

TP : Diffraction laser avec le logiciel Ovisio (202771)

Le but de ce TP est d'apporter un complément au TP diffraction au laser en utilisant une caméra numérique. Il permettra, à l'aide du logiciel Ovisio, d'observer les figures de diffractions par un fil et par une fente. De plus, ce TP propose d'aller plus loin dans l'observation du phénomène de diffraction en proposant d'étudier les figures de diffraction données par deux fentes (dispositif des fentes d'Young), des fentes multiples, des trous circulaires ou encore carrés.

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. 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, à l'aide de la caméra numérique et du logiciel Ovisio, certaines grandeurs du montage.

RAPPELS THEORIQUES

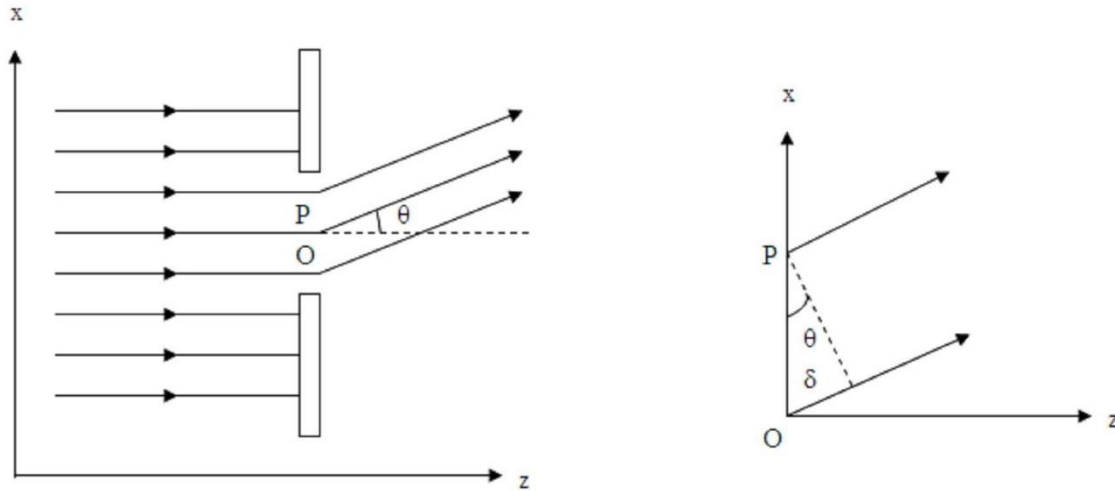
Pour expliquer le phénomène de diffraction, on fait appel à l'optique ondulatoire. On considère une source ponctuelle, monochromatique, émettant un champ électrique plan (c'est le cas par exemple du champ émis par une source laser). On considère le faisceau émis comme étant cylindrique.

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 eue 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 (μ M) sont considérées comme parallèles et faisant un angle ' θ ' avec l'axe Oz.



La différence de marche 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 $\text{sinc}^2\left(\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}\right)$ ou

sinc est la fonction définie par $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$.

x_m coordonnée du point d'observation sur l'écran dans la direction de la largeur de la fente.

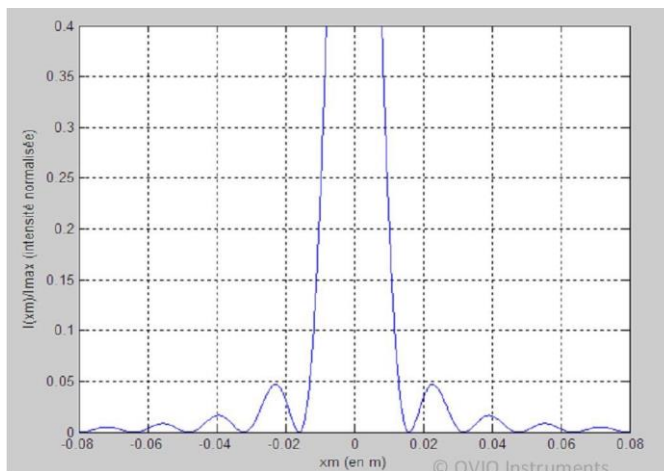
Pour un angle θ suffisamment petit et une distance D suffisamment grande, on peut faire l'approximation $\sin(\theta) = \frac{x_m}{D}$

On obtient finalement que l'intensité dans le plan de l'écran et selon la direction de la largeur 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

$$(\pi a x_m)/\lambda D = k\pi \text{ d'où } x_m = k \lambda D/a \text{ (avec k entier)}$$

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 :

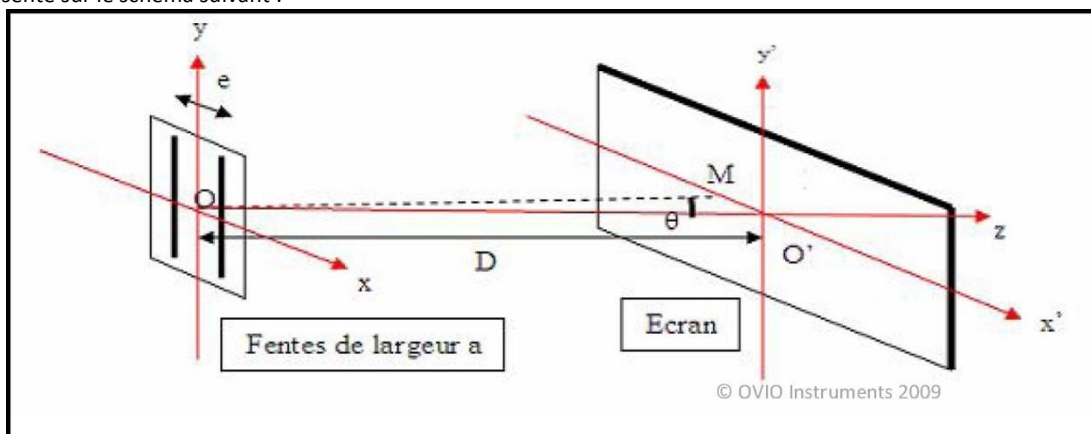


Profil d'intensité théorique de la figure de diffraction à une distance $D=1,5m$, pour une longueur d'onde incidente de $532nm$ et une fente de largeur $a=50\mu m$

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 dirigées selon la largeur de la fente (axe Ox). La zone centrale est de largeur $\frac{2\lambda D}{a}$ et les autres sont deux fois plus petites.

- 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 'A₁' du champ électrique émis par la fente est

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

et celui 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

$u = x + \frac{e}{2}$ pour calculer 'A₁' et $u = x - \frac{e}{2}$ pour calculer 'A₂', on obtient finalement

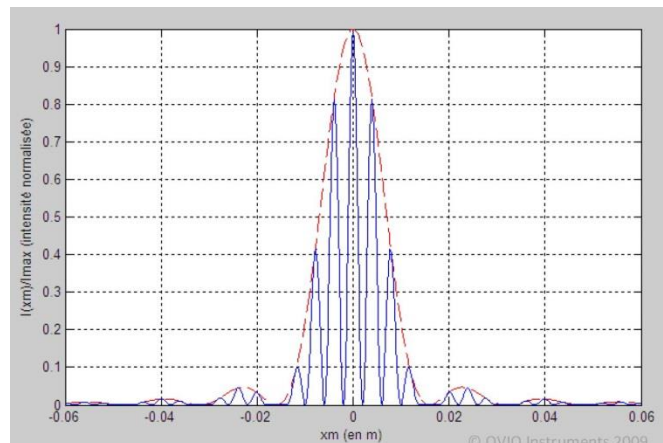
$$\begin{aligned} A(M) &= \left(e^{i \frac{\pi \sin(\theta) e}{\lambda}} + e^{-i \frac{\pi \sin(\theta) e}{\lambda}} \right) \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} A e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta) u} du \\ &= \cos\left(\frac{\pi \sin(\theta) e}{\lambda}\right) \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} A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

On remarque que l'intégrale est la même que celle donnant l'amplitude du champ électrique obtenu 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

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

Le profil d'intensité normalisée prend donc la forme suivante (dans le cas où l'écran est à 1m50 des fentes et avec des fentes de largeur 50μm, espacées de 200μm) :



Profil d'intensité théorique de la figure de diffraction à une distance D=1,5m, pour une longueur d'onde incidente de 532nm et deux fentes de largeur a=40μm espacées de e=100μm

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

Cette enveloppe, dans le cas d'une diffraction par deux fentes, est modulée par le terme d'interférence

$\cos\left(\frac{\pi \sin(\theta)e}{\lambda}\right)$ qui dépend de la distance 'e' entre les deux fentes.

En supposant que θ est faible, on peut faire l'approximation $\sin \theta = \frac{x_m}{D}$ où x_m est la coordonnée du point M sur l'écran selon l'axe O'x'.

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

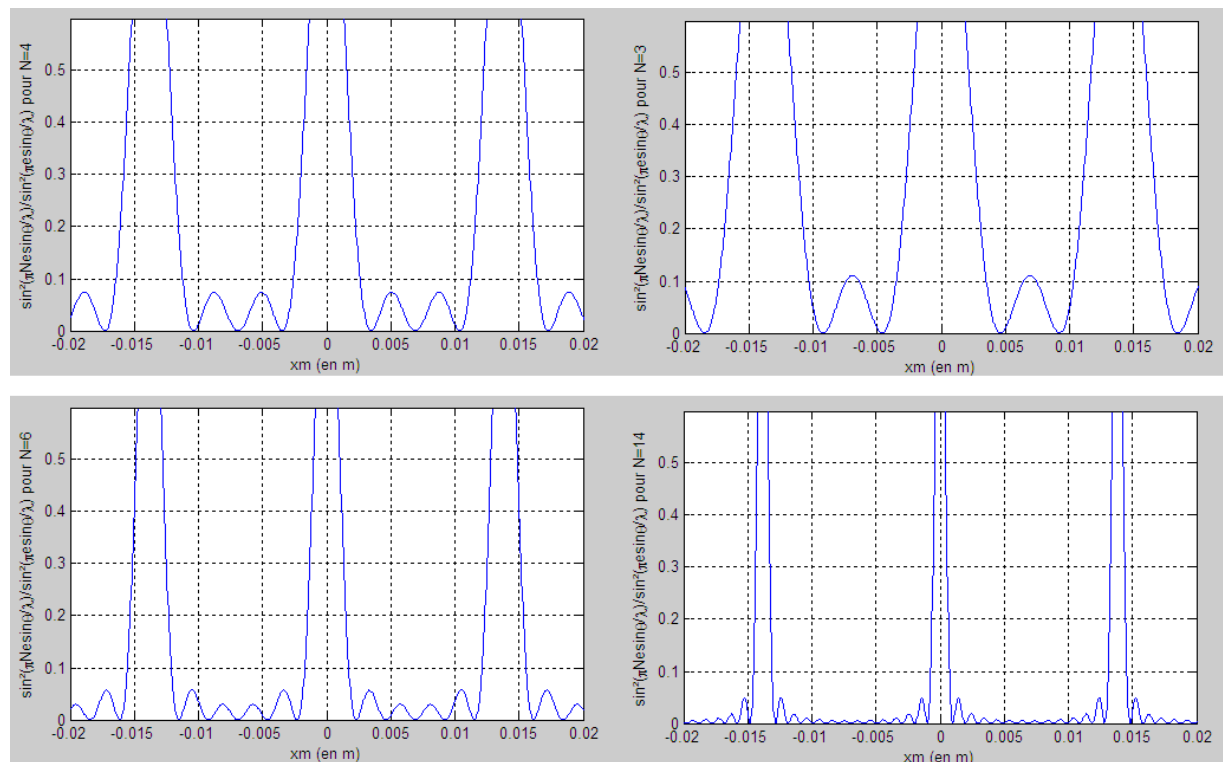
- Diffraction par un système de fentes multiples

Le principe peut être généralisé à un système 'N' fentes identiques, de largeur 'a' et dont deux fentes

successives sont espacées de 'e'. Le profil d'intensité est donné par une fente est alors multiplié par le terme

$\left(\frac{\sin\left(\frac{\pi N e \sin \theta}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{\pi e \sin \theta}{\lambda}\right)}\right)^2$ (Terme d'interférences). Ce terme est maximum lorsque $\frac{N e \sin \theta}{\lambda}$ est entier et il vaut N^2

Voici l'allure du terme d'interférences normalisé pour $N = 3, 4, 6$ et 14



Le profil d'intensité obtenu lors de la diffraction par une fente sera modulé par ce terme. La distance entre deux maximums

successifs du terme $\left(\frac{\sin\left(\frac{\pi N e \sin \theta}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{\pi e \sin \theta}{\lambda}\right)}\right)^2$ est $\frac{\lambda D}{e}$ comme $e > a$, cette distance est inférieure à la largeur du pic central de la figure de diffraction obtenue avec une fente.

La position des pics principaux peut être calculée, en sachant qu'à cette position, $\frac{N e \sin \theta}{\lambda}$ est un entier.

- Diffraction par un trou circulaire

L'objet diffractant considéré jusqu'à maintenant était une fente. Or, ce n'est pas le seul objet diffractant possible (tout objet de faibles dimensions, c'est-à-dire comparable à la longueur d'onde de l'onde lumineuse, peut potentiellement servir d'objet diffractant). La figure de diffraction obtenue est alors différente de celle observée dans le cas de la diffraction par une fente.

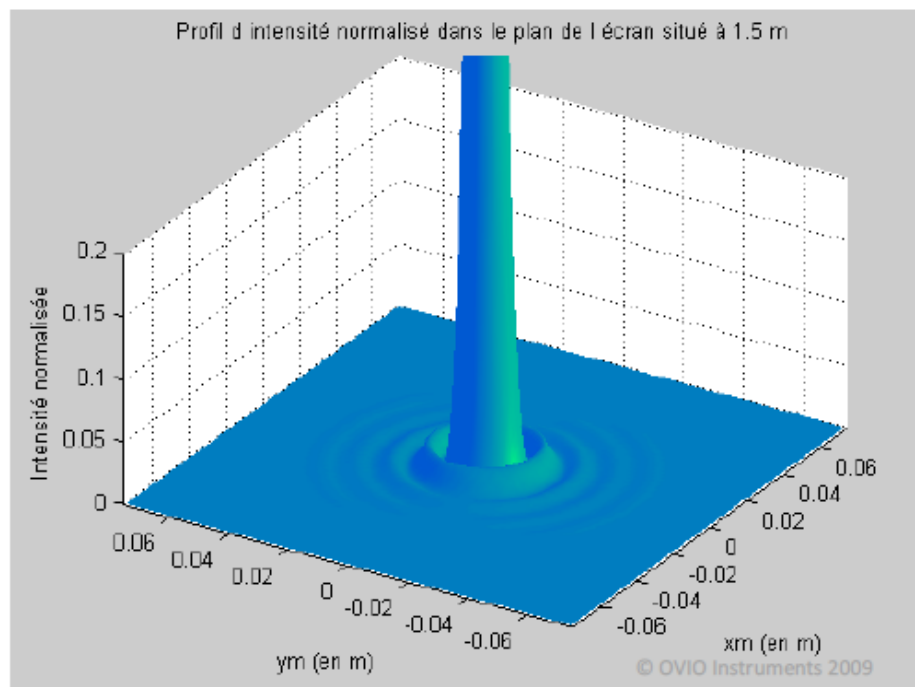
On peut par exemple diffracter la lumière émise par le laser à l'aide d'un trou de faible diamètre. Dans ce cas, le calcul de l'amplitude complexe du champ électrique incident dans plan de l'écran devient plus compliqué mais le principe reste le même. Cette fois ci, il faut raisonner en deux dimensions : 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

$$J_1\left(\frac{2\pi R \sqrt{x_m^2 + y_m^2}}{D\lambda}\right) \text{ ou } J_1 \text{ est une fonction de Bessel d'ordre 1.}$$

Et R est le rayon du trou circulaire.

La forme du profil est la suivante :



Profil d'intensité théorique de la figure de diffraction à une distance $D=1,3m$, pour une longueur d'onde incidente de $532nm$ et deux fentes de largeur $a=40\mu m$ espacées de $e=100\mu m$

On observe un pic d'intensité (centré sur l'intersection de l'axe Oz avec le plan de l'écran), puis des cercles pour lesquels on peut observer des maximums locaux d'intensité (qui sont d'autant moins importants qu'on s'éloigne du pic central). La figure de diffraction alors observée est donc constituée d'une tache centrale lumineuse, puis 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 :

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

MATERIEL UTILISE DURANT CE TP

- > Banc optique de 2m de longueur
- > Un laser vert de puissance 1mW
- > Un cavalier à réglage latéral
- > Un porte-composant à barillet
- > 4 jetons comportant divers objets diffractant
- > Un cavalier à réglage vertical
- > Un écran métallique gradué
- > Un cavalier long
- > Une caméra type Ovisio

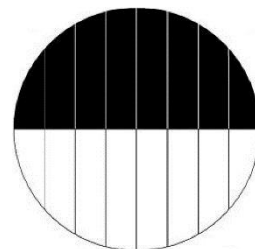


➤ Manipulation 1 : Premières observations sur le phénomène de diffraction.

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



- Dans le barillet, placer les quatre jetons proposés. Pour cela, dévisser complètement, dans chacun des emplacements prévus pour les jetons, la bague permettant de maintenir le jeton dans le barillet. Insérer les jetons dans les emplacements prévus puis les fixer en vissant la bague dans l'emplacement. Placer le jeton contenant les fentes et les fils dans l'emplacement supérieur du barillet (le jeton se divise en deux parties : la partie la plus sombre pour les fentes et la partie la plus claire pour les fils). L'orienter de manière à ce que fentes et fils soient verticaux.

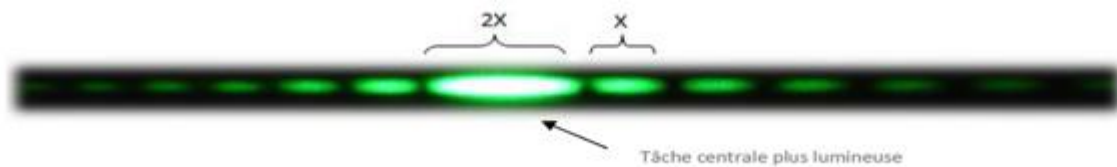


→ Placer la source laser à une extrémité du banc optique sur le cavalier réglable latéralement, le barillet sur le cavalier réglable verticalement au centre et l'écran gradué à l'autre extrémité du banc. Eclairer avec la source laser la fente centrale du jeton et former la figure de diffraction du faisceau laser par cette fente sur l'écran. Voir montage ci-dessus.



- 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).



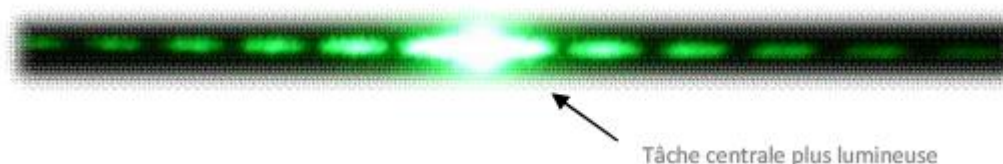
Une partie du faisceau laser incident est réfléchi par la surface métallique (fils et contour des fentes) du jeton tandis que le reste est transmis. Cette partie du faisceau peut être observée en plaçant devant la source l'écran métallique percé.

- Qu'observe-t-on alors sur l'écran percé ?

On remarque que la lumière réfléchi a aussi été diffractée par la fente. On observe, de la même manière que pour le faisceau transmis, une succession de tâches lumineuses dont les caractéristiques sont identiques à celles décrites précédemment. La seule différence notable est le fait que la tâche centrale soit plus lumineuse que dans le cas de la diffraction par une fente. Cela est dû à la légère réflexion sur le verre de la partie du faisceau qui n'éclaire pas la fente.

→ 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 non percé et la comparer avec celle obtenue en transmission (c'est-à-dire sur l'écran non percé) 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). 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.

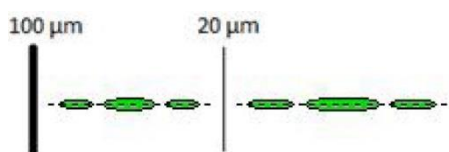
→ Observer maintenant sur l'écran percé le faisceau réfléchi par le jeton.

- Quelle observation pouvez-vous faire ? Faire le lien avec la manipulation précédente.

On voit apparaître sur l'écran une figure de diffraction qui correspond exactement à celle observée en transmission avec la fente. Le faisceau diffracté par une fente du jeton est identique au faisceau réfléchi diffracté par un fil du jeton.

→ Observer maintenant sur l'écran non percé 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 incidente, 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 $d = \frac{2D\lambda}{a}$ où D est la distance entre la fente et l'écran, a la largeur de la fente et λ la longueur d'onde de l'onde électromagnétique incidente. On se propose, grâce à cette relation, de faire une première estimation de la longueur d'onde du laser.

→ Retirer l'écran percé et placer le barillet contenant les jetons à une dizaine de centimètres de la source laser. Placer ensuite l'écran non percé à 1m30 du barillet. Former sur cet écran la figure de diffraction obtenue avec la fente centrale du jeton.

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 tâche centrale est $d=17\text{mm}$ à une distance D de 1m30. L'incertitude sur la mesure de d est estimée à 2mm (au mieux 1mm) 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 négligeable).

On a donc $d = 17 \pm 1\text{mm}$.

L'incertitude sur la distance D peut être estimée à 1mm.

Comme $\lambda = \frac{da}{2D} \approx 5,23 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, l'incertitude de λ est

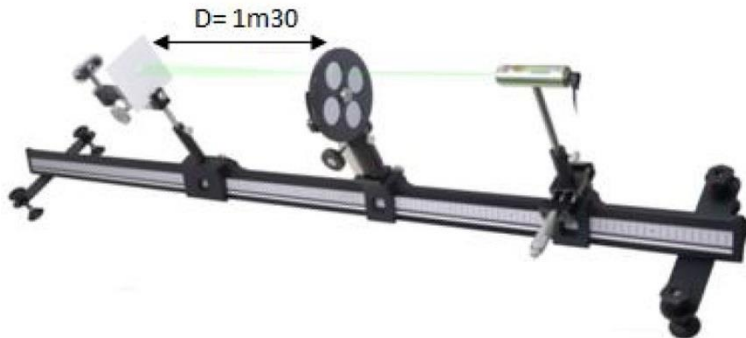
$$\Delta\lambda = \frac{a}{2D} \Delta d + \frac{d}{2D} \Delta a + \frac{da}{2D^2} \Delta D \approx 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

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

DETERMINATION DE λ AVEC LA FENTE DE 80µm	
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)	$1 \cdot 10^{-6}$
Diamètre d (en m)	$1,70 \cdot 10^{-2}$
Incrtitude sur λ (en m)	$1 \cdot 10^{-8}$
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%

➤ **Manipulation 2 : Prise en main du logiciel Ovisio : observation de la diffraction par une fente**

→ Sans allumer la source laser, placer sur le banc optique, le barillet contenant les jetons sur le cavalier réglable verticalement puis placer l'ensemble sur le banc, à une distance assez faible de la source laser. Placer ensuite la caméra sur le support prévu à cet effet et placer le tout sur le cavalier long.

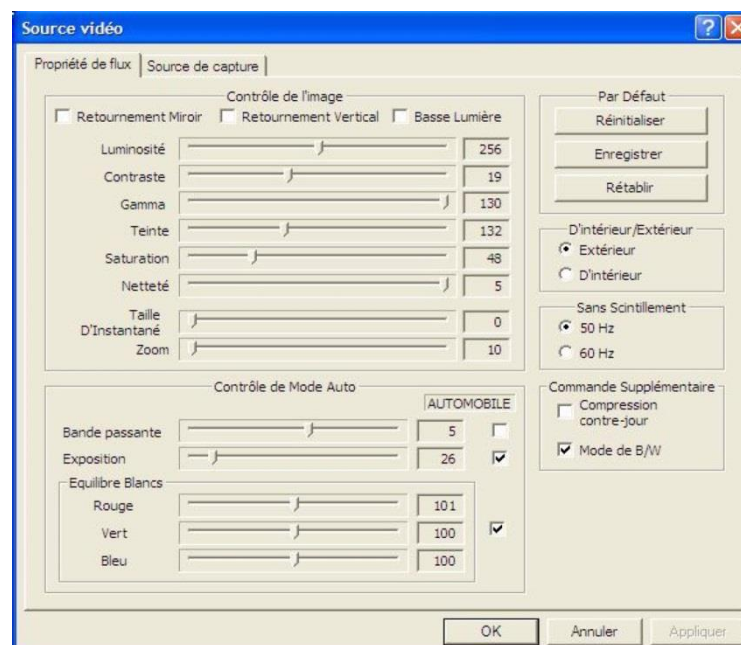


La première étape consiste à étalonner la caméra de manière à pouvoir par la suite faire des mesures de distances sur les figures de diffraction à l'aide du logiciel Ovisio. Pour cela :

→ Placer l'écran possédant 4 carrés noirs à la place de l'écran blanc comme sur la photo ci-jointe sur le support contenant déjà la caméra (l'écran doit être situé sur le système d'écartement réglable). Régler la distance entre le laser et l'ensemble caméra/écran de manière à ce que la distance entre la source et l'écran soit de 1m30.



→ Brancher la caméra au port USB de l'ordinateur et lancer le logiciel Ovisio. Quelques secondes sont nécessaires au logiciel pour configurer la caméra numérique. Une fois la configuration terminée, deux fenêtres apparaissent : la fenêtre « vidéo » montre l'image filmée par la caméra et la fenêtre « profils et mesures » permet d'afficher l'intensité détectée par la caméra selon un axe préalablement choisi (nous aborderons ce point dans la suite du TP). Cliquez sur la fenêtre « vidéo » pour que celle-ci soit active cliquez sur l'onglet réglages puis source. La fenêtre suivante s'affiche :



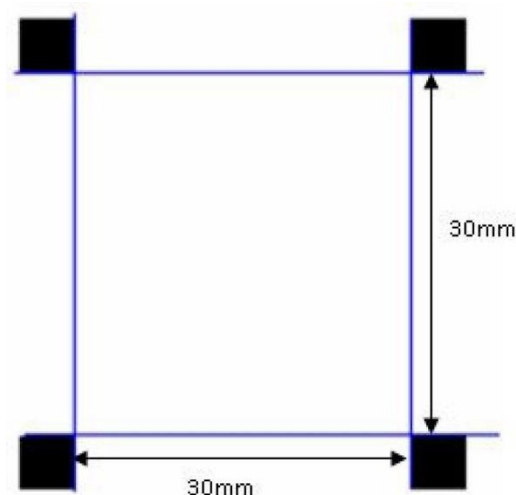
Celle-ci permet de régler les paramètres de la caméra. Vérifier que les paramètres affichés correspondent à ceux que vous pouvez voir sur la figure précédente.

Une fois ces paramètres entrés, il faut étalonner la caméra pour pouvoir effectuer des mesures de distance. Pour ce faire, nous allons utiliser l'image de l'écran possédant quatre carrés noirs.

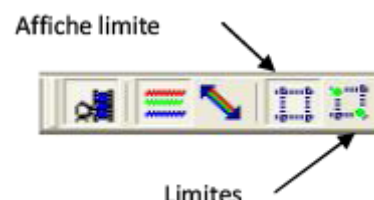
- Observer l'image de l'écran donnée par le logiciel et repérer les quatre carrés noirs. Si besoin, régler la distance entre la caméra et l'écran pour améliorer la netteté de l'image (pour améliorer la netteté, on peut aussi tourner l'objectif de la caméra).

La distance entre deux carrés noirs situés sur un même côté est de 3cm.

- Dans la barre d'outils, cliquez sur l'icône « affiche limite » pour afficher deux traits horizontaux et deux traits verticaux. A l'aide des boutons gauche et droit de la souris, déplacer les repères de manière à obtenir le résultat de la figure située à droite. Ensuite, cliquez sur le menu outil puis calibrage. La fenêtre affichée vous permet d'entrer la distance entre les repères que vous venez de placer. Entrez en mm la distance entre les repères horizontaux puis celle entre les repères verticaux (qui sont de 30 mm).



Une fois le calibrage terminé, décoché l'option « limites » en cliquant une nouvelle fois sur l'icône



- Maintenant que le calibrage est effectué, vous pouvez mettre en marche le laser. Remplacer l'écran possédant les carrés par l'écran blanc puis effectuez la diffraction de la source laser par la fente centrale du jeton contenant fentes et fils (le jeton se divise en deux parties : la partie la plus réfléchissante pour les fentes) de manière à ce que la figure de diffraction apparaisse sur l'écran blanc.

- Décrire la forme de la figure de diffraction obtenue. Est-ce cohérent avec la théorie ?

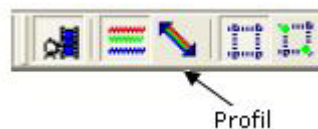
On observe dans la fenêtre vidéo du logiciel une tache blanche puis une série de taches secondaires alignées selon un axe :

Ces taches secondaires sont plus petites que la tache centrale et de moins en moins intense au fur et à mesure qu'elles sont loin de la tache centrale. L'orientation de la figure de diffraction dépend de celle de la fente. En observant plus attentivement, on peut noter que la direction de la figure de diffraction est orthogonale à celle de la fente. Cela s'explique par le fait que dans cette direction, l'objet diffractant est de faible dimension.

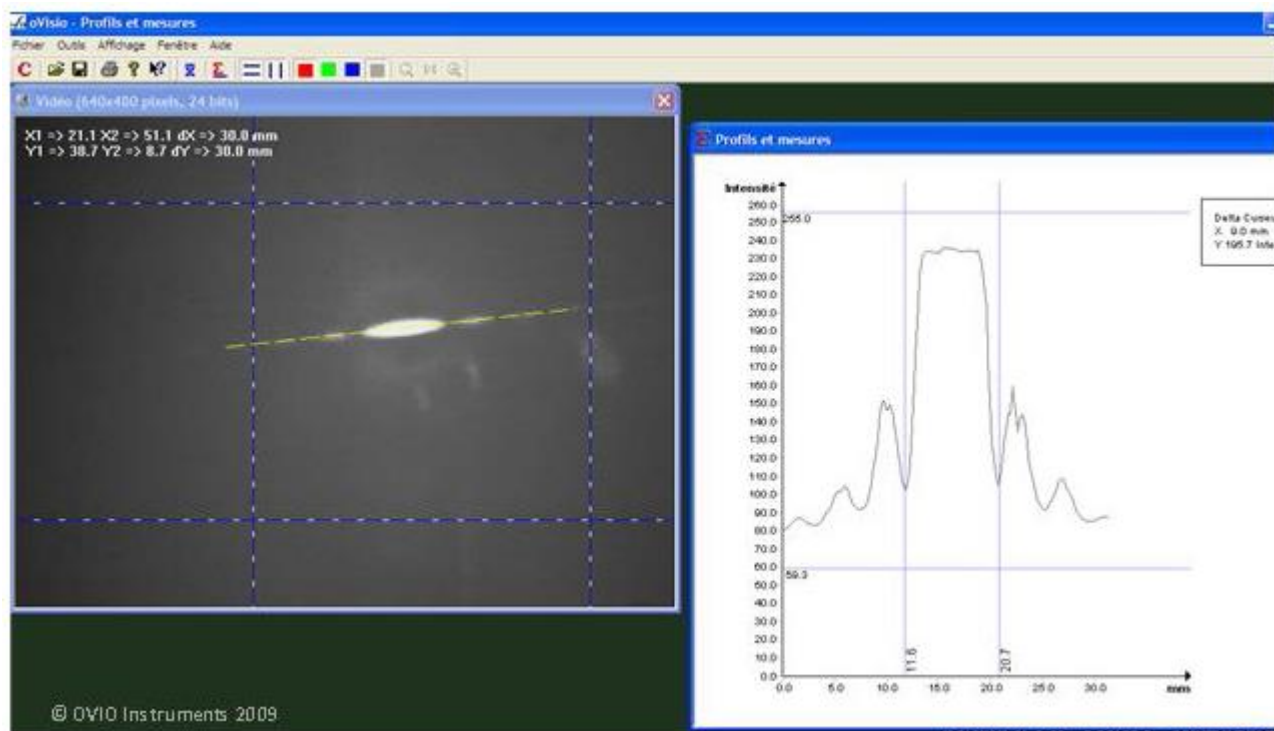


- Observer l'image donnée par la caméra. Il se peut que les taches de la figure de diffraction soient peu ou trop lumineuses. régler la luminosité des taches sur l'image, cliquer sur le menu réglage puis source. Modifier alors le paramètre « exposition » et regarder l'influence du paramètre sur l'image.

Une fois le paramètre réglé, il est alors possible de visualiser les variations d'intensité dans une direction particulière du plan de l'écran, choisie par l'utilisateur.



- Dans la barre d'outils, cliquez sur l'icône « profil » :



Cela permet l'affichage d'une ligne sur l'image fournie par la caméra.

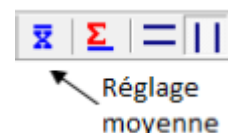
Cette ligne modélise l'axe d'observation du profil d'intensité.

- Pour modifier la position de cet axe, cliquer avec le bouton gauche et droit de la souris directement sur l'image pour positionner les extrémités. Le profil d'intensité s'affiche alors dans la fenêtre « profils et mesures ». Voici un exemple de ce qui peut être obtenu :

Un profil d'intensité correct doit posséder les minimums les plus faibles possibles et doit être symétrique par rapport au pic central. Si le profil d'intensité observé n'est pas stable, on peut augmenter la moyenne temporelle pour le stabiliser.

- Cliquer sur la fenêtre « profil et mesures » de manière à ce qu'elle devienne la fenêtre active.

Les menus et la barre d'outils sont alors modifiés. Cliquer ensuite sur



L'icône pour afficher la fenêtre permettant de régler la moyenne temporelle des valeurs du profil.

On remarque qu'on peut aussi régler la valeur de la moyenne spatiale, ce qui permet de plus ou moins filtrer les variations brutales d'intensité en fonction de la position sur l'axe.

On remarque sur la figure ci-dessus que les minimums d'intensité ne sont pas à 0. Cela est dû à la luminosité ambiante, qui est détectée par la caméra et donc augmente l'intensité détectée.

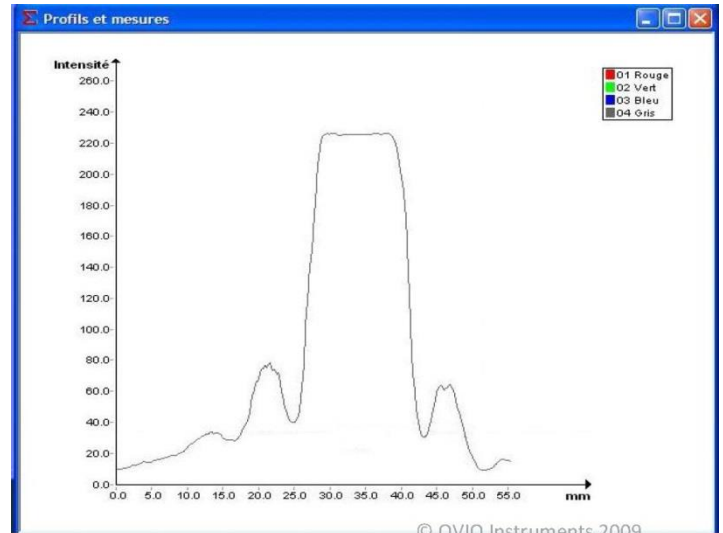
→ *Cliquer alors sur réglage puis sur source. Occulter le faisceau laser puis observer le niveau d'intensité du profil. Régler la luminosité de manière à ce que ce niveau soit proche de 0.*

- **Commenter le profil d'intensité obtenu. Quelle forme prend-il ? Quelle remarque pouvez-vous faire sur le pic central ?**

En réglant le logiciel de la manière précisée ci-dessus, on obtient un profil d'intensité de la forme suivante :

Il s'agit bien d'une fonction de type sinus cardinal comme il est décrit dans la partie théorique : on observe un pic central de forte intensité et assez large et des pics secondaires, moins intenses et moins large. On remarque que seule la première paire de taches secondaires est facilement observable (la seconde paire se devine sur le profil).

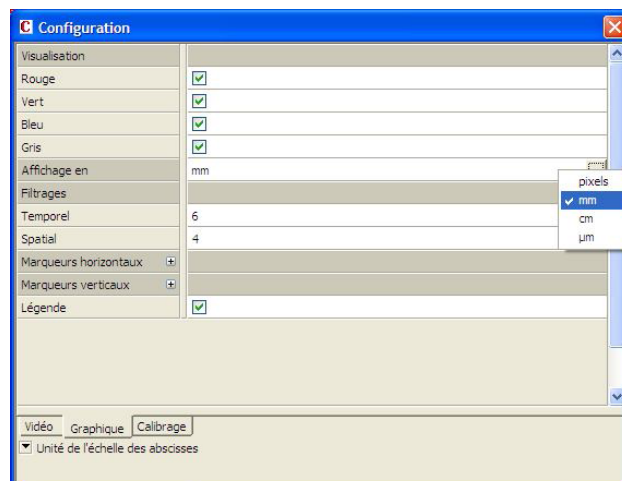
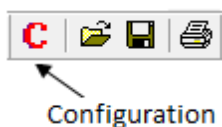
On peut remarquer que le pic central est écrêté : cela est dû à la saturation de la caméra. La différence d'intensité entre le pic central et les premiers pics secondaires est trop importante pour pouvoir les observer simultanément.



Nous allons maintenant estimer la valeur de la longueur d'onde du laser à partir de l'image fournie par la caméra. La relation entre la largeur 'a' de la fente (qui est pour la fente centrale de 80µm), la distance D entre la fente et l'écran, le diamètre 'd' de la tache centrale et la longueur d'onde λ est $\lambda = \frac{da}{2D}$ est λ .

En estimant la valeur de d, on peut donc en déduire une estimation de la valeur de λ . L'outil de mesure du logiciel Ovisio permet une estimation de 'd'. Pour cela :

→ *Il faut tout d'abord choisir la bonne unité pour l'axe des abscisses du profil d'intensité, qui est par défaut en pixel. Pour cela, cliquer sur la fenêtre « profils et mesures » pour que cette dernière devienne la fenêtre active, puis cliquer sur l'icône configuration de la barre d'outils. La fenêtre configuration s'affiche. Cliquer sur l'onglet graphique. Vérifier que l'unité indiquée dans le menu « affichage en » (qui est l'unité de l'axe des abscisses du profil d'intensité) est bien le mm. Si ce n'est pas le cas, modifier l'unité.*



Pour effectuer une mesure de distance :

→ **Cliquer sur l'icône sigma puis cliquer sur le début de la zone à mesurer et déplacer horizontalement le curseur jusqu'à l'endroit voulu. La distance mesurée s'affiche alors.**

Une seconde manière de mesurer le diamètre des anneaux sombre est d'agrandir la fenêtre profil et d'utiliser les curseurs proposés dans le logiciel. Cliquer sur l'icône marqueurs verticaux pour afficher deux lignes horizontales bleues sur le profil d'intensité : celles-ci peuvent être déplacées à l'endroit voulu sur le profil. La distance entre les deux axes s'affiche alors dans le cadre delta curseur, figurant en haut à droite de la fenêtre.

- **Mesurer sur le profil d'intensité la largeur du pic central (qui correspond à la largeur de la tache centrale de la figure de diffraction). En déduire une estimation de la longueur d'onde du laser, accompagnée d'un calcul d'incertitude. Pour une bonne estimation de l'incertitude sur la mesure de 'd', il faut prendre en compte l'incertitude liée à la mesure elle-même et l'incertitude liée au calibrage. En comparant ces deux dernières, conclure sur l'importance du calibrage. On prendra aussi en compte l'incertitude sur D et celle sur a, comme dans la manipulation précédente. Commenter l'incertitude sur λ obtenue : la comparer avec celle obtenue lors de la manipulation sans l'Ovisio.**

A l'aide du logiciel, on peut mesurer sur le profil d'intensité la largeur 'd' du pic central. Cette mesure est effectuée avec une incertitude de 0,5mm, due au positionnement du curseur sur le profil d'intensité. On mesure une largeur 'd' de 18,2mm.

A l'aide de la relation $\lambda = \frac{da}{2D}$ On peut donner une estimation de la longueur d'onde de la source laser : on obtient $\lambda = 538\text{nm}$.

Pour calculer l'incertitude sur λ , on utilise l'équation $\Delta\lambda = \frac{a}{2D} \Delta d + \frac{d}{2D} \Delta a + \frac{da}{2D^2} \Delta d$

L'incertitude liée à l'appréciation de 'd' par l'observateur (on prendra 0,2mm). Ensuite, il faut calculer l'incertitude liée au calibrage. Pour cela, on prend deux positions limites du calibrage pour lesquelles le calibrage est considéré comme juste. On mesure la valeur minimale p_{\min} et maximale p_{\max} du nombre de pixels séparant deux axes verticaux ou horizontaux (on admet que le résultat est le même dans les deux directions).

L'incertitude sur d liée à la calibration est donné par la relation $\frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\max}} \times 30 \cdot 10^{-3} \approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ (généralement entre 0.5 et 0.9mm)

On obtient au final $\lambda = 540 \pm 30\text{nm}$.

L'incertitude sur la mesure reste assez élevée mais est plus faible qu'avec une mesure directe (environ 40 nm). Cela est dû au procédé d'estimation de la longueur d'onde avec une mesure unique.

Dans cette manipulation, on voit que la principale source d'incertitude sur 'd' vient de l'incertitude sur le calibrage, d'où l'importance de procéder à un calibrage minutieux.

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.



→ **Tourner le barillet afin de changer de fente de diffraction : 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 des taches 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 tache centrale et les taches secondaires sont plus larges qu'avec la fente de 80μm utilisée dans la manipulation précédente. De même, le profil d'intensité est spatialement plus étendu et les pics d'intensités sont plus large. La largeur de la tache centrale semble donc bien inversement proportionnelle à la largeur de la fente.

→ **Effectuer les réglages nécessaires pour pouvoir observer plusieurs ordres de la figure de diffraction et afficher alors le profil d'intensité. Remarque : l'observation de plusieurs ordres n'est pas toujours possible.**

- **Mesurer sur le profil d'intensité 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 $d = \frac{2l}{N+1}$ où N est le nombre de pics pris en compte dans la mesure. Sachant que les fentes ont pour largeur 30μm, 40μm, 60μm, 80μm, 100μm, 150μm et 200μm, 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 T de plusieurs pics sur le profil d'intensité obtenus avec les différentes fentes donne les résultats suivants :

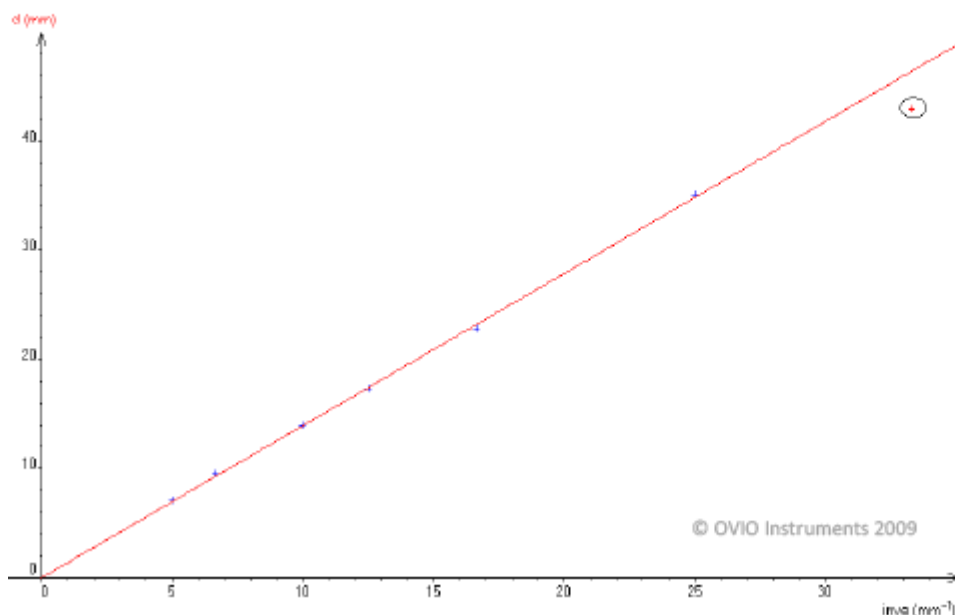
Expérience fentes à 1m30		Fente 1	Fente 2	Fente 3	Fente 4	Fente 5	Fente 6	Fente 7
	Distance D	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
	Largeur a de la fente	3,00.10 ⁻⁵	4,00.10 ⁻⁵	6,00.10 ⁻⁵	8,00.10 ⁻⁵	1,00.10 ⁻⁴	1,50.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴
	Largeur 'l' de N taches	4,29.10 ⁻²	3,51.10 ⁻²	2,28.10 ⁻²	3,46.10 ⁻²	3,50.10 ⁻²	3,32.10 ⁻²	3,88.10 ⁻²
	Nombre taches	1	1	1	3	4	6	10
	Diamètre tache 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 tache centrale à partir de la relation $d = \frac{2l}{N+1}$

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 30μm 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 : la tache centrale prend le champ de la caméra en entier et les minima d'intensité autour de la tache centrale ne sont pas tout à fait visibles.

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

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 lambda (en nm)	8

On obtient $\lambda = (535 \pm 8)$ nm. Cette méthode de mesure est plus précise que la précédente car elle prend en compte plusieurs mesures, ce qui permet de compenser les erreurs « aléatoires » de mesure. De plus, le résultat obtenu est plus fiable (d'incertitude plus faible) 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 $\Delta d/d$, ce qui limite l'incertitude relative et donc l'incertitude sur l'estimation de λ .

➤ Manipulation 3 : Dispositif des fentes d'Young

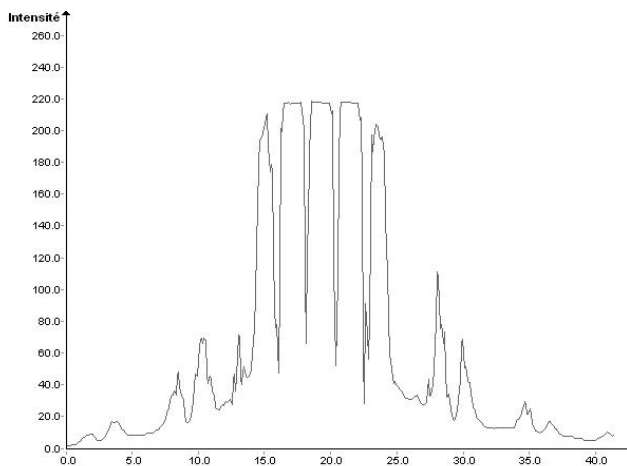
Nous avons jusqu'à présent observé le phénomène de diffraction par une fente. Nous allons dans cette partie nous intéresser à la diffraction d'un même faisceau monochromatique par deux fentes. Il se produit, en plus de la simple diffraction du faisceau, un phénomène d'interférences. Le profil d'intensité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

➔ *Tourner le barillet de manière à ce que le jeton contenant trois paires de fentes (jeton réfléchissant possédant trois bandes moins réfléchissantes) soit en haut du barillet. Placer l'ensemble écran/caméra à environ 80cm du barillet. 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, tourner légèrement le laser dans son socle de manière à dévier le faisceau dans la direction voulue pour former l'image au centre de l'écran. La figure d'interférence n'est alors plus visible. Tourner alors le barillet de manière à éclairer à nouveau les deux fentes de manière à observer de nouveau les interférences. Si la figure n'est toujours pas à l'endroit souhaitée, recommencer la procédure.*



- **Effectuer les réglages nécessaires pour observer convenablement la figure avec le logiciel. Décrire alors 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.**

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 fentes soient temporellement cohérente (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).

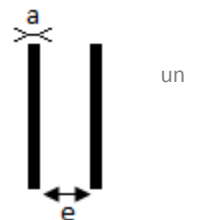


- **Tracer le profil d'intensité de la figure d'interférence. Décrire ce profil : en particulier, identifier sur ce profil l'effet produit par la diffraction par une fente et l'effet produit par l'interférence entre les faisceaux transmis par les deux fentes**

Le profil observé est de la forme suivante :

Le profil d'intensité possède une grande succession de pics d'intensité. On peut cependant observer une enveloppe similaire au profil d'intensité obtenu lors de la diffraction par une fente. On peut identifier un pic central zébré, deux pics secondaires (eux aussi modulés en amplitude) de part et d'autre de ce pic central. On peut de plus remarquer effet de saturation de la caméra sur le pic central.

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 dû à la présence d'interférences entre les deux ondes émises par chacune des fentes.



Deux paramètres importants intervenant dans l'allure de la figure obtenue avec deux fentes sont la largeur ' a ' des fentes et la distance ' e ' entre deux fentes

- **Tourner le barillet de façon à observer la figure obtenue avec les deux fentes centrale du jeton. On notera que 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. Comparer la figure avec celle obtenue avec les deux fentes précédentes.**

- Quelle est l'influence de la modification de la distance entre les deux fentes sur le profil d'intensité ?

Déduire de l'observation précédente et des rappels théoriques, une méthode pour déterminer la distance entre les deux fentes à partir du profil d'intensité et l'appliquer pour les trois paires de fentes (pour plus de facilité, commencer par les fentes les moins espacées et conserver le réglage pour les deux autres paires de fentes). On précise que la longueur d'onde de la radiation émise par le laser est 532nm.

Remarque : pour obtenir un profil d'intensité exploitable pour cette question, privilégier une exposition faible de manière à pouvoir distinguer les franges d'interférence à l'intérieur de la tache centrale. Il n'est pas nécessaire ici d'observer les taches secondaires.

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. L'écart entre deux franges (sombres ou brillantes) successives diminue lorsque la distance entre les fentes augmente.

Si on change de pair de fentes, on remarque que la forme globale de la figure observée reste la même. La seule différence remarquable est une modification de la taille des franges observée (l'enveloppe quant à elle ne semble pas être modifiée) : plus les fentes sont éloignées l'une de l'autre, plus les franges d'interférence observées sont fines. On peut en déduire une dépendance entre la largeur des franges d'interférence et la distance 'e' entre les fentes. Cette augmentation de distance 'e' se traduit sur le profil d'intensité par une diminution de la largeur des pics dus aux interférences.

D'après les rappels théoriques, les interférences sont dues au terme $\cos^2\left(\frac{\pi e x_m}{\lambda D}\right)$.

Pour calculer l'interfrange, on cherche les valeurs pour lesquelles ce terme s'annule : on trouve alors $x_m = \frac{\lambda D (2k+1)}{2e}$, avec k un entier relatif.

L'écart entre deux valeurs successives pour lesquelles le terme $\cos^2\left(\frac{\pi e x_m}{\lambda D}\right)$ s'annule définit l'interfrange 'i'.

On en déduit $i = x_m(k+1) - x_m(k) = \frac{\lambda D}{e}$.

Donc, en mesurant plusieurs interfranges sur le profil d'intensité, on peut en déduire la distance 'e' entre les deux fentes.

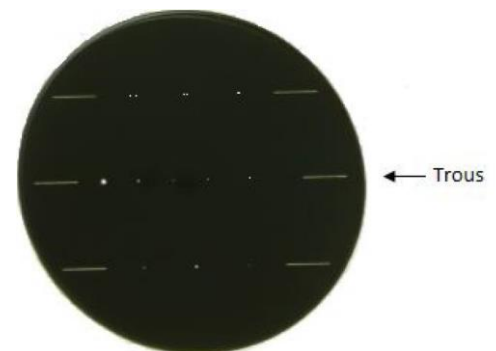
On trouve les résultats suivants :

Nombre d'interfranges	Largeur des interfranges	Distance D	Lambda	Valeur de e	Valeur réelle	Écart relatif
3	$6,80 \cdot 10^{-3}$	0,8	$5,36 \cdot 10^{-7}$	$1,89 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$	5,4%
5	$7,50 \cdot 10^{-3}$	0,8	$5,36 \cdot 10^{-7}$	$2,86 \cdot 10^{-4}$	$3,00 \cdot 10^{-4}$	4,7%
10	$8,50 \cdot 10^{-3}$	0,8	$5,36 \cdot 10^{-7}$	$5,04 \cdot 10^{-4}$	$5,00 \cdot 10^{-4}$	0,9%

➤ Manipulation 4 : Diffraction par un trou de faible diamètre

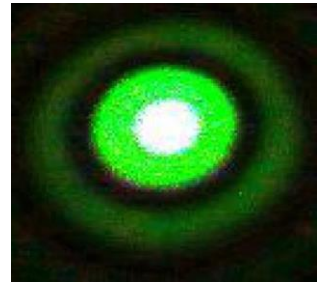
Dans cette manipulation, on se propose de caractériser la figure de diffraction obtenue avec un trou de diamètre a. Comme il est mentionné dans la partie théorique, la figure de diffraction obtenue avec un trou circulaire est une tache centrale circulaire entourée d'une succession d'anneaux concentriques dont l'intensité décroît au fur et à mesure que le rayon des cercles augmente.

➔ Tourner le barillet de manière à ce que le jeton contenant les trous soit en haut du barillet. 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. Remplacer l'écran blanc par l'écran possédant les carrés et placer l'ensemble écran caméra à environ 1m du barillet.



- **Décrire la figure de diffraction observée. A quel problème avez-vous été confronté pour l'observation de cette figure de diffraction.**

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 rendue difficile par le fait que la tache centrale est tellement intense qu'il faut adopter un compromis : si on choisit une exposition assez grande pour pouvoir distinguer quelques ordres, la tache centrale est trop intense et la diffusion implique un recouvrement du premier anneau, qui n'est alors plus visible. Pour pouvoir séparer tache centrale et premier anneau, il faut une exposition faible : les anneaux d'ordre plus élevé ne sont alors plus visibles.



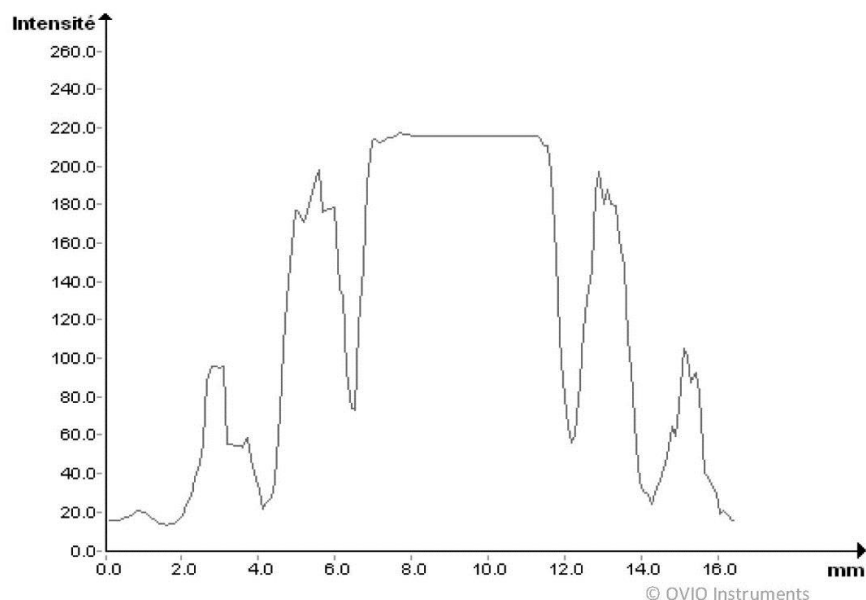
→ **Observer maintenant la figure obtenue avec le trou de diamètre directement inférieur.**

- **Commentez la modification de la figure obtenue. En particulier, sur quel(s) paramètre(s) influe la variation du diamètre du trou. Pourquoi est-il plus facile d'observer cette figure de diffraction que la précédente ?**

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.

- **Tracer pour ce trou la figure le profil d'intensité et en déduire une estimation du diamètre du trou.**

Le profil d'intensité obtenu selon un axe dirigé selon un diamètre de la tache centrale est de la forme suivante (pour $D=0,8\text{m}$) :



Le profil d'intensité possède un pic central, correspondant à la tache centrale de la figure de diffraction obtenue et des pics secondaires correspondant aux anneaux observés autour de la tache centrale (ici, on peut observer quatre pics, deux de chaque côté de la tâche principale).

Ce profil correspond bien à ce qui est attendu en théorie : on observe que le profil est identique si on considère un autre axe dirigé selon un diamètre de la tache centrale : le profil d'intensité en trois dimensions correspond donc bien à ce qui est présenté en théorie.

D'après la partie théorique, le diamètre 'd' de la tache centrale et le diamètre 'a' du trou sont reliés par la relation $d = 1,22 \frac{2D\lambda}{a}$.

Grâce à cette relation, on peut retrouver le diamètre du trou : On mesure $d=6,1$ mm à une distance $D=90$ cm.

On a alors $a = 1,22 \frac{2D\lambda}{d} \approx 192 \text{ } \mu\text{m}$.

L'incertitude sur cette mesure peut être estimée par la relation $\Delta a = 1,22 \frac{2\lambda}{a} \Delta D + 1,22 \frac{2\lambda D}{d^2} \Delta d \approx 30 \text{ } \mu\text{m}$.

Compte tenu de la méthode de mesure, il est normal d'obtenir une incertitude aussi élevée. La principale source d'incertitude est l'estimation de 'd' qui est entachée de l'erreur d'appréciation (qui dépend ici du calibrage, du réglage et de la lecture).

- ➔ Observer la figure de diffraction obtenue avec les autres trous. Pour faciliter la mesure, rapprocher l'ensemble écran/caméra du barillet.
- En choisissant une distance et des réglages adaptés, observer le profil d'intensité pour chaque trou et en déduire une mesure du diamètre des trous. Expliquer pourquoi les mesures pour les trous de faible diamètre sont entachées d'une telle incertitude.

On mesure pour les divers trous le diamètre de la tache centrale et on en déduit le diamètre des trous :

Distance D (en m)	Largeur tache centrale d (en m)	Longueur d'onde λ	Largeur trou expérimentale (en m)	Incrtitude (en m)	Incrtitude relative	Largeur trou réelle (en m)	Erreur
0,9	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$	$4,67 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$	40,1%	$5,00 \cdot 10^{-4}$	6,5%
0,9	$6,10 \cdot 10^{-3}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$3,16 \cdot 10^{-5}$	16,5%	$2,00 \cdot 10^{-4}$	4,2%
0,7	$8,60 \cdot 10^{-3}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-5}$	11,8%	$1,00 \cdot 10^{-4}$	5,7%
0,15	$4,60 \cdot 10^{-3}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$	$4,23 \cdot 10^{-5}$	$9,48 \cdot 10^{-6}$	22,4%	$5,00 \cdot 10^{-5}$	15,3%
0,08	$2,80 \cdot 10^{-3}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$	$3,71 \cdot 10^{-5}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$	37,0%	$3,00 \cdot 10^{-5}$	23,6%

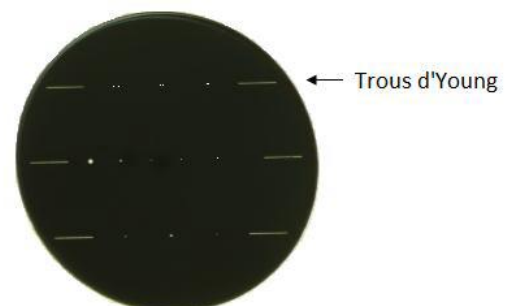
On remarque que pour les trous où la mesure du diamètre est faite à une distance pour laquelle la tache centrale est petite, l'incertitude est très élevée. On peut comparer les deux premières lignes du tableau pour lesquelles la mesure est faite à une même distance. Le diamètre de la tache centrale à mesurer est différent, ce qui explique l'écart d'incertitude relative : celle-ci est bien plus élevée pour la mesure effectuée sur le trou de plus grand diamètre. Cependant, il est difficile de palier à une incertitude relative élevée pour les petits trous car il faut être suffisamment près du trou pour effectuer la mesure, de manière à avoir une intensité suffisante. Cela implique un diamètre de tache centrale faible et donc une incertitude relative élevée.

➤ Manipulation 5 : Dispositif 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 μ m. 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'ensemble écran/caméra à une distance d'environ 30 cm du barillet.



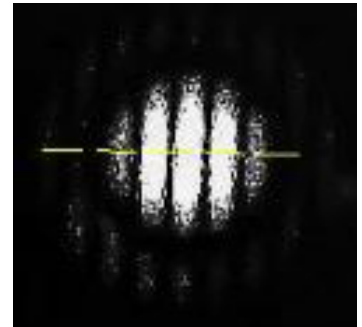
- **Observer à l'aide du logiciel la figure obtenue. Expliquez la forme de la figure en vous aidant de la figure de diffraction obtenue avec un trou et de la figure du dispositif des fentes d'Young. En faisant le lien avec le dispositif des fentes d'Young, deviner l'effet de la variation de la distance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

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 :

On observe que le profil d'intensité possède une enveloppe semblable au profil d'intensité observé avec un trou : cette enveloppe dépendra donc du diamètre des trous du dispositif.

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



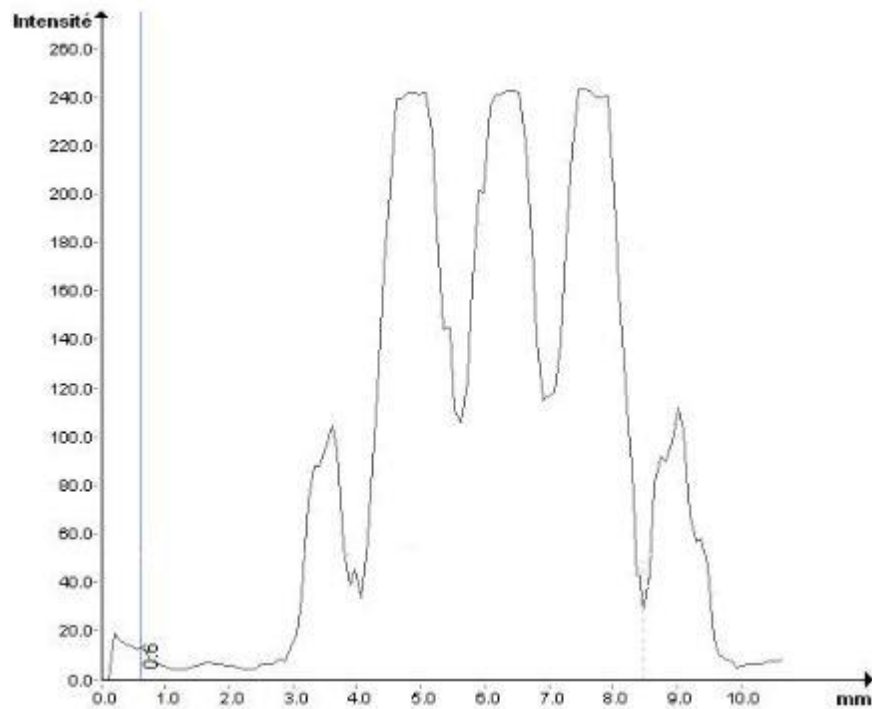
- Placer maintenant l'écran à 50cm du barillet. Régler le logiciel de manière à ce que l'image fournie permette de bien observer les franges sombres de la tache centrale, dues au phénomène d'interférences entre les figures de diffraction fournies par les deux trous (le premier anneau peut alors ne pas être visible).

- **Tracer à l'aide du logiciel le profil d'intensité de la tache centrale uniquement (il n'est pas nécessaire de distinguer les anneaux secondaires).**
En faisant l'analogie avec la manipulation fentes d'Young, donner une estimation de la distance entre les deux trous pour chacune des paires disponibles sur le jeton. Pour cela, mesurer à l'aide de cette figure la longueur de plusieurs interférences. Les distances réelles étant de 100µm, 200µm et 400µm, calculer l'erreur relative de chacune des mesures. Conclure sur la précision et la fiabilité de l'estimation de la distance entre les deux trous par cette méthode.

Dans le cas des fentes d'Young, l'interfrange était donné par la relation $i = \frac{\lambda D}{e}$. Nous pouvons utiliser cette relation pour déterminer la distance 'e' entre deux trous à partir de la mesure de la largeur 'l' de plusieurs interférences : pour N interférences, on a. Voici les résultats obtenus :

Distance D (en m)	λ (en m)	Nombre d'interfranges	Largeur des Interfranges (en m)	Ecart e calculé	Ecart e réel	Erreur
$5,00 \cdot 10^{-1}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$	3	$8,10 \cdot 10^{-3}$	$9,85 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	1,48%
$5,00 \cdot 10^{-1}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$	6	$8,00 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$	0,25%
$5,00 \cdot 10^{-1}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$	13	$8,80 \cdot 10^{-3}$	$3,93 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-4}$	1,76%

On obtient le profil d'intensité suivant :



Les mesures obtenues sont relativement correctes du fait que la mesure est effectuée sur plusieurs interfranges, ce qui augmente la précision de la mesure.

- **Compte tenu des observations précédentes, décrire l'allure de la figure obtenue avec des trous de diamètre $100\mu\text{m}$ séparés $100\mu\text{m}$.**

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 $100\mu\text{m}$ (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 $50\mu\text{m}$ séparés d'une distance de $100\mu\text{m}$.

➤ **Manipulation 6 : Diffraction par des fentes multiples : vers le fonctionnement d'un réseau**

L'objectif de cette manipulation est de généraliser le dispositif des fentes d'Young (dispositif à deux fentes) pour comprendre le fonctionnement des dispositifs à fentes multiples régulièrement espacées et de même largeur.

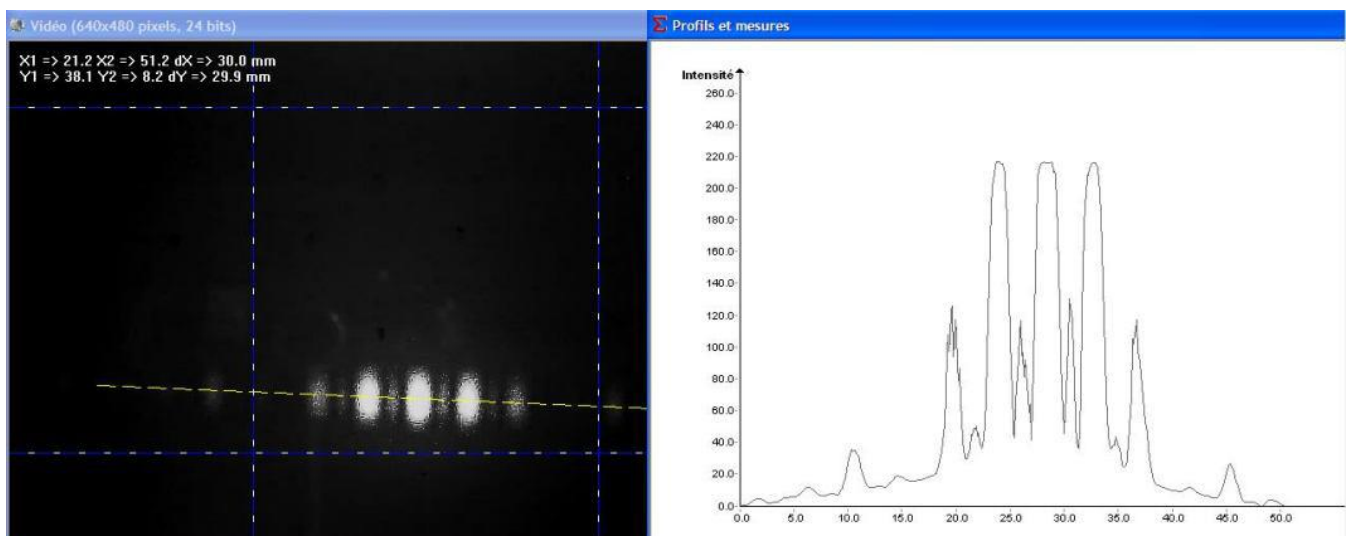
Lorsqu'on éclaire simultanément plusieurs fentes avec la même source laser, les champs électriques émis par chacune des fentes interfèrent, tous comme dans le cas de deux fentes. Nous allons donc observer ce phénomène.

- ➔ *Tourner le barillet de manière à positionner le jeton possédant les fentes multiples se situe en haut du barillet. Ce jeton possède quatre zones moins réfléchissantes dans lesquelles sont gravées les fentes : la zone la plus fine possède trois fentes, la suivante quatre fentes, la troisième possède six fentes et la dernière en possède quatorze.*



- **Eclairer le système de 3 fentes avec le faisceau laser. Décrire précisément la figure observée et l'expliquer à partir des informations fournies dans la partie rappels théoriques. Tracer et décrire le profil d'intensité de la figure.**

On observe une succession de taches plus ou moins lumineuses dirigées selon un axe qui est orthogonal à la direction de la fente. Cette succession de franges est due aux interférences entre les champs électriques émis par les fentes. On peut remarquer une tache centrale assez intense, entourée de deux taches secondaires moins lumineuses. Cet ensemble est entouré de deux autres taches secondaires, moins intenses, puis de deux autres taches plus lumineuses. On peut deviner que l'ensemble forme la tache centrale de la figure de diffraction obtenue avec une fente simple. Le profil d'intensité est constitué d'une succession de pics intenses (le pic central étant d'intensité maximale). Entre deux pics principaux successifs, on observe un pic secondaire, moins intense.



La succession de franges observée correspond donc bien au terme d'interférence pour 3 fentes décrit dans la partie théorique.

- **Eclairer maintenant les autres systèmes de fentes multiples et décrire les modifications de la figure obtenue (observer d'une part la taille et l'intensité des taches les plus intenses et d'autre part le nombre et l'intensité des taches secondaires). Pourquoi est-il difficile de tracer le profil d'intensité lorsque le nombre de fentes augmente.**

On observe que plus le nombre de fentes augmente et plus le nombre de taches secondaires entre deux tâches principales successives augmente. Ces taches secondaires sont de moins en moins intenses au fur et à mesure que le nombre de fentes augmente et on ne peut plus les distinguer dans le cas où il y a 14 fentes. En ce qui concerne les taches principales, elles sont plus intenses et plus petites lorsque le nombre de fentes augmente. Le profil d'intensité est difficile à tracer car il est délicat d'obtenir un réglage qui permet d'observer simultanément toutes les taches sans qu'il y ait recouvrement entre les différentes taches (les distances entrant en jeu sont très faibles).

- **A partir de ces observations, prévoir l'allure de la figure obtenue avec un très grand nombre de fentes.**

En augmentant beaucoup le nombre de fentes, on devrait observer une « disparition » des taches secondaires du fait de leur faible intensité lorsque N croît.

On se propose maintenant de vérifier les observations précédentes.

→ Retirer le barillet du banc. Placer sur le support prévu à cet effet le réseau de diffraction possédant 200 traits par mm. Un réseau peut être considéré comme un système de fentes multiples possédant un très grand nombre de fentes (ici, le réseau possède 100 fentes par mm). Placer ensuite le réseau sur le banc et l'éclairer par la source laser.

- Observer et commenter la figure obtenue. Placer l'écran à une distance permettant d'observer simultanément plusieurs tâches à l'aide de la caméra. Quelle est l'orientation des fentes gravées sur réseau ? A l'aide de la figure obtenue, donner une estimation du pas 'p' du réseau, c'est-à-dire, la distance entre deux fentes successives. Donner une estimation de l'incertitude sur 'p'. Comment choisir la distance D de manière à limiter l'incertitude sur 'p' ?



La figure d'interférence obtenue est composée de taches lumineuses alignées selon un axe qui semble horizontal. Si on fait l'analogie avec les manipulations précédentes concernant la diffraction avec une ou plusieurs fentes, l'axe selon lequel se trouvent les taches est orthogonal à la direction des fentes, qui sont donc verticales. Les taches observées correspondent aux taches principales observées dans la manipulation précédente.

En utilisant la remarque de la partie théorique et en se plaçant dans l'approximation des petits angles, on peut dire que la distance 'l' entre la tache centrale et celle qui est située juste à côté successifs est approximativement $\frac{D\lambda}{p}$ où 'D' est la distance entre l'écran et le réseau et 'p' le pas du réseau. A une distance de 20cm, on mesure l=20,9mm avec un laser de 532nm, on trouve p= 5,1µm. L'incertitude sur cette mesure est de 0,3µm. Cette incertitude est limitée en choisissant D de sorte que la tache centrale et une des taches secondaires se trouvent seules dans le champ de la caméra. Ainsi, on augmente D et l pour une erreur de mesure qui est constante : l'incertitude sur la mesure est donc réduite.

- Remplacer maintenant le réseau de 100 traits. Commenter les modifications de la figure observée et déterminer le pas du réseau.

Avec le réseau de 100 traits/mm, on observe une figure tout à fait similaire à celle observée avec celui de 200 traits/mm, à la seule différence près que les taches sont plus resserrées. Cela laisse donc supposer un réseau dont les fentes sont à une distance plus grande les unes des autres, ce que nous allons vérifier.

Pour une distance D=40cm, on mesure l=21,2mmce qui nous donne un pas de 10,0µm avec une incertitude de 0,5µm.

➤ Manipulation 7 (s'il reste du temps ...) : Introduction à l'optique de Fourier : observation de la diffraction par un carré de petites dimensions

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, utilisée dans la partie rappels théoriques :

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

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 en fonction à laquelle on se situe sur l'objet diffractant. 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 $x \in [-\frac{a}{2}; \frac{a}{2}]$, 0 sinon (on reconnaît ici l'expression d'une fonction dite porte).

Ensuite, en posant $\mu = \frac{\sin(\theta)}{\lambda}$, on peut réécrire l'expression ci-dessus $A_m(M) = \int_{-\infty}^{+\infty} t(x) e^{-i2\pi\mu x} dx$

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 maintenant un carré de côté 'a' faible. Sa fonction pupillaire est une fonction à deux dimensions. Si on considère un repère dont les axes Ox et Oy sont parallèles à la direction des cotés du carré, la fonction pupillaire du carré à deux dimensions s'écrit : $t(x,y) = 1$ si $x \in [-\frac{a}{2}; \frac{a}{2}]$ et $y \in [-\frac{a}{2}; \frac{a}{2}]$, 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 :

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

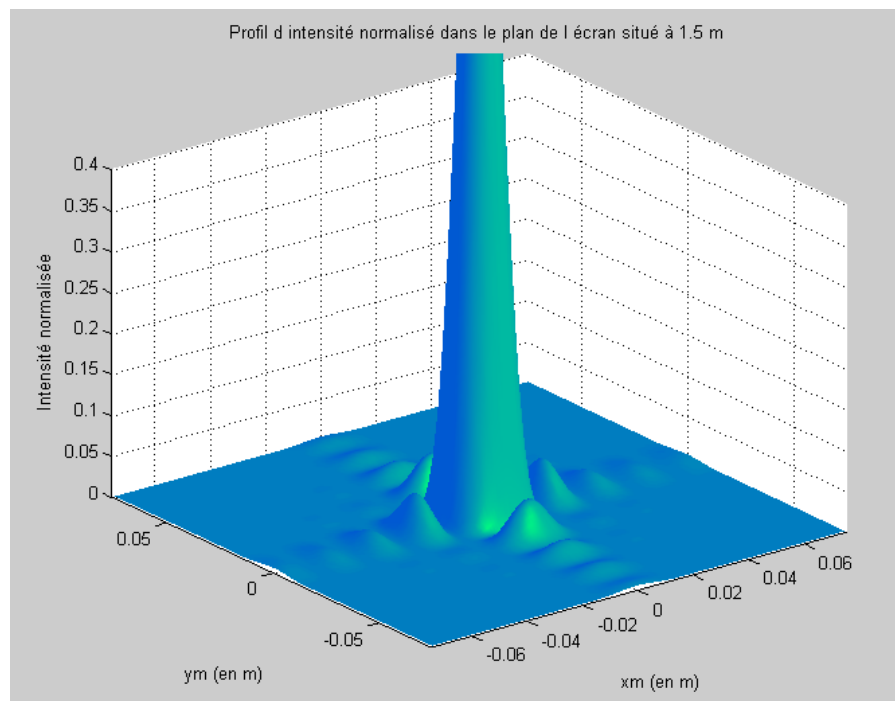
Le calcul de cette transformée de Fourier conduit à une fonction sinus cardinal à deux dimensions :

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

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

L'intensité lumineuse reçue dans le plan de l'écran est alors proportionnelle à $A_m^2(M)$ et donc proportionnelle à $\sin^2 c\left(\frac{\pi a \sin(\theta_x)}{\lambda}\right) \sin^2 c\left(\frac{\pi a \sin(\theta_y)}{\lambda}\right)$

Le profil d'intensité obtenu sur un écran placé à 1,5m avec une source laser monochromatique de longueur d'onde $\lambda=532\text{nm}$ diffractée par un carré de côté $50\mu\text{m}$ est donc le suivant :

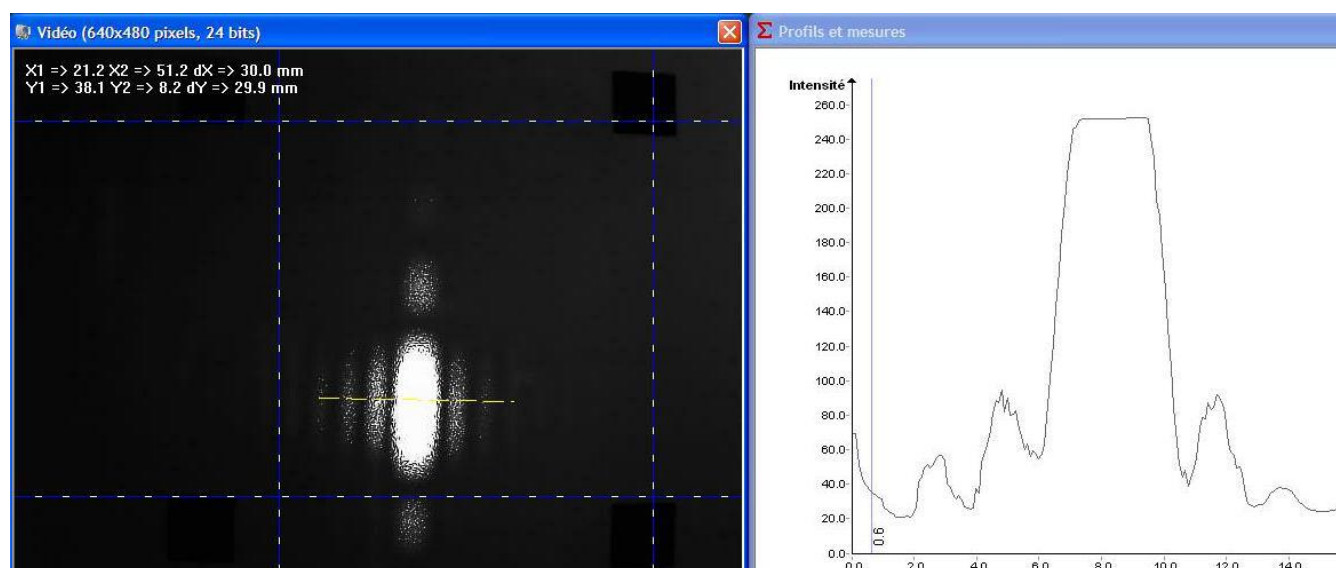


En connaissant la fonction pupillaire d'un objet diffractant, on peut donc retrouver le profil d'intensité à partir de la transformée de Fourier de la fonction pupillaire élevée au carré.

Dans cette manipulation, nous allons vérifier à l'aide du logiciel Ovisio la figure de diffraction donnée par un carré de petites dimensions.

- *Former sur l'écran possédant les carrés la figure de diffraction obtenue avec un trou carré de faibles dimensions. Pour cela, tourner le barillet de manière à ce que le jeton contenant les carrés soit en haut du barillet. Ce jeton possède trois axes particuliers, indiqués par des segments gravés sur les bords du jeton. L'axe central possède six trous, les deux autres possédant respectivement deux carrés et un rectangle de faibles dimensions et un ensemble de trois paires de trous. Repérer sur le jeton l'axe contenant les trous carrés et le trou rectangulaire.*
- *Placer l'ensemble écran/caméra à une distance qui permet d'observer convenablement la figure de diffraction à l'aide du logiciel Ovisio. Obtenir sur l'écran la figure de diffraction par l'un des trois trous de l'axe repéré précédemment. Effectuer les réglages nécessaires pour obtenir avec le logiciel une image d'une part assez lumineuse pour distinguer le profil d'intensité sur plusieurs ordres (avec plusieurs taches secondaires visibles).*
- **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.**

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 :



- *Effectuer les réglages nécessaires pour obtenir avec le logiciel une image d'une part assez lumineuse pour distinguer au minimum les deux premiers ordres de la figure de diffraction mais d'autre part suffisamment peu lumineuse de manière à voir nettement la séparation entre la tâche centrale et le premier ordre.*

- **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 532nm).**

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 $a = \frac{(N+1)D\lambda}{l}$. 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. Avec cette méthode, on en déduit les résultats suivants :

	Distance D (en m)	Longueur d'onde λ (en m)	Nombre taches	Largeur taches (en m)	Dimension carré (en m)	Dimension réelle (en m)	Erreur
Carré n°1	0,4	5,32E-7	6	2,25E-002	6,62E-5	7,00E-005	5,4%
Carré n°2	0,6	5,32E-7	9	1,56E-002	2,05E-4	2,00E-004	2,3%
Rectangle (longueur)	0,6	5,32E-7	7	1,29E-002	1,98E-4	2,00E-004	1,0%
Rectangle (largeur)	0,4	5,32E-7	6	2,15E-002	6,93E-5	7,00E-005	1,0%

On remarque que l'erreur est assez importante pour le carré n°1, du fait de la difficulté d'exploitation de la figure de diffraction obtenue avec le premier carré. Ces manipulations permettent de vérifier les éléments théoriques énoncés ce dessus.

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.