude du champ électrique obtenue avec la diffraction par une fente unique. Cette amplitude est modulée par un cosinus, qui est le terme d'interférence.

L'intensité est donc finalement proportionnelle à :

$$\cos^2\left(\frac{\pi \sin(\theta)e}{\lambda}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}\right)$$

L'enveloppe (en rouge) représente le profil d'intensité obtenu lors de la diffraction du même faisceau laser par une fente de largeur $40 \mu\text{m}$.

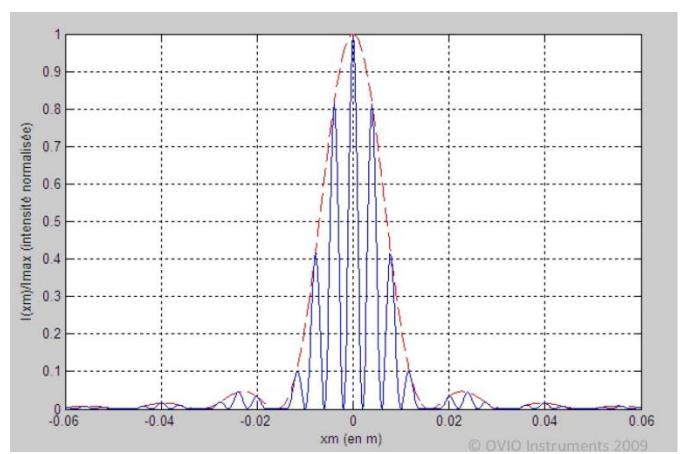
Profil d'intensité théorique pour $D = 1,5 \text{ m}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$, et deux fentes de largeur $a = 40 \mu\text{m}$, espacées de $e = 100 \mu\text{m}$.

Cette enveloppe, dans le cas d'une diffraction par deux fentes, est modulée par le terme d'interférence en cosinus qui dépend de la distance e entre les deux fentes.

En supposant que θ est faible, on peut faire l'approximation :

$\sin\theta \approx x_m/D$, avec x_m la coordonnée du point M sur l'écran selon l'axe O'x'.

Le terme d'interférence devient donc : $\cos\left(\frac{\pi e x_m}{\lambda D}\right)$



3) Diffraction par un trou circulaire

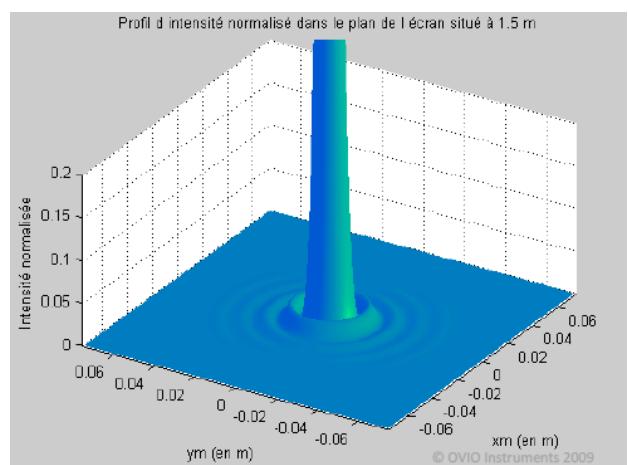
On peut par exemple diffracter la lumière émise par le laser à l'aide d'un trou de faible diamètre. Dans ce cas, le calcul de l'amplitude complexe du champ électrique incident dans plan de l'écran devient plus compliqué mais le principe reste le même. Cette fois ci, il faut raisonner en deux dimensions : il faut calculer le déphasage entre le champ émis par le point O et celui émis par un point P du trou, de coordonnées (x, y). Pour cela, on reprend le raisonnement effectué dans le cas d'une fente.

En sommant toutes les contributions de chacun des points du trou, il peut être démontré (démonstration mathématiquement difficile qu'il n'est pas nécessaire de détailler ici) que l'intensité au point M est proportionnel à

$J_1 \left(\frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{x_m^2 + y_m^2} \right)$ où J_1 est une fonction de Bessel d'ordre 1, et R est le rayon du trou circulaire.

La figure de diffraction alors observée est donc constituée d'une tache centrale lumineuse, puis d'une série d'anneaux concentriques dont l'intensité décroît avec la distance par rapport à la tache centrale. Le diamètre d du pic central est alors donné par la relation :

$$d = 1,22 \frac{D\lambda}{R}$$



4) Introduction à l'optique de Fourier et ouverture carrée diffractante

Nous allons dans cette partie utiliser le concept de l'optique de Fourier afin d'expliquer la forme prise par les figures de diffraction et leur profil d'intensité en fonction de la forme de l'objet diffractant. Pour cela, nous allons repartir de l'expression suivante :

$$A_m(M) = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} A e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta)x} dx$$

L'écriture de cette expression peut être quelque peu modifiée. Tout d'abord, on définit la fonction pupillaire de l'objet diffractant comme étant son coefficient de transmission en amplitude.

Dans le cas d'une fente par exemple, la fonction pupillaire dans la direction de la largeur de la fente est : $t(x) = 1$ si $x \in [-a/2; +a/2]$ et $t(x) = 0$ sinon (fonction de type porte).

Ensuite, on pose : $\mu = \frac{\sin(\theta)}{\lambda}$, et on réécrit l'expression ci-dessus : $A_m(M) = \int_{-\infty}^{+\infty} t(x) e^{-i 2\pi \mu x} dx$

On reconnaît ici l'expression d'une transformée de Fourier dite spatiale. On peut donc dire que dans les conditions adéquates (pour un écran situé à l'infini), l'amplitude complexe de l'onde électromagnétique transmise par l'objet diffractant est la transformée de Fourier de la fonction pupillaire de l'objet diffractant. Ceci est vrai pour n'importe quel objet diffractant.

Considérons un carré de côtés a . Soient les axes Ox et Oy parallèles aux côtés du carré. On peut écrire sa fonction pupillaire à 2D dans ce repère : $t(x,y) = 1$ si $x \in [-a/(2); +a/2]$ et $y \in [-a/(2); +a/2]$, 0 sinon. Il s'agit de la transformée d'une fonction porte à deux dimensions.

On peut donc maintenant calculer l'amplitude complexe du champ électrique en un point M du plan de l'écran :

$$A_m(M) = TF(t(x,y)) = \iint_{-\infty}^{+\infty} t(x)e^{-i2\pi\mu x} e^{-i2\pi\nu y} dx dy \quad \text{avec } \mu = \frac{\sin(\theta_x)}{\lambda} \text{ et } \nu = \frac{\sin(\theta_y)}{\lambda}$$

Le calcul de cette transformée de Fourier conduit à une fonction sinus cardinal à deux dimensions :

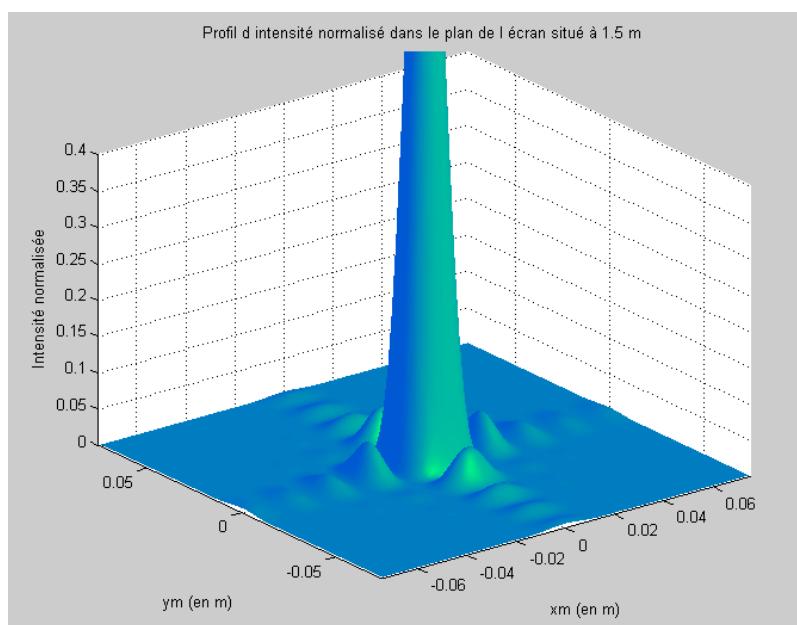
$$A_m(M) = C \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi a \sin(\theta_x)}{\lambda}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi a \sin(\theta_y)}{\lambda}\right)$$

La figure observée sur un écran situé à une grande distance du plan contenant le trou est donc composée d'une tache centrale lumineuse et d'une succession de tâches moins lumineuses réparties selon deux axes parallèles aux côtés des carrés.

L'intensité lumineuse reçue dans le plan de l'écran est alors proportionnelle à $A_m^2(M)$, soit à :

$$\operatorname{sinc}^2\left(\frac{\pi a \sin(\theta_x)}{\lambda}\right) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\pi a \sin(\theta_y)}{\lambda}\right)$$

En connaissant la fonction pupillaire d'un objet diffractant, on peut donc retrouver le profil d'intensité à partir de la transformée de Fourier de la fonction pupillaire élevée au carré.



Profil d'intensité sur un écran situé à 1,5 m d'un laser à 532 nm pour un carré de côtés 50 μm.

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.