

## TP : Diffraction et interférences.

Les calculs théoriques associés à la diffraction ne font pas partie du programme. Nous les avons étudiés à travers une étude documentaire en début d'année. L'étude théorique des interférences, elle, figure au programme. La difficulté à laquelle on se trouve confronté lorsque l'on veut étudier les interférences sur le plan pratique est que les conséquences de la diffraction ne peuvent être occultées. Afin de les comprendre, nous utiliserons donc les résultats théoriques où l'on prend en compte à la fois la diffraction et les interférences. Ces deux phénomènes sont communs à tous les types d'ondes, dans ce TP nous ne les rencontrerons que dans le cas des ondes lumineuses dans un contexte assez restreint puisque la source lumineuse utilisée sera un laser que nous considérerons comme monochromatique ou bien la lampe à vapeur de sodium qui présente plusieurs raies mais dont le doublet à 589,0 nm et 589,6 nm domine largement en intensité d'où la couleur orange. On pourra d'ailleurs raisonner avec une longueur d'onde moyenne à 589,3 nm unique car l'expérience que nous réaliserons ne mettra pas en évidence les propriétés de moindre cohérence temporelle de la source. En effet, les différences de marche en jeu sont trop faibles pour parvenir.

### 1 Objectifs

Dans ce TP, nous chercherons à valider les formules théoriques associées à la diffraction et aux interférences. On cherchera en particulier à vérifier la position des minima de lumière dans les figures de diffraction et d'interférences. On essaiera aussi de comparer les différentes intensités lumineuses associées aux maxima. Enfin, on effectuera la mesure de la taille du pixel d'un capteur d'une petite webcam en utilisant la figure de diffraction obtenue par réflexion.

### 2 Matériel

#### 2.1 Vue d'ensemble

Sur la photographie de la figure 1, on a une vue générale du matériel que l'on va utiliser. Les expériences se dérouleront sur un banc d'optique, elles utiliseront un laser ou une lampe spectrale à vapeur de sodium, un écran pour les observations directes et la caméra *Caliens* et son logiciel pour les acquisitions d'intensité lumineuse. Il comporte aussi, bien évidemment, un support destiné à recevoir les objets provoquant la diffraction et les interférences de la lumière. Le supports qui seront utilisés offrent deux degrés de liberté pour les réglages. On peut, de façon assez précise, régler le positionnement vertical de l'objet supporté et le positionnement horizontal perpendiculairement à la direction du banc d'optique.



FIGURE 1 – Banc d'optique, laser équipé de son élargisseur et dispositif support des objets diffractants

On utilisera un laser vert de longueur d'onde 532,0 nm. L'incertitude sur la valeur de la longueur d'onde sera considérée comme égale à 0,1 nm. Au cours du TP, on pourra aussi utiliser un laser rouge à  $\lambda = 632,8$  nm ou encore un laser bleu dont la longueur d'onde est 405,0 nm. Les sources de lumière laser sont particulièrement pratiques pour notre étude mais :

**Le faisceau LASER est dangereux pour l'œil. Il ne faut jamais le recevoir dans l'œil! Il faut se méfier particulièrement des réflexions accidentelles lorsqu'on procède aux réglages.**

Avec la lampe spectrale, on éclairera la fente métallique réglable. Cette fente sera placée dans le plan focal objet de la lentille convergente de focale 5 cm en utilisant la méthode d'autocollimation. Voir la photographie 2. On voit la fente métallique de taille réglable à l'aide d'une vis micrométrique avec possibilité de mesure mais la mesure n'est pas fiable.



FIGURE 2 – Montage avec la lampe spectrale et la fente métallique réglable

## 2.2 Les systèmes réalisant diffraction et interférences

Pour obtenir les phénomènes de diffraction et d'interférences, on utilise des masques *Ovio* dans lesquels ont été ménagés des fentes, simples, des fentes doubles, des réseaux de fentes et des ouvertures de formes variées. Vous pouvez voir ces objets et leurs caractéristiques à la figure 3.

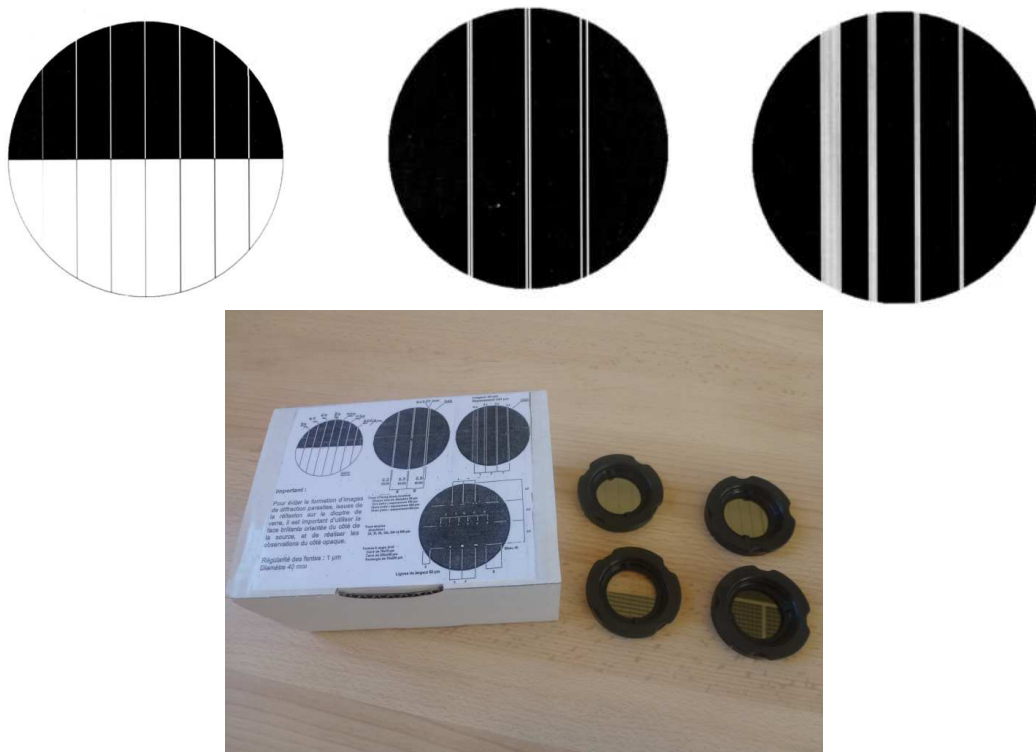


FIGURE 3 – Masques *Ovio* pour la diffraction et les interférences

Sur ces masques, on trouve tout d'abord des fentes simples de largeur 30, 40, 60, 80, 100, 150 et 200  $\mu\text{m}$  ainsi que des obstacles sur fond clair de mêmes caractéristiques qui sont les écrans complémentaires des fentes. Le masque des fentes d'YOUNG compte trois systèmes de deux fentes. Elles sont toutes de la même largeur, à savoir 70  $\mu\text{m}$ . Elles ne diffèrent que par la distance qui les sépare qui peut être 200, 300 ou encore 500  $\mu\text{m}$ . Enfin,

un masque permet d'étudier la diffraction par un réseau même si le nombre de fentes est relativement limité. On trouve quatre réseaux de  $N = 3, 4, 6$  ou  $14$  fentes. Ces réseaux sont tous constitués de fentes de largeur  $60\ \mu\text{m}$  et de pas  $100\ \mu\text{m}$ . Ils ne diffèrent que par le nombre total de fentes utilisées à savoir,  $3, 4, 6$  ou  $14$ . Un masque supplémentaire *Ovio* comporte de petites ouvertures circulaires ou rectangulaires de tailles différentes. On peut donc observer en l'utilisant des figures de diffraction comme celles qui ont été présentées dans l'étude documentaire sur la diffraction.

Lorsque l'on utilise le laser élargi ou la lampe spectrale à vapeur de sodium, il faudra masquer avec un postit les éléments diffractants que l'on veut pas utiliser. En effet, le faisceau issu de la première fente sera suffisamment large pour éclairer plusieurs systèmes voisins sur le masque *Ovio*. Cela ne se produit en général pas lorsque l'on utilise le laser qui possède un faisceau assez fin.

On utilisera aussi comme réseau le capteur de la webcam que vous pouvez voir sur la photographie de la figure 4. Ce réseau sera éclairé par un des trois lasers dont on dispose. L'image sera obtenue sur un écran troué puisque le réseau fonctionne par réflexion.

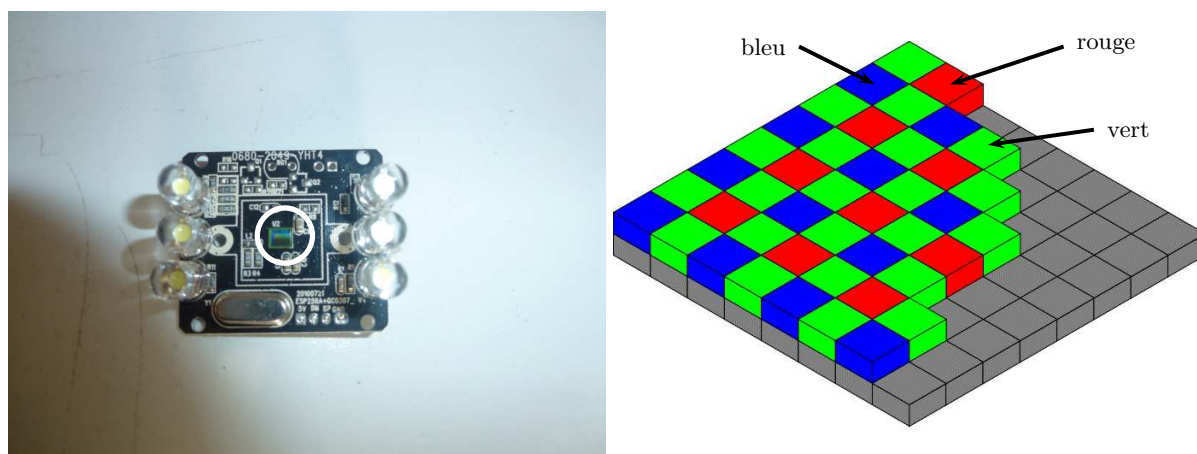


FIGURE 4 – Capteur de la webcam à l'intérieur du cercle blanc et filtre de BAYER

Ce capteur comporte  $307\,200$  pixels qui sont précédés d'un filtre - encore appelé mosaïque - de BAYER. Comme les pixels n'ont aucune ou quasiment aucune sélectivité en fonction de la longueur d'onde, un filtre sélectionne pour un pixel une des trois couleurs primaires dans le système RGB ce qui permet ensuite de recomposer une image en couleur en utilisant des pixels voisins. Le filtre de BAYER comporte 50% de filtres verts, 25% de rouges et 25% de bleus, comme on peut le voir sur la représentation de la figure 4. Le tableau suivant présente quelques caractéristiques du capteur de la webcam.

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Array size VGA                | $640 \times 480$                                |
| Pixel size                    | $3,2 \times 3,2\ \mu\text{m}^2$                 |
| Power supply                  | $2,8 \pm 0,2\ \text{V}$                         |
| Power supply current          | 20 mA (operating)                               |
| Standby current               | 10 $\mu\text{A}$                                |
| Output mode (8-bit)           | Raw RGB<br>YUV/YCbCr 4 :2 :2<br>RGB 565/555/444 |
| Optical format                | 1/7"  |
| Chief ray angle               | $25^\circ$                                      |
| Image transfer rate (Max) VGA | 30 fps @24 MHz                                  |
| S/N Ratio                     | $\sim 42\ \text{dB}$                            |
| Scan mode                     | progressive                                     |
| Maximum expose                | 4095 Row time                                   |
| A/D Converter                 | 10 bit  |

## 2.3 La caméra *Caliens*

La caméra *Caliens* est présentée sur la photographie de la figure 5. Cette caméra utilise 2048 capteurs CCD alignés pour former une barrette rectiligne de 3 cm de long que l'on peut deviner sur la photographie. L'utilisation d'un laser permet d'obtenir facilement des figures de diffraction et d'interférences du fait de son caractère très monochromatique par rapport aux sources conventionnelles. Toutefois, pour les capteurs CCD, le laser possède un inconvénient lié à la puissance surfacique très élevée reçue. La caméra CCD est très vite en saturation. C'est pour atténuer l'intensité lumineuse reçue - et donc revenir dans le domaine de linéarité du capteur - que l'on dispose des filtres accompagnant la caméra. L'un d'eux atténue l'intensité de 90%, les deux autres - équivalents - de 30% chacun. Enfin, on peut faire varier de façon continue l'atténuation de l'intensité lumineuse en utilisant deux polariseurs rectilignes dont on va décaler les deux directions de polarisation d'un angle  $\alpha$ . L'intensité reçue suit la loi de MALUS :  $I_{\text{sortie}} = I_{\text{entrée}} \cos^2 \alpha$ . Ces filtres et ces polariseurs peuvent être vissés les uns sur les autres. Pour les enregistrements avec le laser, on privilégiera l'utilisation des filtres atténuateurs car la surface utilisée sur les polariseurs est faible. En effet, la section du faisceau laser étant relativement petite, l'atténuation sera très fluctuante avec la zone éclairée du filtre et avec le réglage de l'angle  $\alpha$ . La sensibilité aux vibrations se produisant dans la salle de TP sera moins élevée avec les filtres atténuateurs. La caméra *Caliens* sera protégée d'une bonne partie de lumière parasite grâce un à petit tube en carton, voir la figure 5.



FIGURE 5 – Caméra *Caliens* avec ses filtres atténuateurs et ses deux polariseurs rectilignes

## 2.4 Le logiciel *Caliens*

Le logiciel *Caliens* n'est pas des plus pratique à utiliser. La caméra doit être reliée à deux ports USB simultanément car certains ports USB qui proposent tous une tension de 5 V ne fournissent pas une intensité suffisamment élevée pour faire fonctionner la caméra. On n'utilise pas, ici, le mode TIME prévu dans le logiciel (acquisition de l'intensité lumineuse en un point au cours du temps) mais le mode plus classique où on va, une fois le positionnement des instruments réalisé correctement, faire l'acquisition à un moment donné de l'intensité lumineuse  $I(x)$  sur l'ensemble des 2048 pixels CCD du capteur. Le moment d'acquisition est fixé par un clic sur l'icône en forme de gaussienne.

Si le logiciel *Caliens* ne traite pas les données mais on peut comparer théorie et expérience en réalisant des simulations de l'évolution de l'intensité  $I(x)$ . On trouve un module, dans le menu, permettant de superposer une courbe théorique à la courbe enregistrée. En faisant varier les paramètres du menu de simulation, on adapte la courbe théorique au plus près de la courbe expérimentale. On peut ainsi remonter à la connaissance de la largeur d'une fente ou du pas du réseau par exemple. Dans le menu contextuel proposé, il faudra faire attention au fait que les valeurs numériques des distances à régler doivent être saisies avec une virgule au lieu d'un point.

Le logiciel *Caliens* ne propose aucune forme de traitement des mesures enregistrées. Il n'exporte pas<sup>1</sup> sous *Latis Pro*. Le module d'impression des courbes ne fonctionne pas ! On peut exporter les données enregistrées au format TXT, CSV en séparateur *point virgule* ou encore au format RW3 qui correspond au logiciel *Régressi*. Si l'on utilise l'exportation en TXT ou CSV et que l'importation dans *Latis Pro* ne fonctionne pas, il faut ouvrir le fichier avec le bloc-notes par exemple pour vérifier que le séparateur est bien du type *point virgule* et qu'il n'y a pas de lignes supplémentaires inadaptées au début du fichier.

1. Pour l'instant, en attendant une nouvelle version...

### 3 Aspects théoriques

#### 3.1 Diffraction par une fente

La diffraction par une fente sera considérée dans le cas d'un éclairage en lumière parallèle - ce qui est très vite le cas peu après la sortie du laser - sous incidence normale. On étudie alors la diffraction à l'infini dans la direction repérée par l'angle  $\theta$  par rapport à la normale à la fente, voir le schéma de la figure 6 : chaque point de la fente se comporte comme une source secondaire et diffracte l'onde qu'il reçoit dans toutes les directions de l'espace, on envisage comme direction d'étude la direction repérée par l'angle  $\theta$ .

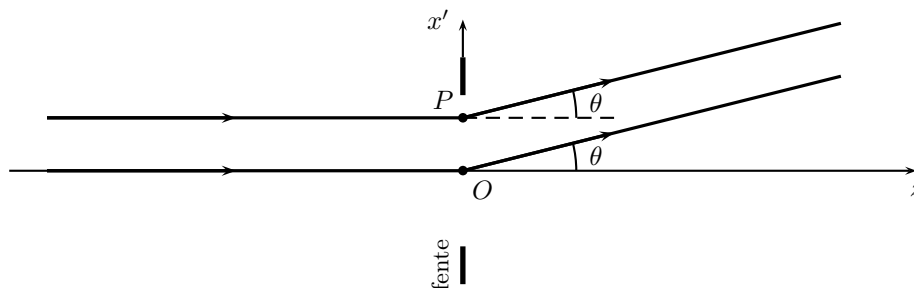


FIGURE 6 – Diffraction à l'infini par une fente

Dans un tel contexte, l'intensité diffractée est donnée par la formule suivante :

$$I = I_0 \operatorname{sinc}^2 \frac{\pi e \sin \theta}{\lambda}$$

où  $e$  est la largeur de la fente. Si on observe à une relativement grande distance  $D$  du motif diffractant, l'angle  $\theta$  est relié à une position sur l'écran d'observation ou bien sur le capteur utilisé. En choisissant sur l'écran ou le capteur l'origine d'une abscisse  $x$  lorsque  $\theta = 0$ , on peut écrire que l'intensité lumineuse est alors :

$$I = I_0 \operatorname{sinc}^2 \frac{\pi e x}{\lambda D}$$

La direction  $\theta = 0$  correspond d'ailleurs à la direction de la lumière prévue dans le cadre de l'optique géométrique.

1. Représenter la fonction  $I(x)$  en faisant apparaître les points remarquables.

#### 3.2 Interférences par les fentes d'Young

2. Montrer que, sans prendre en compte l'influence de la fonction de diffraction, l'intensité lumineuse liée aux interférences à grande distance dans le cadre des fentes d'YOUNG séparées par la distance  $a$  est donnée par :

$$I = 2I_0 \left( 1 + \cos \frac{2\pi a x}{\lambda D} \right)$$

Si l'on prend en compte l'influence de la fonction de diffraction, l'intensité obtenue sur le capteur ou sur l'écran est modifiée. On obtient alors :

$$I = 2I_0 \operatorname{sinc}^2 \frac{\pi e x}{\lambda D} \left( 1 + \cos \frac{2\pi a x}{\lambda D} \right)$$

Lors de toutes les observations expérimentales, l'effet de la diffraction est perceptible. Il est indispensable de le prendre en compte afin de bien comprendre les observations faites à l'œil nu ou bien avec un capteur. L'évolution de l'intensité lumineuse est représentée sur le graphique de la figure 7.

3. Expliquer pourquoi la fonction de diffraction représentée en pointillés constitue l'enveloppe de la fonction d'interférences. Déterminer l'expression de l'interfrange  $i$ .

4. Quels points remarquables de la figure sont-ils fonction de  $e$  largeur de chaque fente ?

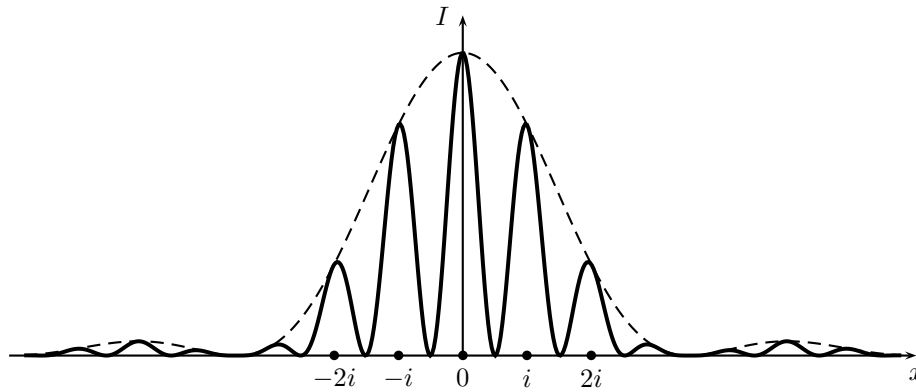


FIGURE 7 – Intensité pour les fentes d’YOUNG avec diffraction

### 3.3 Interférences d’Young et cohérence spatiale

La source utilisée n’est plus considérée comme ponctuelle et placée au foyer objet de la lentille convergente de focale  $f$ . La fente source possède une largeur  $b$ , elle est centrée sur le foyer objet de la lentille et entièrement placée dans le plan focal objet.

5. Sans tenir compte de la diffraction due à la largeur des fentes d’YOUNG, montrer que l’intensité obtenue sur l’écran placé à grande distance est donné par la formule :

$$I = 2I_0 \left( 1 + \mathcal{C}(b) \cos \frac{2\pi a x}{\lambda D} \right)$$

où  $\mathcal{C}(b)$  est le contraste (ou visibilité) de la figure d’interférences donné par :

$$\mathcal{C}(b) = \left| \operatorname{sinc} \frac{\pi a b}{\lambda f} \right|$$

6. Pour quelles valeurs de la largeur  $b$  de la fente source a-t-on une annulation du contraste ?

Si l’on tient compte de la diffraction par les fentes d’YOUNG, la formule donnant l’intensité est modulée par la fonction de diffraction comme cela a été vu avant :

$$I = 2I_0 \operatorname{sinc}^2 \frac{\pi e x}{\lambda D} \left( 1 + \mathcal{C}(b) \cos \frac{2\pi a x}{\lambda D} \right)$$

La représentation de l’évolution de l’intensité lumineuse est donnée sur les figures 8 et 9 pour deux valeurs du contraste  $\mathcal{C}(b)$ .

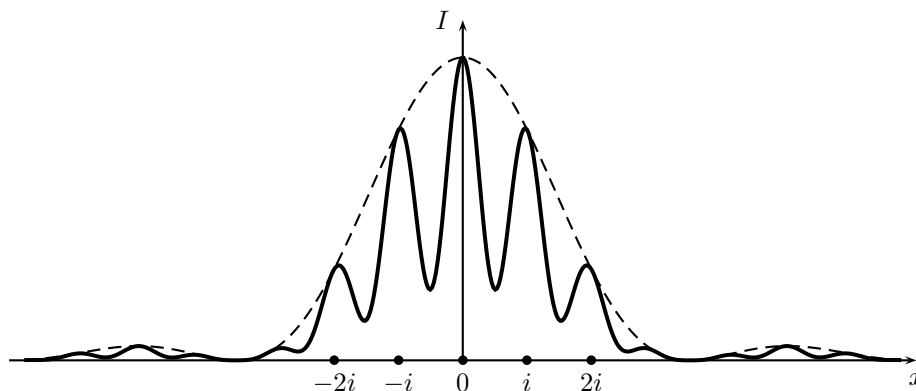


FIGURE 8 – Intensité pour les fentes d’YOUNG avec diffraction et influence de la cohérence spatiale de la source pour une valeur du contraste  $\mathcal{C}(b) = 0,6$ .

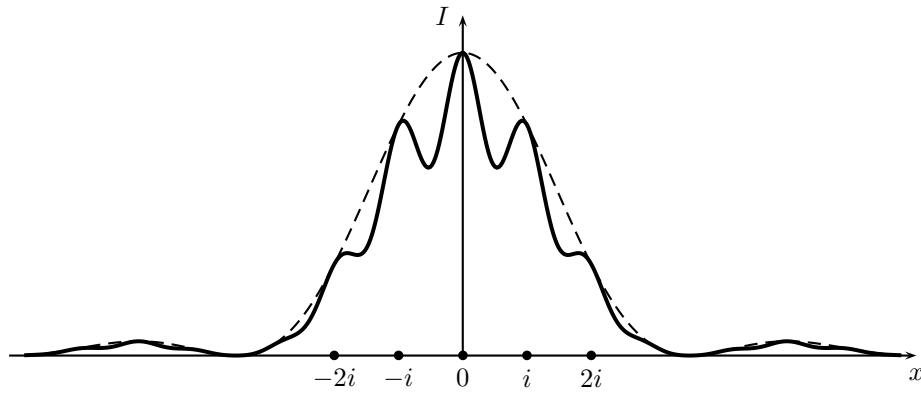


FIGURE 9 – Intensité pour les fentes d'YOUNG avec diffraction et influence de la cohérence spatiale de la source pour une valeur du contraste  $\mathcal{C}(b) = 0,2$ .

### 3.4 Diffraction par un réseau

7. Toujours dans le cas d'une étude de la diffraction à l'infini par un réseau de pas  $a$  éclairé sous incidence normale, redémontrer la formule de BRAGG des réseaux.

8. Dans le cas d'une observation à la distance  $D$  du réseau, établir les positions  $x_p$  correspondant aux ordres  $p$ .

Si l'on s'intéresse à l'intensité lumineuse diffractée par le réseau dont le nombre de fentes éclairées est  $N$ , on peut démontrer qu'elle est donnée par l'expression suivante :

$$I = I_0 \operatorname{sinc}^2 \frac{\pi e x}{\lambda D} \frac{\sin^2 N \frac{\pi a x}{\lambda D}}{\sin^2 \frac{\pi a x}{\lambda D}}$$

9. L'intensité lumineuse pour trois réseaux identiques dont on augmente progressivement le nombre  $N$  de fentes éclairées est représentée sur les figure 10, 11 et 12. Commenter ces courbes.

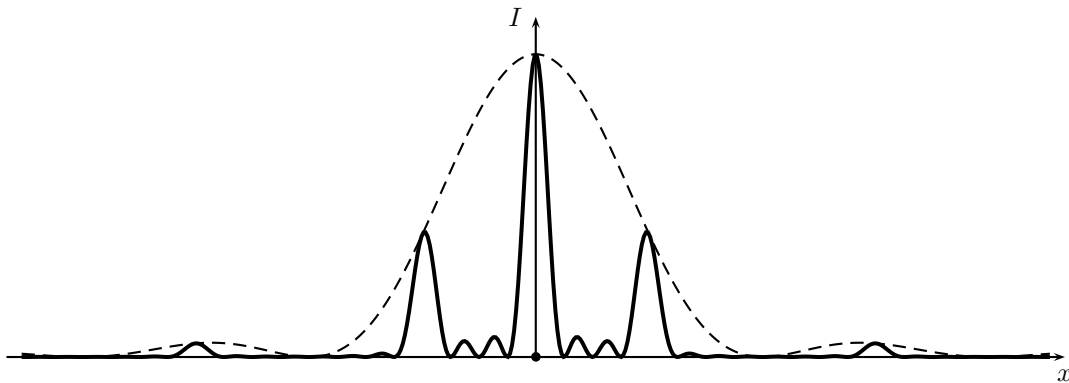


FIGURE 10 – Réseau de  $N = 4$  fentes

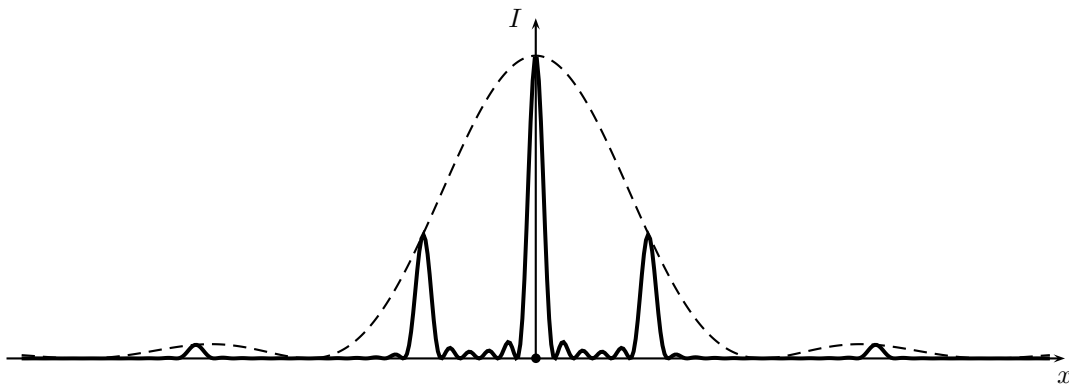
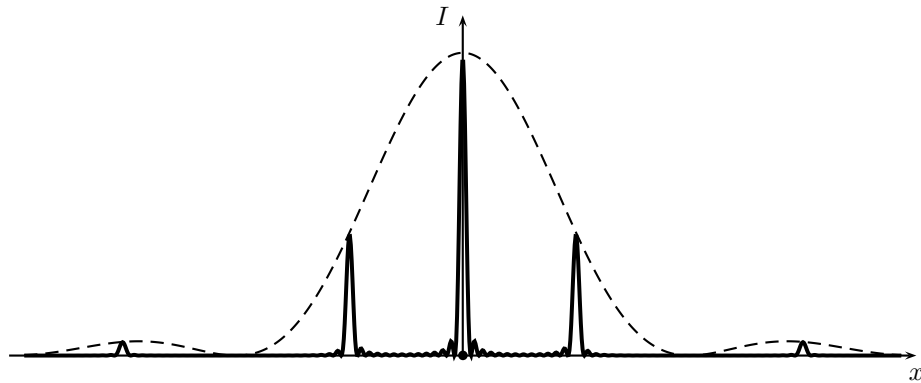


FIGURE 11 – Réseau de  $N = 6$  fentes

FIGURE 12 – Réseau de  $N = 14$  fentes

## 4 Expériences

### 4.1 Consignes

Lors de vos activités expérimentales en TP, vous devrez systématiquement :

- \* Élaborer un protocole et m'appeler pour que je le valide.
- \* Mettre en œuvre ce protocole et m'appeler pour que j'évalue vos activités.
- \* Communiquer les résultats dans le compte rendu sous forme de descriptions, de tableaux de mesures, de graphiques...
- \* Valider les résultats en comparant les développements théoriques et les résultats expérimentaux en ayant le souci permanent de présenter de façon rigoureuse les résultats avec leur incertitude.
- \* Remettre en fin de séance votre compte-rendu.

Vous serez évalué sur l'ensemble de ces exigences.

### 4.2 Diffraction et interférences en utilisant le laser élargi

Dans cette expérience, on enregistre l'intensité lumineuse diffractée arrivant sur la caméra *Caliens* par la fente simple métallique réglable de la figure 13.



FIGURE 13 – Fente fine réglable pour l'étude de la diffraction

**10.** Obtenir à une distance suffisante pour se situer dans le cadre de la diffraction à l'infini la figure de diffraction de la lumière du laser vert élargi provoquée par la fente. En utilisant l'outil de simulation du programme *Caliens*, déterminer la valeur de la largeur  $e$  de la fente utilisée ainsi que son incertitude. Imprimer votre enregistrement. La largeur de cette fente métallique réglable est notée  $e$  dans cette partie. Attention, elle changera de nom au paragraphe suivant lorsque la fente possédera un autre rôle.

**11.** Enregistrer avec le laser élargi, la figure de diffraction réalisée un système de deux fentes d'YOUNG. Penser à sélectionner sur le jeton *Ovio* grâce à des postits un seul système de deux fentes d'YOUNG. Toujours en utilisant



le programme de simulation de *Caliens*, retrouver les caractéristiques du système des deux fentes, à savoir la largeur de chaque fente et la distance séparant les deux fentes.

**12.** En utilisant le réseau de  $N = 6$  fentes du dispositif *Ovio*, mesurer son pas  $a$  grâce à une expérience de diffraction-interférences.

### 4.3 Diffraction et interférences en utilisant la lampe à vapeur de sodium

**13.** Réaliser le montage avec la lampe à vapeur de sodium. La fente métallique utilisée pour la diffraction servira de fente source pour l'expérience des interférences. Sa largeur - noté  $b$  dans cette partie - sera fixée moyennant un compromis entre une fente assez large pour avoir assez de lumière et une fente pas trop large afin d'éviter de voir la fonction de contraste  $\mathcal{C}(b)$  intervenir. Normalement, une fente de largeur  $100 - 200 \mu\text{m}$  devrait convenir.

**14.** Placer la fente source dans le plan focal objet de la lentille convergente de focale  $5 \text{ cm}$  par la méthode d'autocollimation.

**15.** Enregistrer l'intensité lumineuse obtenue dans le cadre de l'étude des fentes d'YOUNG en projetant la lumière diffractée grâce à une lentille convergente sur la caméra *Caliens*.

**16.** Simuler la fonction d'éclairement qui s'adapte au mieux à la courbe enregistrée. En déduire la mesure de la distance  $a$  séparant les deux fentes ainsi que la mesure de  $e$  largeur de chaque fente du système des deux fentes d'*Young*. Comparer aux valeurs annoncées par le constructeur.

**17.** Augmenter la largeur  $b$  de la fente source jusqu'à voir l'effet de la fonction de contraste  $\mathcal{C}(b)$  sur la figure d'interférences. Imprimer des enregistrements d'éclairement illustrant l'influence du contraste. Continuer à augmenter la largeur de cette fente source et consigner vos observations. Pouvez-vous estimer la largeur de la fente source lors d'une annulation du contraste ?

### 4.4 Le capteur de la webcam : un réseau par réflexion particulier

On utilisera successivement les lasers pour l'éclairage du capteur de la webcam, ainsi que l'écran troué pour observer la figure de diffraction obtenue.

**Prendre le maximum de précautions afin d'éviter de recevoir de la lumière laser dans l'œil.**

**18.** En effectuant des mesures sur les figures de diffraction que l'on obtiendra, retrouver les caractéristiques du capteur de la webcam, en particulier la taille  $\ell$  du carré de chacun des pixels.