

TP 3 : Interférences et Diffraction

Pauline Toutain, Hervé Schmit-Veiler

Avril 2024

1 Diffraction à l'infini par une fente de largeur b

La première expérience consiste à observer la figure de diffraction formée lorsqu'on éclaire une fente fine de largeur b avec un faisceau laser collimaté et monochromatique.

Le montage expérimental consiste d'un laser, d'une fente et d'un écran placé le long d'un banc optique. L'orientation du laser et la position de la fente ont été ajustées afin que le faisceau laser soit en incidence normale avec le centre de la fente. Pour assurer la fiabilité de nos mesures, il a aussi fallu orienter l'écran parallèlement à la fente, afin que la figure de diffraction puisse être lue sans distortion.

La distance fente-écran D est particulièrement importante dans cette expérience. Lorsque l'écran est trop près de la fente ($D \approx 10$ cm), le nombre de Fresnel N n'est plus très petit devant l'unité.

$$N = \frac{b^2}{\lambda D} \sim \frac{(50 \times 10^{-6})^2}{500 \times 10^{-9} \cdot 10 \times 10^{-2}} = 0.05$$

Donc, pour se placer dans le régime de Fraunhofer il faut s'assurer que l'écran soit placé suffisamment loin derrière la fente.

Avec l'écran au bout du banc (donc en régime de Fraunhofer), on observe en variant la largeur de la fente que la figure de diffraction se comprime (les maxima se rapprochent) lorsqu'on élargit la fente, et vice versa.

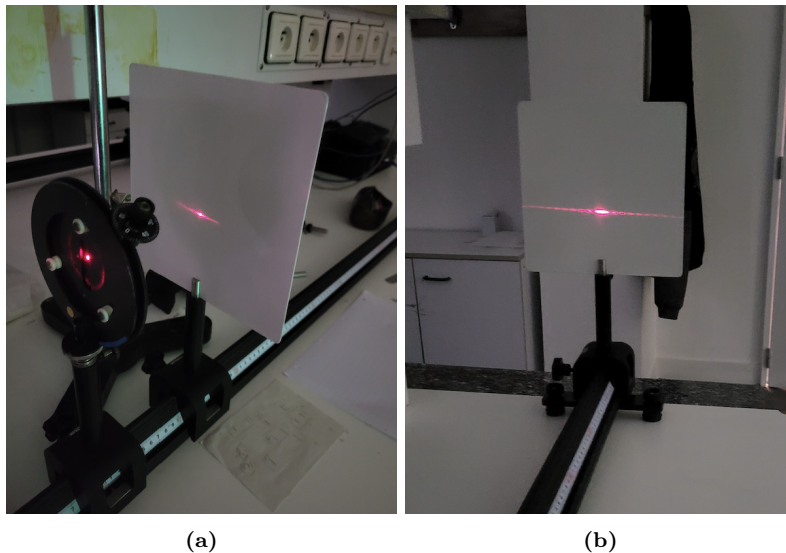


FIGURE 1 – Figure de diffraction en dehors du régime de Fraunhofer à $D \approx 10$ cm (a). Figure de diffraction dans le régime de Fraunhofer à $D \approx 2$ m (b).

1.1 Mesurer la largeur du maxima central

En gardant le même montage que pour nos observations préliminaires, nous avons mesuré la largeur du maxima central Δy en fonction de la largeur de la fente b en marquant les positions des deux minima symétriques d'ordre 1 sur une feuille placée sur l'écran – mesures qui ont été répétées pour 7 fentes différentes, dont une avec une largeur inconnue que l'on va chercher à trouver.

Nous avons mesuré la distance entre les deux minima avec une règle pour obtenir Δy .

Toutes ces mesures ont été prises avec un laser rouge $\lambda_r = 650$ nm, à une distance $D = 170 \pm 0.05$ cm de la fente.

b (μm)	Δy (± 0.1 cm)
400	0.55
280	0.83
120	1.92
100	2.29
50	4.87
40	6.30
?	3.56

TABLEAU 1 – Valeurs de a et b obtenus à partir des relations théoriques

Dans le régime de Fraunhofer, la largeur du maxima central de la figure de diffraction Δy est donné par la formule suivante :

$$\Delta y = 2 \frac{\lambda D}{b} \quad (1)$$

Donc selon cette relation, $2\lambda D = 2.21 \times 10^{-6}$ m². Sachant aussi que Δy varie de manière monotone en fonction de b , on peut déjà s'attendre à trouver une largeur pour la fente mystère $b_{\text{mystère}}$ entre 50 μm et 100 μm .

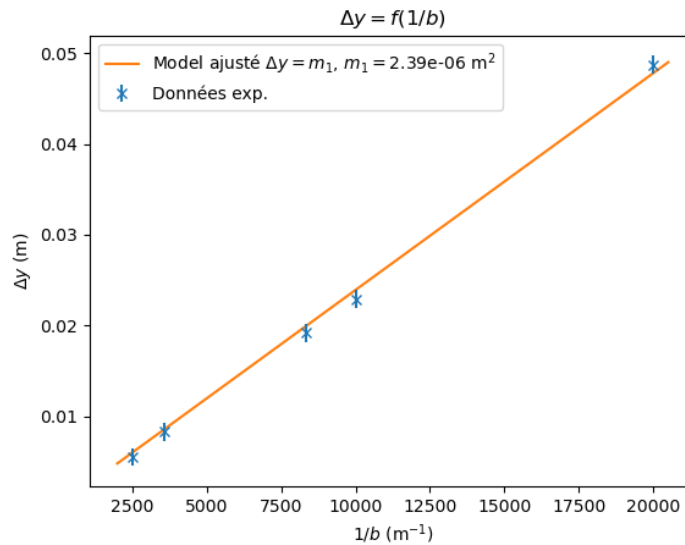


FIGURE 2 – Tracé des données expérimentales $\Delta y = f(1/b)$ (croix bleues), avec ajustement linéaire.

Un ajustement linéaire a été obtenu avec la librairie python [scipy.optimize.curve_fit](#), le coefficient directeur ainsi trouvé de $m_1 = (2.39 \pm 0.04) \times 10^{-6}$ m² ne contient pas la prédiction théorique dans ses incertitudes. Or, le nombre de mesures étant vraiment assez faible, cet écart de $\sim 8\%$ n'est pas aberrant. L'incertitude de m_1 , correspondant à un écart type, provient aussi de la fonction [curve_fit](#).

Sachant que pour la fente mystère $\Delta y = 3.56 \pm 0.1$ cm, on obtient la largeur suivante qui se trouve bien dans l'intervalle suggérée précédemment :

$$b_{\text{mystère}} = \frac{m_1}{\Delta y} = 67.1 \pm 2 \mu\text{m}$$

2 Interférences à deux ondes - dispositif de Young

Dans cette seconde expérience, nous avons expérimenté avec les interférences créées en pointant un faisceau laser sur une bifente de largeur b et de distance a entre les deux fentes. La largeur des fentes étant suffisamment proche de l'ordre de grandeurs des longueurs d'ondes optiques, on observe une figure d'interférences modulée par une

figure de diffraction. Nous avons étudié la figure d'interférences (en particulier l'interfrange i) créée en fonction des paramètres de la bifente.

Le montage expérimentale est similaire à celui utilisé dans section 1, le fente simple étant remplacée par un composant rotatif comportant trois bifentes de dimension différentes. Une fois de plus, l'orientation et la position des composants ont été ajustées pour que le faisceau laser soit toujours en incidence normale, éclairant les deux fentes de manière symétrique.

2.1 Fentes de Young – partie 1

Pour cette première partie, on tente de trouver a et b de manière expérimentale. On fixe à présent la valeur fentes-écran à $D = 180 \pm 0.05$ cm. Se trouvant toujours dans le régime de Fraunhofer, on peut déduire b en mesurant Δy de l'enveloppe de diffraction (même méthode qu'avant). Les mesures d'interfranges sont obtenues en faisant la moyenne sur une dizaine de franges brillantes, ce qui nous permet d'avoir une mesure plus précise.

Lorsqu'on reste près de l'axe optique (angle θ de vue petit), on obtient la formule suivante pour l'interfrange :

$$i = \lambda \frac{D}{a} \quad (2)$$

À l'aide de ces relations théoriques on obtient les valeurs et incertitudes de a et b pour chacune des trois bifentes.

i (mm)	a (μm)	b (μm)
5.83 ± 0.3	201 ± 6	70.9 ± 6
3.75 ± 0.1	312 ± 9	67.8 ± 9
2.35 ± 0.08	499 ± 10	66.9 ± 10

TABLEAU 2 – Valeurs de a et b obtenus à partir des relations théoriques

2.2 Fentes de Young – partie 2

Pour cette seconde partie, nous avons mesuré l'interfrange pour des distances D différentes en utilisant la troisième bifente $a = 499 \pm 10$ μm . Après avoir tracé i en fonction de D , on fait un ajustement linéaire avec coefficient directeur m_2 .

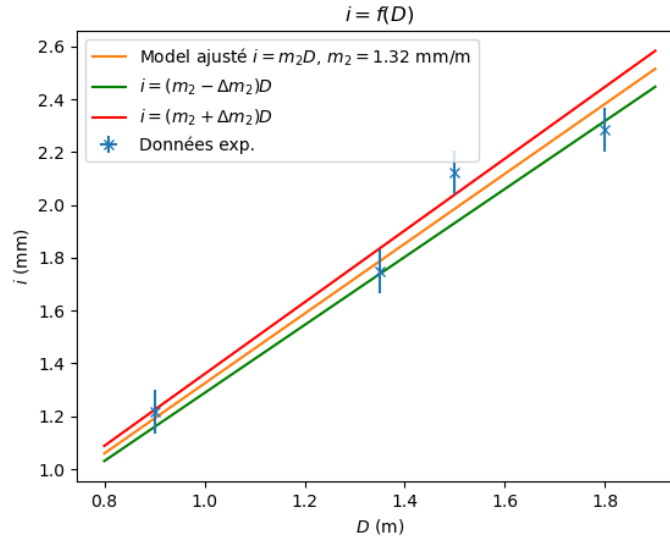


FIGURE 3 – Tracé des données expérimentales $i = f(D)$ (croix bleues) avec ajustement linéaire (courbe orange). On trace aussi les ajustements de pente maximale (courbe rouge) et de pente minimale (courbe verte) pour illustrer les valeurs de m_2 incluses dans les incertitudes.

L'incertitude relative de D étant très petite par rapport à celle de i ($\frac{\Delta D}{D} < 0.07\%$, indiscernable sur le tracé), on décide de la négliger dans le calcul de l'incertitude Δm_2 . Cela nous permet de continuer d'utiliser la fonction `curve_fit`, qui ne prend en compte que l'incertitude de la variable dépendante.

$$i = \lambda \frac{D}{a} = m_2 D \quad m_2 = \frac{\lambda}{a}$$

Connaissant déjà a pour cette bifente, il nous est maintenant possible de vérifier la longueur d'onde de notre laser. Pour le laser rouge, on trouve $\lambda = 660 \pm 26$ nm, valeur expérimentale concordant avec la longueur d'onde de 650 nm donnée par le fabricant.

2.3 Fentes de Young – partie 3

En fixant $D = 170 \pm 0.05$ cm, on mesure l'interfrange de la figure de diffraction avec un laser vert et un laser bleu avec la même bifente $a = 499 \pm 10$ μ m. Ayant déjà mesuré l'interfrange du laser rouge dans ces mêmes conditions, on en déduit la longueur d'onde des trois lasers à partir de la relation théorique (2) :

Laser	i (mm)	λ_{exp} (nm)	$\lambda_{\text{fabricant}}$ (nm)
Rouge	2.28 ± 0.08	633 ± 30	650
Vert	1.95 ± 0.05	540 ± 20	535
Bleu	1.47 ± 0.08	409 ± 30	405

TABEAU 3 – Valeurs de i avec les longueurs d'ondes de chaque laser déduit expérimentalement à partir de (2) pour $a = 499 \pm 10$ μ m et $D = 170 \pm 0.05$ cm. Les longueurs d'ondes fournies par le fabricants sont aussi notées dans la colonne à droite.

Nous obtenons des valeurs λ qui sont en accord avec celles données par le fabriquant, ainsi qu'avec nos mesures précédentes (pour le laser rouge). On vérifie, avec un ajustement linéaire, qu'en effet les variations de l'interfrange en fonction de la longueur d'onde vérifient bien la relation théorique linéaire (2).

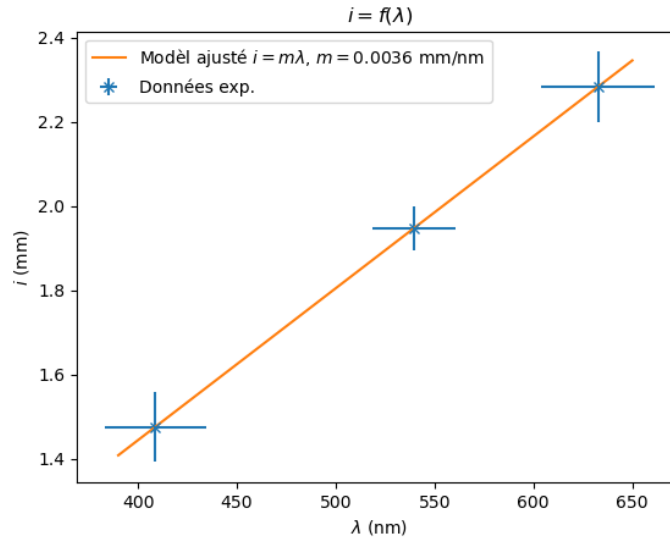


FIGURE 4 – Tracé des données expérimentales $i = f(\lambda)$ (croix bleus) avec ajustement linéaire (courbe orange).

3 Interférences à N ondes – réseau

Dans cette troisième expérience, on se penche sur les propriétés optiques des réseaux à diffractions, qui peuvent être vus comme la généralisation à N fentes de la bifente de Young, tous séparés par une distance a . Chaque réseau est caractérisé par son pas $N = 1/a$, représentant le nombre de fentes (sinon appelées "traits") par unité de longueur.

Sur la figure d'interférence d'un réseau, les positions des franges brillantes sont les mêmes quelle que soit la valeur de N (y compris $N = 2$). Donc l'interfrange est toujours donné par l'équation (2) utilisée précédemment pour la bifente :

$$i = \lambda \frac{D}{a}$$

Par manque de temps, nous avons que réussi à prendre des mesures pour le réseau $N = 100$ traits/mm.

Nous avons placé et orienté le laser rouge et le réseau sur le banc optique de manière à avoir une incidence normale du faisceau laser. Nous avons ensuite mesuré l'interfrange sur un écran placé à $D = 33.4 \pm 1$ cm en prenant la moyenne sur 6 franges brillantes. Nous n'avons pas réussi à fixer cet écran au banc optique et on a été contraint de le maintenir en place manuellement, d'où l'incertitude plus importante. Par manque de place nous n'avons pas pu placer l'écran plus loin du réseau, or a étant de l'ordre du micron on peut toujours considérer l'approximations des petits angles.

On a mesuré pour le laser rouge une interfrange de $i = 24.9 \pm 0.3$ mm. Si on prend la longueur d'onde donnée par le fabricant de $\lambda_r = 650$ nm, on est capable de déterminer une valeur expérimentale pour le pas du réseau :

$$a = 8.71 \pm 0.3 \text{ } \mu\text{m} \quad N = 115 \pm 4 \text{ traits/mm}$$

Par rapport à la valeur du fabricant, cette mesure indirecte présente une erreur assez grande qui n'est pas couverte pas les incertitudes de mesures qui ont été considéré. Ceci est probablement dû au fait que l'écran n'était pas suffisamment parallèle à la fente, ce qui aurait formé une figure d'interférences déformée et donc faussé nos mesures de l'interfrange.

Dans la dernière partie de cette expérience, on se sert de la valeur a trouvé expérimentalement pour estimer la longueur d'onde du laser bleu. Nous avons placé le laser bleu dans le montage, et nous avons mesuré l'interfrange dans approximativement les mêmes conditions qu'avant en prenant la moyenne sur 12 franges brillantes.

On mesure pour ce laser bleu un interfrange de $i = 13.9 \pm 0.2$ mm. Prenant la valeur du pas N trouvé précédemment, on trouve pour le laser bleu :

$$\lambda_{b,exp} = 420 \pm 80 \text{ nm}$$

Compte tenu des circonstances, c'est un valeur satisfaisante qui est en concordance avec nos resultats de l'expérience précédente. Toutefois, dans de meilleurs conditions, on aurait pu s'attendre à une plus grande précision comparée aux mesures avec la bifente. En effet, les franges brillantes sur la figure d'interférences du réseaux sont beaucoup plus fines que les franges correspondantes sur la figure de la bifente. Cela pourrait permettre de mesurer la position des franges avec une plus grande exactitude. Or, dans le cas des trois dernières expériences, la précision des mesures a été visiblement limité par la méthode par laquelle nous avons mesuré l'interfrange. Afin d'exploiter au mieux les interférences créées par le réseau, il faut utiliser un instrument de mesure plus précise.

4 Réseau de diffraction

Nous avons vu dans la partie précédente que la valeur des interfranges créées avec un réseau de diffraction est proportionnelle à la longueur d'onde de la source lumineuse. Et contrairement à la bifente de Young, le réseau crée des maxims très raides. Cette propriété du réseau le rend particulièrement utile dans des mesures spectroscopiques, car elle nous permet de distinguer des différences de longueurs d'ondes minimes.

Le but de cette manipulation est de déterminer les longueurs d'ondes des raies d'émission d'une lampe à mercure grâce à l'étude d'un réseau de fentes par transmission et d'un goniomètre qui nous permettra d'effectuer des mesures d'angles avec une grande précision.

On commence par calibrer le goniomètre ainsi que la position du réseau ($N = 300$ traits/mm) sur le goniomètre. On s'assure en particulier que le faisceau laser est en incidence normale avec le réseau $i_0 = 0$. Lorsque le goniomètre est centré sur la frange centrale $p = 0$ on mesure la décalage angulaire du goniomètre à $\alpha_0 = 5'$, qui est pris en compte dans l'analyse des données.

On mesure les angles α_p auxquels on observe chacune des raies à l'ordre $p = 1$. En raison de l'extrême sensibilité du goniomètre, qui se déplace même au plus petit mouvement, nous avons considérée une incertitude de mesure de $2'$ ($\approx 5.8 \times 10^{-4}$ rad). On y ajoute le décalage angulaire α_0 du goniomètre afin d'obtenir l'angle de vue i_p pour chaque raie.

$$i_p = \alpha_p + \alpha_0$$

En incidence normale et à l'ordre $p = 1$, nous avons la relation suivante entre λ et i_p :

$$\lambda = a \sin(i_p) \quad (3)$$

On est donc capable de déduire la longueur d'onde de chacune des raies d'émission ainsi que de calculer une incertitude en propagéant les incertitudes sur β_p .

Raie	α_p (rad)	i_p (rad)	λ (nm)
Violet 1	0.121	0.122	406 ± 2
Violet 2	0.122	0.123	409 ± 2
Bleu	0.131	0.133	442 ± 2
Turquoise 1	0.145	0.147	488 ± 2
Turquoise 2	0.148	0.150	498 ± 2
Vert	0.163	0.165	548 ± 2
Jaune 1	0.173	0.175	580 ± 2
Jaune 2	0.174	0.176	584 ± 2
Rouge	0.186	0.188	623 ± 2

TABLEAU 4 – Longueurs d'ondes λ calculées pour chaque raie avec leurs angle de vues correspondant

En analysant les longueurs d'onde découvertes, on constate que le réseau nous a permis de distinguer plusieurs paires de raies présentant des différences de longueur d'onde l'ordre de seulement quelques nanomètres. Ceci est un résultat particulièrement impressionnant, car cela démontre la précision et la sensibilité du réseau dans la détection de variations infimes des longueurs d'onde.