

# Diffractions et interférences multiples pour la spectroscopie



## Étudiants :

Céline COUEFFE  
Laurène MOSBACH

José GRIMALDI  
Camille PREZOT

Enseignant-responsable du projet :  
David HONORÉ



**Date de remise du rapport :** 19/06/2017

**Référence du projet :** STPI/P6/2017 – 15

**Intitulé du projet :** Diffractions et interférences multiples pour la spectroscopie

**Type de projet :** Expérimental, modélisation

**Objectifs du projet :**

L'objectif de notre projet a été de trouver une méthode qui permettrait de trouver la longueur d'onde d'un faisceau lumineux inconnu. Nous avons aussi eu pour objectif de trouver les conditions optimales de diffraction et d'interférences adaptées à la spectroscopie.

**Mots-clefs du projet :** Diffraction, Interférences, Modélisation

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>1 Méthodologie, organisation du travail</b>	<b>5</b>
<b>2 Aspect théorique des phénomènes optiques</b>	<b>6</b>
2.1 Partie historique . . . . .	6
2.2 Partie théorique de la diffraction . . . . .	7
2.3 Partie théorique des interférences . . . . .	9
<b>3 Optimisation des conditions expérimentales</b>	<b>11</b>
3.1 Méthodologie de l'analyse . . . . .	11
3.2 Effets des capteurs . . . . .	11
3.2.1 Photodiode ponctuelle . . . . .	11
3.2.2 Photodiode à molette . . . . .	12
3.2.3 Caméra CCD . . . . .	14
3.3 Effets de la distance fente-capteur . . . . .	15
3.4 Effets de la largeur des fentes . . . . .	17
<b>4 Montage à deux lasers</b>	<b>19</b>
4.1 Mode opératoire et montage . . . . .	19
4.2 Diffraction à deux lasers . . . . .	20
4.3 Interférences . . . . .	21
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>24</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>25</b>
<b>A Ensemble des résultats obtenus</b>	<b>26</b>

# Introduction

Dans le cadre des projets de physique, nous avons choisi le sujet : diffractions et interférences pour la spectroscopie. Notre projet consistait donc à trouver le montage optique de diffractions/interférences le plus adapté à la mesure de longueur d'onde d'un laser. Pour cela, nous nous sommes dans un premier temps intéressés à la théorie de la diffraction et des interférences pour savoir quelles mesures effectuer et quelles expériences mettre en place. L'objectif de l'analyse théorique est de réussir à faire la modélisation du phénomène de diffraction et d'interférences. Ensuite, nous avons pu commencer nos mesures et exploiter les résultats à l'aide des courbes théoriques trouvées pendant nos recherches.

# Chapitre 1

## Méthodologie, organisation du travail

Nous avons mis en place un planning afin de mieux répartir les tâches et mieux gérer l'avancement du projet (voir annexe). Il a dû être adapté à l'évolution de notre projet à cause des différents problèmes rencontrés, notamment en début de projet, où le choix des montages appropriés a été plus difficile que prévu, ce qui a retardé notre planning.

Nous étions un groupe de quatre, nous avons donc formé deux groupes de deux personnes :

- Camille et Céline se sont occupées de la partie théorique, ainsi que du montage avec la photodiode à molette.
- Laurène et José se sont occupés de la partie expérimentale, et de l'exploitation des résultats.

En ce qui concerne le rapport, nous nous sommes répartis chacun une partie, de sorte que tout le monde participe à la rédaction en fonction des tâches effectuées par chacun.

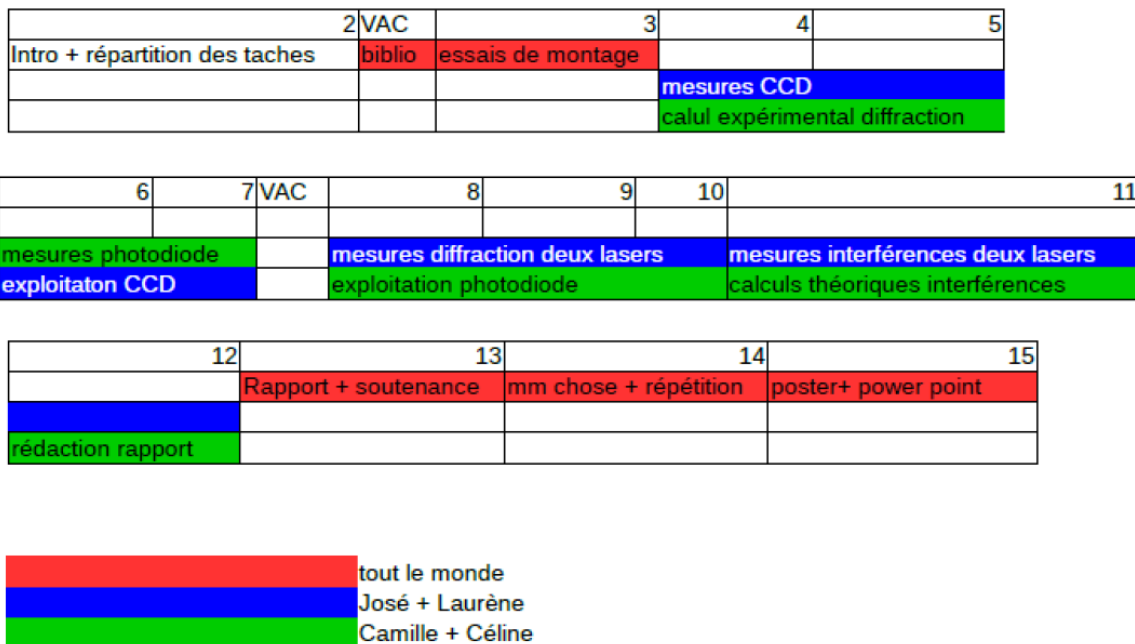


FIGURE 1.1 – Schéma des tâches réalisées par étudiant

## Chapitre 2

# Aspect théorique des phénomènes optiques

### 2.1 Partie historique

Aujourd'hui nous savons que les interférences et la diffraction sont la marque du caractère ondulatoire de la lumière, mais pour arriver à cette certitude il a fallu le travail de nombreux hommes.

La diffraction fut découverte par Francesco Grimaldi (1618-1663). Ce phénomène, tout comme les interférences, fut correctement énoncé par Christian Huygens (1629-1695) dans son *Traité de la lumière* écrit en 1678 et publié en 1691. Dans ce dernier, il posa les bases de la théorie ondulatoire de la lumière. Il supposait que la lumière se propageait sous la forme d'ondes sphériques et que chaque point atteint par l'onde pouvait être transformé en une nouvelle source. Ainsi ces deux phénomènes sont une manifestation du caractère ondulatoire de la lumière. Il raisonnait par analogie avec la propagation des ondes à la surface de l'eau ou des ondes sonores dans l'air. Pour lui, la vibration lumineuse était longitudinale et avait besoin d'un milieu matériel pour se propager.

Les preuves expérimentales des hypothèses faites sur les interférences lumineuses furent données par Thomas Young (1773-1829) vers 1804. Il s'intéressait à la diffraction, aux franges des lames minces et on peut considérer qu'il a découvert les interférences en faisant passer la lumière issue d'une source ponctuelle à travers deux petits trous voisins. Ces trous devenaient deux sources cohérentes émettant des faisceaux divergents par diffraction. Sur un écran éloigné, dans la zone de recouvrement des faisceaux, il observait des franges d'interférences. Il exécuta des mesures, et sur la base d'un modèle ondulatoire qui sera exposé plus loin, il put évaluer la longueur d'onde de la lumière pour différentes couleurs. Augustin Fresnel (1788-1827) réalisa les preuves pour la diffraction, en effet il énonça les fameux principes d'Huygens-Fresnel : "Soit une onde monochromatique incidente sur une ouverture. Tout élément de surface de l'ouverture peut être considéré comme une source secondaire, se propageant de proche en proche." L'amplitude de l'onde émise par cette source secondaire est proportionnelle à la somme de chacun des éléments de surface de l'onde incidente. Les ondes émises par ces différentes sources interfèrent entre elles pour donner l'onde diffractée. Il permet grâce à un calcul intégral de retrouver précisément l'allure des figures de diffraction. Par la suite Fresnel énonce un autre principe avec Fraunhofer (1787-1823) qui donne les bases de la diffraction : "Lorsqu'on se place en champ lointain, le rayon de courbure des ondes sortantes diffractées devient très grand, si bien que ces ondes peuvent être approximées par des ondes planes." De plus, Fresnel imagina deux nouveaux dispositifs

pour obtenir des interférences : les miroirs et le biprisme dits de Fresnel.

Ainsi grâce à la recherche et au travail de tous ces hommes, nous pouvons comprendre les phénomènes de diffractions et d'interférences dus au caractère ondulatoire de la lumière.

## 2.2 Partie théorique de la diffraction

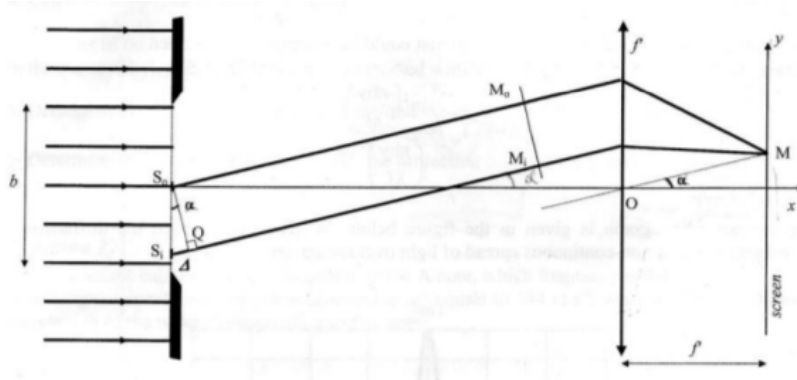


FIGURE 2.1 – Schéma de la diffraction

Nous cherchons donc l'expression de l'intensité en fonction de la position  $y$  sur l'écran. L'expression du champ électrique de l'onde  $S$  quelconque est :

$$d\vec{E}_i(S_i) = E_0 ds e^{j(\omega t - \varphi)} \vec{z}_0$$

Le champ électrique total  $\vec{E}_{ap}$  est la somme des champs électriques pour toutes les sources :

$$\begin{aligned} \vec{E}_{ap} &= d\vec{E}_0(S_0) + d\vec{E}_1(S_0) \dots \\ &= \int d\vec{E}_i(S_i) \\ &= \int_{\frac{-b}{2}}^{\frac{b}{2}} E_0 ds e^{j(\omega t - \varphi)} \vec{z}_0 \\ &= E_0 e^{j(\omega t - \varphi)} \int_{\frac{-b}{2}}^{\frac{b}{2}} ds \vec{z}_0 \\ &= E_0 e^{j(\omega t - \varphi)} b \vec{z}_0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

L'intensité totale sur l'écran est :

$$\begin{aligned} I_{ap} &= \frac{a_e}{2} E_{ap} \cdot E_{ap}^* \\ &= \frac{a_e}{2} E_0 b e^{j(\omega t - \varphi)} \vec{z}_0 \cdot E_0 b e^{-j(\omega t - \varphi)} \vec{z}_0 \\ &= \frac{a_e}{2} (E_0 b)^2 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Le champ électrique  $d\vec{E}_0(M_0)$  à la position  $M_0$  sur l'écran et au temps  $t$  est :



$$\begin{aligned}
 d\vec{E}_0(M_0; t) &= d\vec{E}_0(S_0; t - \tau) : \text{avec} : \tau = \frac{d}{c} \\
 &= E_0 d s e^{j(\omega(t-\tau)-\varphi)} \vec{z}_0 \\
 &= E_0 d s e^{j(\omega(t-\frac{d}{c})-\varphi)} \vec{z}_0 \\
 &= E_0 d s e^{j(\omega t - \frac{\omega d}{c} - \varphi)} \vec{z}_0 \\
 &= E_0 d s e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} - \varphi)} \vec{z}_0
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Le champ électrique  $d\vec{E}_i(M_i)$  à la position  $M_i$  sur l'écran et au temps  $t$  est

$$\begin{aligned}
 d\vec{E}_i(M_i; t) &= d\vec{E}_i(S_i; t - \tau_i) : \text{avec} : \tau_i = \frac{d + \delta}{c} \\
 &= E_0 d s e^{j(\omega t - \frac{2\pi(d+\delta)}{\lambda} - \varphi)} \vec{z}_0
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Le champ électrique total sur M sur l'écran est :

$$\begin{aligned}
 \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} d\vec{E}_i(M_i) &= E_0 e^{j(\omega t - \varphi)} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{j(\frac{2\pi(d+\delta)}{\lambda})} ds \vec{z}_0 \\
 &= E_0 e^{j(\omega t - \varphi)} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{j(\frac{2\pi(d+S_i \sin(\alpha))}{\lambda})} ds \vec{z}_0 \\
 &= E_0 e^{j(\omega t - \varphi)} \left[ \frac{e^{j(\frac{2\pi(d+S_i \sin(\alpha))}{\lambda})}}{\frac{j2\pi \sin(\alpha)}{\lambda}} \vec{z}_0 \right]_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \\
 &= \frac{E_0 e^{j(\omega t - \varphi)} \lambda}{j2\pi \sin(\alpha)} (e^{j(\frac{2\pi(d-\frac{b}{2} \sin(\alpha))}{\lambda})} - e^{j(\frac{2\pi(d+\frac{b}{2} \sin(\alpha))}{\lambda})}) \\
 &= \frac{E_0 \lambda}{j2\pi \sin(\alpha)} e^{j(\omega t - \varphi - \frac{2\pi d}{\lambda})} (e^{j(\frac{b \sin(\alpha) 2\pi}{2\lambda})} - e^{-j(\frac{b \sin(\alpha) \pi i}{2\lambda})}) \\
 &= \frac{E_0 \lambda}{j2\pi \sin(\alpha)} e^{j(\omega t - \varphi - \frac{2\pi d}{\lambda})} 2j \sin(\frac{b \sin(\alpha) \pi}{\lambda}) \text{ or } \sin(\alpha) = \frac{y}{f'} \\
 &= \frac{E_0 \lambda f'}{j2\pi y} e^{j(\omega t - \varphi - \frac{2\pi d}{\lambda})} 2j \sin(\frac{\pi b y}{\lambda f'})
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Donc l'intensité mesurée sur l'écran est :

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{a_e}{2} E(M) \cdot E^*(M) \\
 &= \frac{a_e}{2} \left( \frac{E_0 \lambda f'}{j\pi i y} 2j \sin(\frac{\pi b y}{\lambda f'}) \right)^2 * \left( \frac{b}{b} \right) \\
 &= \frac{a_e}{2} (E_0 b)^2 * \frac{\sin^2(\frac{\pi b y}{\lambda f'})}{(\frac{\pi y b}{\lambda f'})^2} \\
 &= I_{ap} \frac{\sin^2(\frac{\pi b y}{\lambda f'})}{(\frac{\pi b y}{\lambda f'})^2}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Grâce à cette relation, il est possible de tracer le graphe  $I=f(y)$  et ainsi déterminer la longueur d'onde du laser passant par la fente.

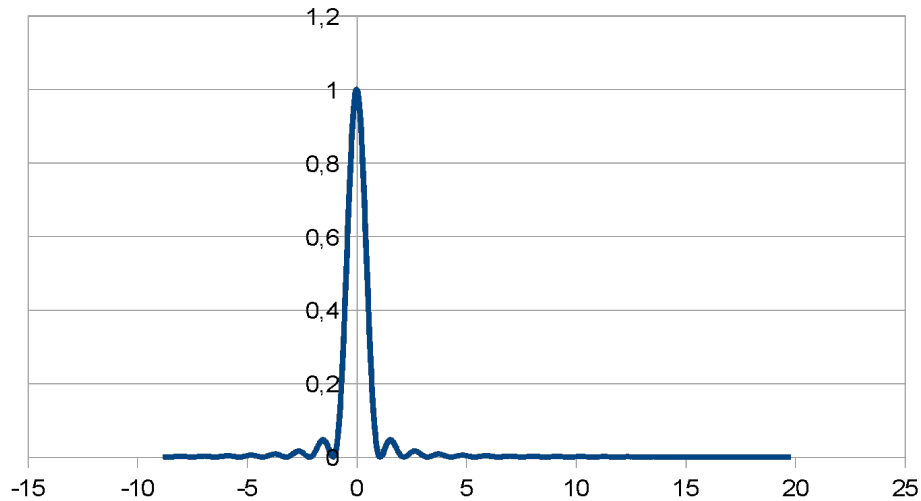


FIGURE 2.2 – Allure de la courbe théorique de la diffraction

### 2.3 Partie théorique des interférences

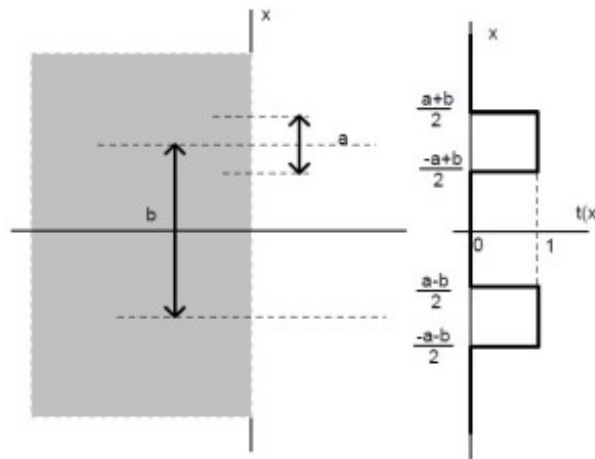


FIGURE 2.3 – Schéma des interférences

Nous cherchons donc l'expression de l'intensité en fonction de la position  $y$  sur l'écran. Les deux ondes ont la même phase et la même amplitude, donc les champs électriques en  $S_1$  et  $S_2$  sont :

$$E(S_1) = E(S_2) = E_0 e^{-j\omega t}$$

L'amplitude du champ est donnée en multipliant la transformée de Fourier par l'amplitude du champ incident soit :

$$E(X) = e^{j\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} t(x) e^{-j \frac{Xx}{\lambda D}} dx$$

Les interférences peuvent être destructives ou constructives, ainsi :  $t(x)=1$  si  $x \in \left[ \frac{b}{2} - \frac{a}{2}; \frac{b}{2} + \frac{a}{2} \right]$  U  $\left[ -\frac{b}{2} - \frac{a}{2}; -\frac{b}{2} + \frac{a}{2} \right]$ ;  $t(x)=0$  sinon. Donc le champ électrique en M vaut :

$$E(X) = E_0 \int_{\left(\frac{b}{2}-\frac{a}{2}\right)}^{\left(\frac{b}{2}+\frac{a}{2}\right)} e^{-j \frac{Xx}{\lambda D}} dx + E_0 \int_{\left(-\frac{b}{2}-\frac{a}{2}\right)}^{\left(-\frac{b}{2}+\frac{a}{2}\right)} e^{-j \frac{Xx}{\lambda D}} dx$$

$$E(X) = E_0 e^{-j\omega t} \left( \frac{e^{-j \frac{\pi X(b+a)}{\lambda D}} - e^{-j \frac{\pi X(b-a)}{\lambda D}}}{\frac{-2j\pi X}{\lambda D}} + \frac{e^{j \frac{\pi X(b-a)}{\lambda D}} - e^{-j \frac{\pi X(b+a)}{\lambda D}}}{\frac{-2j\pi X}{\lambda D}} \right)$$

$$E(X) = E_0 e^{-j\omega t} \left( e^{-j\frac{\pi X b}{\lambda D}} \frac{e^{-j\frac{\pi X a}{\lambda D}} - e^{-j\frac{\pi X a}{\lambda D}}}{-2j\frac{\pi X}{\lambda D}} + e^{j\frac{\pi X b}{\lambda D}} \frac{e^{-j\frac{\pi X a}{\lambda D}} - e^{-j\frac{\pi X a}{\lambda D}}}{-2j\frac{\pi X}{\lambda D}} \right)$$

$$E(X) = E_0 e^{-j\omega t} \left( e^{-j\frac{\pi X b}{\lambda D}} + e^{j\frac{\pi X b}{\lambda D}} \right) \frac{e^{-j\frac{\pi X a}{\lambda D}} - e^{-j\frac{\pi X a}{\lambda D}}}{-2j\frac{\pi X}{\lambda D}}$$

$$E(X) = E_0 \cos\left(\frac{\pi b}{\lambda D}\right) \frac{\sin\left(\frac{\pi X a}{\lambda D}\right)}{\frac{\pi X a}{\lambda D}}$$

L'intensité vaut donc :

$$I = \frac{a_e}{2} E(M) \cdot E^*(M) \tag{2.7}$$

$$I(X) = \frac{a_e}{2} E_0^2 \cos^2\left(\frac{\pi b}{\lambda D}\right) \frac{\sin^2\left(\frac{\pi X a}{\lambda D}\right)}{\left(\frac{\pi X a}{\lambda D}\right)^2}$$

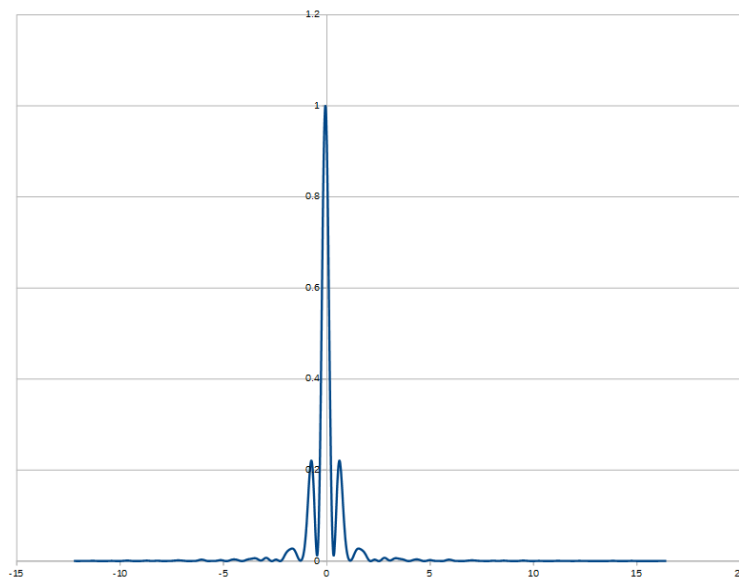


FIGURE 2.4 – Allure de la courbe théorique des interférences

## Chapitre 3

# Optimisation des conditions expérimentales

### 3.1 Méthodologie de l'analyse

Le but de notre projet est de réaliser un montage expérimental optimal afin de mesurer une longueur d'onde inconnue. Après avoir étudié la partie théorique du problème, nous pouvons désormais nous concentrer sur la partie expérimentale. En effet, il s'agit maintenant de trouver un montage qui va permettre de réaliser les acquisitions les plus précises possible se rapprochant au mieux des courbes théoriques calculées avec les mêmes paramètres expérimentaux. Pour cela, nous allons analyser chacun des différents paramètres pouvant modifier la précision des acquisitions de notre montage. Notre montage se compose d'un laser, d'une fente et d'un capteur, ces derniers sont espacés d'une distance  $D$ .

Nous allons dans un premier temps déterminer le capteur optimal dans ce montage. Nous en avons plusieurs à notre disposition : une photodiode ponctuelle, une photodiode à molette et une caméra CCD. Nous allons tenter de faire des mesures pour chaque capteur et les comparer à la courbe théorique correspondante. Une fois le capteur choisi, nous réaliserons des acquisitions à plusieurs distances fente-capteur pour évaluer les effets de ce paramètre. Enfin, nous changerons de largeur de fente pour étudier l'influence de ce paramètre. De plus, nous avons par la suite rajouté des polariseurs pour ajuster l'intensité du rayon laser sur les capteurs mais ils ne rentrent pas en compte dans la précision du résultat, ils ne seront donc pas analysés.

### 3.2 Effets des capteurs

#### 3.2.1 Photodiode ponctuelle

Au début, nous avons eu l'idée de déplacer la photodiode ponctuelle pour obtenir des valeurs sur la largeur de la tache. Seulement, nous avons un problème de support, nous ne trouvons pas de moyen pour déplacer la photodiode avec précision (vitesse constante). De plus, nous avons remarqué que le laser était trop lumineux et entraînait la saturation de la photodiode. Nous avons donc mis en place deux polariseurs pour réguler l'intensité lumineuse. Nous avons donc eu l'idée de déplacer la source. Pour cela, nous avons pensé à déplacer la fente en pensant que le faisceau du laser sera assez large pour voir la tache de diffraction sur la photodiode. Seulement, après un test de déplacement, nous avons re-

marqué que la tache disparaissait trop tôt, il était donc impossible d'utiliser cette idée pour mesurer la largeur de la tache de diffraction. Nous avons donc pensé à utiliser une lentille divergente afin d'élargir le faisceau du laser. Après plusieurs essais de lentilles, nous n'avons pas trouvé cette idée concluante car le faisceau éclairait plusieurs fentes à la fois, nous ne pouvions donc pas observer de tache de diffraction. Nous avons donc abandonné l'idée de déplacer les fentes et pensé à l'éventualité de déplacer l'ensemble fente/laser. Mais nous n'avions pas d'idée pour la fixation de cet ensemble sur la plaquette micrométrique. Nous avons donc décidé d'abandonner l'idée d'utiliser une photodiode ponctuelle. Nous avons donc décidé d'utiliser une photodiode ponctuelle avec déplacement à molette, ainsi qu'une caméra CCD.

### 3.2.2 Photodiode à molette

Nous avons décidé de comparer la précision de la diode à déplacement à molette et celle de la caméra CCD. Pour cela, nous avons tracé expérimentalement la courbe de diffraction, soit l'intensité reçue par la diode en fonction de sa position. Cette acquisition a été faite à l'aide de synchronie.

Afin d'analyser nos résultats nous avons comparé nos courbes à celle théorique. Pour réussir à comparer ces courbes nous avons dû les normaliser car lors du calcul de la courbe théorique nous avons divisé par un coefficient  $I_{ap}$  (non présent dans l'acquisition expérimentale), afin que l'intensité maximale soit égale à 1. Nous nous sommes aperçus que, comparée à la courbe théorique, notre courbe expérimentale était très simplifiée. En effet, on n'observe qu'un seul pic significatif, contrairement à la courbe théorique qui comporte plusieurs pics.

On voit aussi que la courbe expérimentale est au dessus de la courbe théorique. On peut penser que cette différence est due à la taille de la photodiode. Ce décalage entre la courbe théorique et expérimentale est donc dû à un problème de résolution spatiale. En effet, celle-ci mesure 4 mm, donc elle ne mesure pas l'intensité en un point, mais sur une plage de 4mm. Par exemple, en 0, elle mesure l'intensité sur les positions comprises entre -2mm et 2mm, ce qui modifie les résultats. Pour essayer de vérifier cette hypothèse de problème de résolution spatiale, nous avons pensé qu'au lieu de prendre pour chaque point son intensité théorique exacte, nous allons sommer les intensités théoriques avant et après ce point dans un intervalle fixé. Nous avons décidé de faire des sommes sur un intervalle de  $[-70,+70]$ ;  $[-50,+50]$ ;  $[-30,+30]$ . (Voir annexe A)

On voit que quand on somme sur un grand nombre de points, les taches secondaires sont prises en compte; ce qui change la forme de la courbe, notamment le maximum.

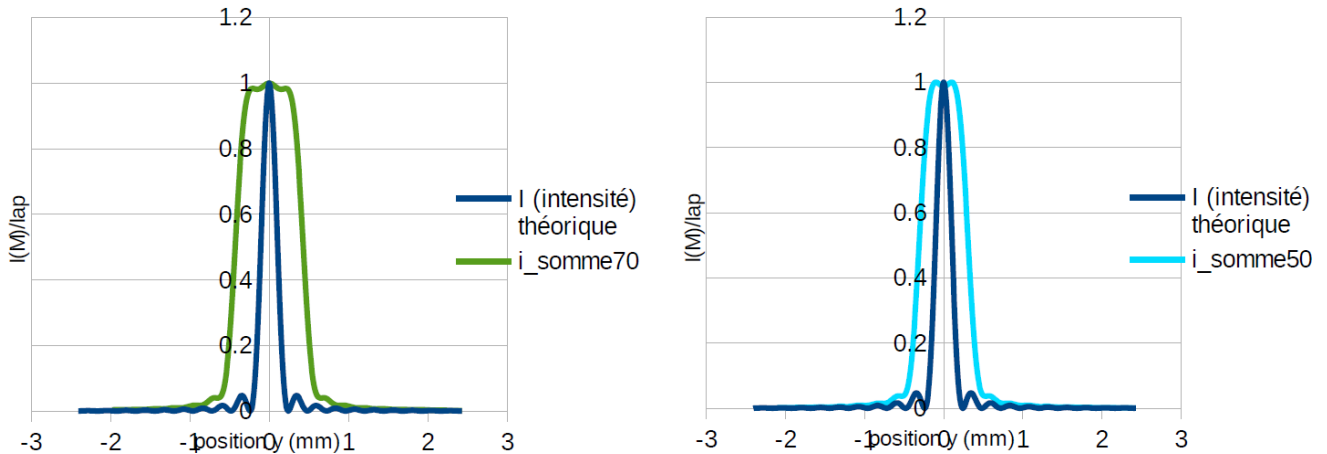


FIGURE 3.1 – Courbes des intensités en fonction des intervalles

En effet, ici, la somme est sur un grand intervalle, et on voit que, quand on est un peu excentré à gauche ou à droite, l'intervalle prend en compte toute la tache secondaire et une partie de la tache centrale. De plus, la somme de ces intensités est supérieure à l'intervalle contenant uniquement la tache centrale, ce qui a pour résultat de décaler la position du maximum.

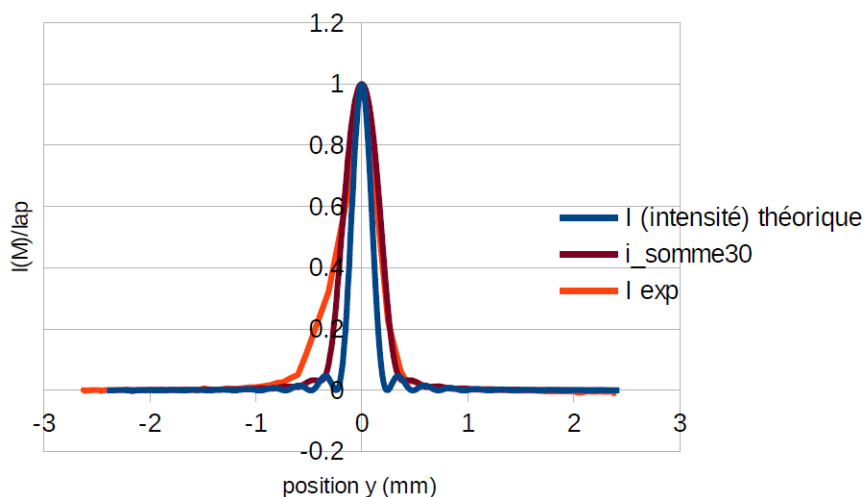


FIGURE 3.2 – Courbes des intensités en fonction des intervalles

On voit que la somme sur 30 points est celle qui correspond le plus à notre courbe expérimentale. Ainsi, cela montre que la différence entre les courbes théorique et expérimentale est due à un problème de résolution spatiale de la photodiode.

De plus, on remarque que la courbe expérimentale ne descend jamais jusqu'à 0. Cela est dû au fait que l'expérience n'a pas été faite dans le noir complet, il y a donc eu du bruit. Nous avons dû ici aussi recalibrer les résultats expérimentaux pour pouvoir correctement les comparer aux théoriques. On peut conclure que la photodiode n'est donc pas un choix précis.

### 3.2.3 Caméra CCD

Suite aux manques de précision observés par les acquisitions à l'aide d'une photodiode, nous avons donc décidé de changer de capteur et d'essayer de réaliser des acquisitions au moyen d'une caméra CCD.

Nous avons donc commencé par s'initier à l'utilisation du logiciel d'acquisition Calliens adapté à l'utilisation d'une telle caméra. Nous avons connu plusieurs difficultés durant la prise en main du logiciel, notamment pour obtenir une image exploitable par la suite, dans un format excel par exemple. Concernant le montage expérimental, nous avons également rencontré divers problèmes tels que la gestion des prises, la longueur des câbles et la disposition sur la paillasse (lasers, caméra, ordinateurs, lampe, bancs optiques). De même, il fallait faire preuve d'une grande précision pour assurer l'alignement parfait horizontal et vertical du rayon diffracté sur la barrette de capteurs de la caméra. Toute cette mise en place nous a pris environ deux séances car ces problèmes qui peuvent paraître anodins demandent beaucoup de temps et de réflexion afin de réaliser un montage expérimental opérationnel pour les acquisitions.

Le logiciel Calliens permet de traduire en coordonnées en pixels la courbe de l'éclairement en fonction de l'abscisse de la barrette de capteurs. Ainsi nous avons pu tracer à l'aide d'un tableur la courbe expérimentale afin de la comparer avec la courbe théorique modélisée préalablement en prenant en compte les paramètres expérimentaux des acquisitions. Nous avons normalisé les courbes afin de centrer le maximum sur 0 et définir la valeur maximum sur 1 en ordonnée. (Voir annexe A)

Comparaison des courbes expérimentales et théoriques :

Nous les avons tout d'abord superposées sur un même graphique pour se rendre compte visuellement des différences entre les deux courbes. Pour l'exemple de la distance fente-écran 40cm, la superposition est présente en figure 3.3 :

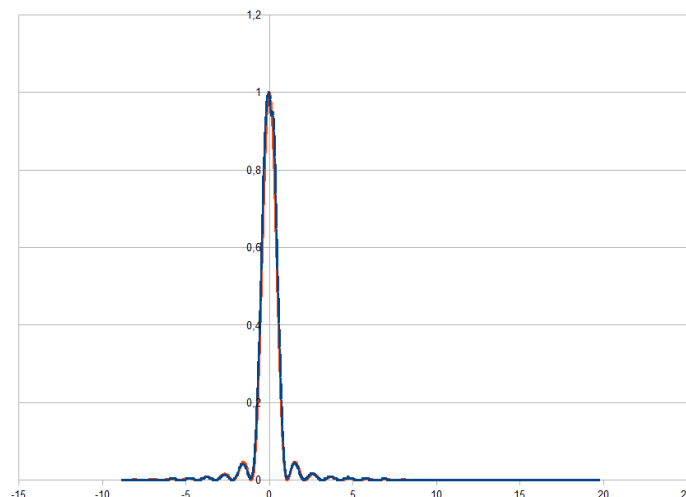


FIGURE 3.3 – Courbes expérimentale et théorique superposées pour une fente de 0,2 et une distance de 40 cm (en bleu : courbe expérimentale, en rouge : courbe théorique)

On se rend bien compte sur cette comparaison que la courbe obtenue à partir de la caméra CCD est très ressemblante à la courbe théorique. En effet, on retrouve la présence des pics principaux de la figure de diffraction aux mêmes emplacements pour les deux courbes

ce qui conduit à la superposition très précise des deux courbes.

Nous optons donc pour continuer les acquisitions avec la caméra CCD car les résultats obtenus sont beaucoup plus proches des valeurs théoriques que les valeurs obtenues à l'aide de la photodiode.

### 3.3 Effets de la distance fente-capteur

Nous avons effectué quatre acquisitions à plusieurs distances fente-écran en conservant la même largeur de fente pour comparer l'effet de la distance sur la superposition plus ou moins précise de la courbe expérimentale sur la courbe théorique. Nous avons choisi les distances de 40, 60, 80 et 100 centimètres avec une largeur de fente de 0.2 millimètres.

Nous pouvons rapidement nous rendre compte en observant les différentes superpositions que la comparaison entre les deux courbes est très difficile à quantifier visuellement et nous avons donc opté pour une comparaison calculatoire entre les deux courbes afin d'estimer à quelle distance fente-écran les deux courbes sont les plus ressemblantes. Pour cela nous avons eu l'idée de calculer une valeur qui rendrait compte du décalage entre ces deux courbes.

Il a fallu calculer le pas des points expérimentaux afin de reproduire celui-ci pour la courbe théorique et ainsi obtenir des courbes avec un nombre de points identique apparemment deux à deux à la même abscisse. Grâce à cela, nous avons pu calculer pour chaque point de l'abscisse  $|y_{théorique} - y_{exp}|$ . En additionnant toutes ces valeurs, nous avons obtenu une valeur qui correspond donc à la différence d'aire sous la courbe entre les deux courbes et pourrait rendre compte de la superposition plus ou moins précise entre les deux courbes. Nous avons tracé les valeurs de cette erreur en fonction de la position sur la barrette pour la distance de 40 centimètres :

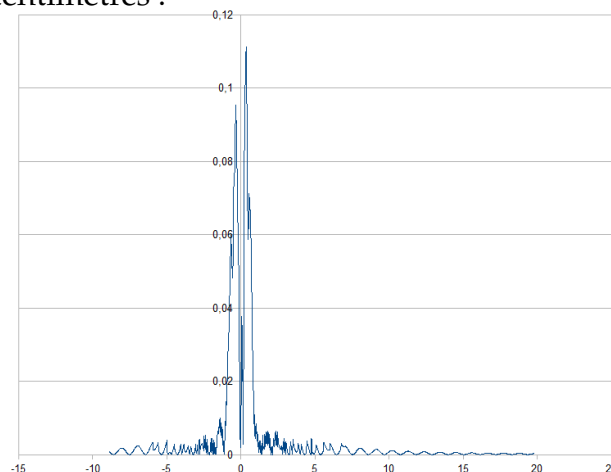


FIGURE 3.4 – Courbe de l'erreur en fonction de la position sur la barrette de la caméra pour une distance de 40cm

On peut remarquer grâce à cette courbe que l'erreur la plus importante se situe au niveau de la tache centrale de la figure de diffraction.

Nous supposons que le paramètre qui constitue le plus d'incertitudes serait la distance  $D$  fente-écran, en effet celle-ci a été mesurée directement sur le banc optique à l'aide d'un mètre. Nous avons donc essayé de déterminer la distance réelle en modifiant pas à pas ce



paramètre dans la modélisation de la courbe théorique dans le but de trouver la valeur minimale de la différence entre les deux courbes. Mais en continuant à observer la superposition des deux courbes tout en changeant cette distance, nous nous apercevons que la valeur minimale de l'erreur ne correspond pas à la meilleure superposition que l'on pourrait évaluer visuellement. Nous interprétons ce résultat par le fait que l'incertitude sur le pic pourrait avoir une influence trop importante sur la valeur de l'erreur et qui pourrait fausser ce résultat. En effet, en décalant la courbe, la valeur de l'erreur sur le pic se révèle parfois moins importante mais elle se décale sur les positions des plus petits pics, qui seraient moins influents sur la valeur de cette erreur. La figure 3.5 présente l'erreur en fonction de la position pour une valeur de 43cm, l'erreur totale est moins élevée mais nous remarquons que l'erreur s'est dissipée sur les plus petits pics, ce qui n'est pas le résultat souhaité.

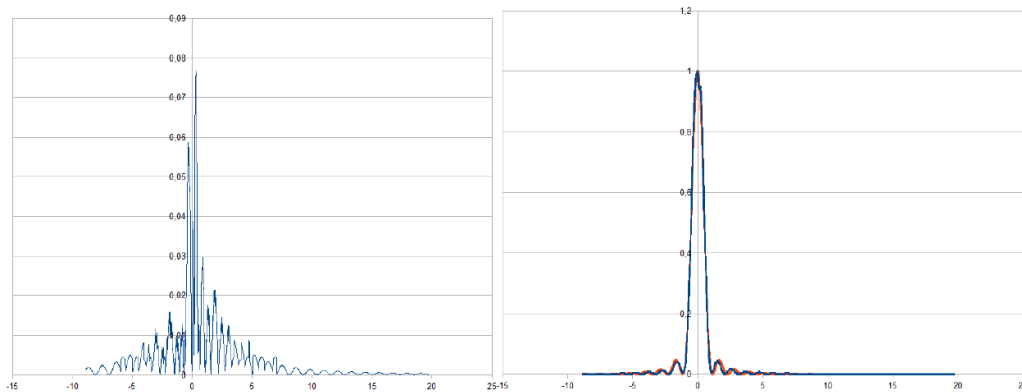


FIGURE 3.5 – Courbe de l'erreur et courbes théorique et expérimentale superposées

Nous en concluons donc que la détermination de la distance réelle en utilisant cette valeur unique d'erreur sur la totalité de la courbe n'est pas la méthode la plus optimale.

Nous avons donc tenté de comparer les deux courbes uniquement sur les petits pics, c'est-à-dire les points de la courbe avant le pic principal de la figure de diffraction. En figure 3.6, la courbe obtenue lorsqu'on se focalise sur une partie plus zoomée de la courbe :

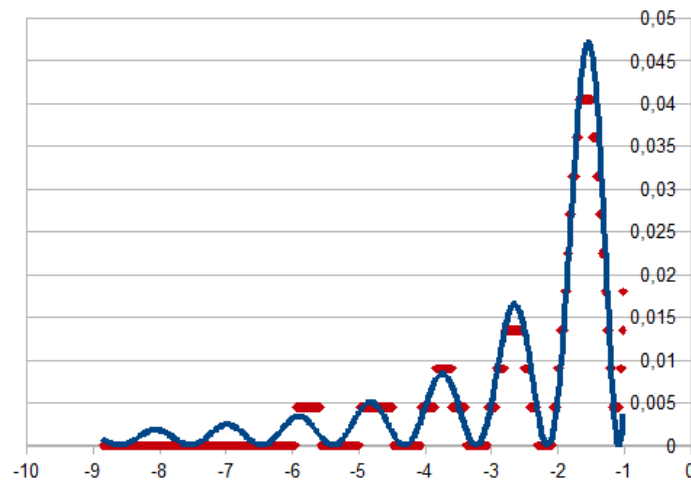


FIGURE 3.6 – Courbes théorique et expérimentale superposées

Plusieurs remarques peuvent être faites sur ce diagramme. Tout d'abord, précisons que nous avons tracé la courbe théorique en bleu et les points de la courbe expérimentale en rouge. Nous ne pouvons pas relier les points expérimentaux entre eux car nous obtenions

des “paliers” non représentatifs des valeurs mesurées. La première remarque que nous pouvons faire est que la majorité des points expérimentaux appartiennent à la courbe théorique, ce qui manifeste une certaine cohérence entre les deux courbes. Dans un second temps, nous pouvons observer sur cette courbe les limites des acquisitions de la caméra. Comme mentionné auparavant, nous observons très clairement la présence de paliers sur lesquels tous les points expérimentaux se situent. Nous pouvons interpréter ceux-ci comme étant la méthode de mesure de la caméra, en effet, nous interprétons cela comme des grandeurs “paliers” dans lesquelles la caméra classe les points selon leur appartenance à des intervalles qui déterminent le palier correspondant le plus proche.

Grâce à cette méthode de comparaison, nous pouvons mieux visualiser la superposition des points théoriques et expérimentaux et ainsi mieux ajuster les différents paramètres afin de réduire l’erreur. De plus la variation de l’erreur correspond mieux aux superpositions visuelles sur le graphique, c’est-à-dire que la valeur minimale de l’erreur correspond à la meilleure superposition que nous observons qualitativement sur le graphique. Nous garderons ainsi cette méthode pour comparer les différents résultats en fonction de la distance.

Pour chacune des quatre acquisitions avec la même largeur de fente (0.2mm), nous avons ajusté pas à pas la valeur de la distance dans les paramètres de la courbe théorique afin d’obtenir un valeur minimale de l’erreur entre la courbe théorique et la courbe expérimentale. Voici les valeurs de l’erreur obtenue en fonction de la distance.

Distance (en mm)	Erreur
402	0,8346963839
604	1,1529060523
794	2,28606091
991	3,142376644

Tableau 2. Tableau des distances et des erreurs associées

Nous observons une nette augmentation de l’erreur en augmentant la distance fente-écran. Cette différence pourrait s’expliquer par le fait que la largeur de la figure de diffraction sur la barrette s’accroît en augmentant la distance. En conséquence, il y a plus de points détectés par la caméra, c’est donc sans doute cela qui explique cette augmentation de l’erreur. En effet, notre méthode de calcul de l’erreur est la somme de toutes les erreurs relatives à chaque point. Néanmoins, nous restons cohérents avec notre calcul d’erreur et nous concluons que d’après notre méthode, c’est en diminuant la distance que nous obtenons une courbe expérimentale plus proche de la courbe théorique.

### 3.4 Effets de la largeur des fentes

Nous avons cherché à savoir si la largeur de la fente avait un effet décisif sur la précision des résultats. Nous sommes donc passé d’une largeur de 0.2mm à 0.1mm avec une distance proche de 40cm. Nous avons donc effectué la même méthodologie que précédemment pour comparer la courbe théorique et expérimentale en changeant la largeur de la fente dans la formule de la courbe théorique.

Nous obtenons une courbe qui se superpose correctement sur la courbe théorique à l’exception du pic principal qui n’a pas une forme très arrondie comme la courbe théorique. En revanche sur la portion ds petits pics les valeurs de la courbe expérimentales se situent bien sur la courbe théorique.

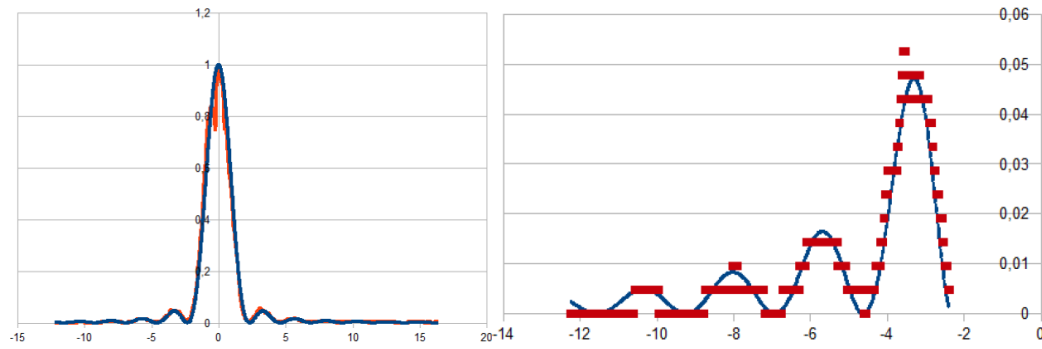


FIGURE 3.7 – Courbes théorique et expérimentale superposées

L'erreur minimale est de 0,6668078061 ce qui est légèrement moins élevé que l'erreur obtenue avec la fente de 0.2mm avec une distance de 40cm. Néanmoins, visuellement nous sommes moins satisfaits de la superposition entre les deux courbes. En conclusion, nous pouvons dire que cette différence n'est pas significative et que la largeur de la fente influe très peu sur la précision des courbes. Nous avons donc choisi pour le montage final de garder la fente de 0.2 mm.

# Chapitre 4

## Montage à deux lasers

### 4.1 Mode opératoire et montage

L'objectif de cette expérience est de réaliser un montage à deux lasers de longueur d'onde différente. Avec ce montage on réalisera l'étude de deux lasers qui traversent en même temps une même fente de diffraction ou d'interférences.

#### Mode d'installation du montage :

1. On pose sur les extrémités opposées d'un banc optique un laser vert et la caméra CCD. On pose les fentes entre ces deux instruments . On règle la hauteur et la direction du laser et des fentes de manière à que le faisceau du laser vert soit aligné avec la barette de la caméra CCD et qu'il traverse les fentes.
2. On positionne à la même hauteur du faisceau une lame sémi-réfléchissante entre les fentes et le laser vert. On positionne la lame à 45 degrés du faisceau et de la perpendiculaire de ce dernier.
3. Avec le support adéquat, on place un deuxième laser de manière à que son faisceau soit perpendiculaire au faisceau vert et passe par la lame.

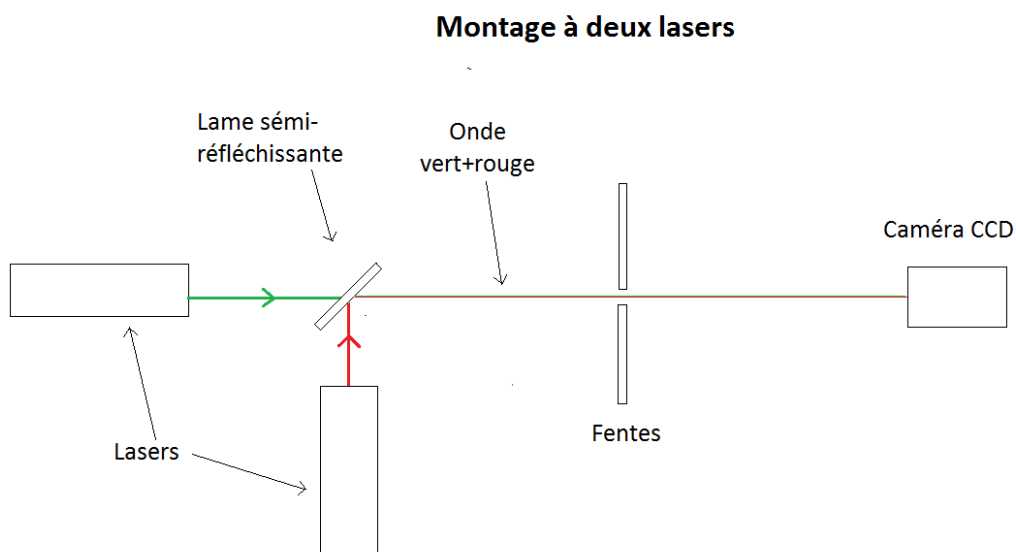


FIGURE 4.1 – Schéma du montage à deux lasers

## Réglages pour la prise des mesures :

1. Il est indispensable de régler l'alignement des faisceaux avant et après les fentes. Pour vérifier cela, on place un écran après les fentes. Il faut vérifier que les deux lasers se superposent au niveau de la fente dans un même point. De plus, ils doivent se superposer dans un point de l'écran. Si ces deux alignements ont lieu alors les faisceaux sont alignés et on peut effectuer des mesures. La difficulté de ce montage réside dans cet alignement. En effet, il est difficile d'aligner les faisceaux car il est possible que la lame ne se trouve pas exactement à 45 degrés ou que le laser rouge ne se trouve pas perpendiculaire. C'est pour cette raison qu'il est conseillé d'utiliser comme référence le laser vert et bouger le laser rouge afin d'avoir une superposition au niveau de la fente. Puis, il sera indispensable de simultanément alterner et modifier un peu l'angle de la lame et la position du laser rouge jusqu'à avoir la double superposition.

2. En fonction de l'intensité des lasers, il est possible d'ajouter deux polariseurs à ce montage. Si lorsqu'on effectue une capture dans la caméra, la mesure est saturée il sera nécessaire d'ajouter les polariseurs. Dans notre cas, on a ajouté un polariseur entre le laser vert et la lame et un deuxième entre la caméra et les fentes. Chaque polariseur permet de gérer l'intensité de chaque laser, en modifiant les angles on peut avoir deux lasers avec une même intensité et un faisceau résultant qui ne sature pas la caméra.

## 4.2 Diffraction à deux lasers

On a donc réalisé expérimentalement les mesures de la diffraction à deux lasers avec le montage décrit auparavant. Grâce au logiciel Calliens on a donc réussi à avoir les données de nos mesures et puis à tracer les courbes expérimentales. On avait donc une courbe associée au laser vert, une associée au laser rouge et une associée aux deux lasers ensemble.

Au moment de l'exploitation des résultats et plus précisément au moment de tracer les courbes expérimentales, on a centré les courbes à 0 afin d'avoir une symétrie par rapport à l'axe des ordonnées. Puis, on a normalisé les 3 courbes expérimentales en fonction de l'intensité maximale de la courbe des deux lasers ensemble.

D'autre part, pour tracer les courbes théoriques quelques traitements ont été réalisés. On a constaté expérimentalement que la courbe des deux lasers ensemble n'était pas égale à la somme des deux autres courbes car l'intensité maximale des deux lasers n'était pas la même. Par conséquent, lors du calcul théorique de l'intensité des deux lasers au même temps, il ne suffit pas de faire la somme. En effet, non seulement les lasers n'ont pas la même intensité mais aussi on a utilisé des polariseurs afin de gérer l'intensité et éviter de saturer la barette de la caméra. Pour trouver une solution à ce problème, on a donc identifié le maximum des courbes expérimentales du laser rouge et du laser vert et après on a multiplié les intensités théoriques des valeurs du laser rouge et vert par le rapport entre l'intensité expérimentale maximale du laser seul par l'intensité expérimentale maximale des deux lasers ensemble. La courbe théorique a été normalisée après.

La figure 4.2 présente la superposition entre les courbes expérimentales et théoriques :

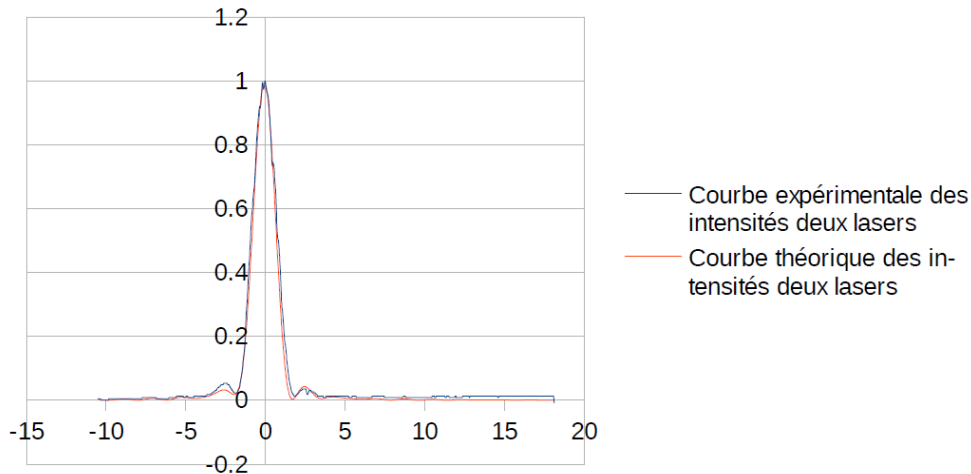


FIGURE 4.2 – Superposition des courbes de la diffraction à deux lasers (fente : 0.2mm et distance : 603mm)

Pour analyser ces courbes on a donc effectué la différence entre les deux courbes. Comme on a vu auparavant, les erreurs sont fortes dans l'intervalle du pic principal, c'est pour cela qu'on a donc analysé l'erreur dans les intervalles contenant les pics secondaires. Puis, on a fait la somme des erreurs, nos résultats :

Mesure (Largueur fente(en mm) - Distance(en mm))	Erreur
0.1-400	2.0157803852
0.1-603	2.234675902
0.2-603	3.20796

Tableau 3. Erreur associée à la courbe sans le pic principal des différentes mesures

On constate que les erreurs sont faibles et à cela s'ajoute le fait que nos courbes ont les mêmes allures (pic principal et secondaire similaires). On peut donc conclure que notre modélisation et nos résultats expérimentaux sont cohérents pour la diffraction entre deux lasers (Voir annexe A). Notre montage est donc adéquat pour la diffraction à deux lasers.

### 4.3 Interférences

On a réalisé l'interférence à un laser et on a la courbe théorique dans la figure 4.3 :

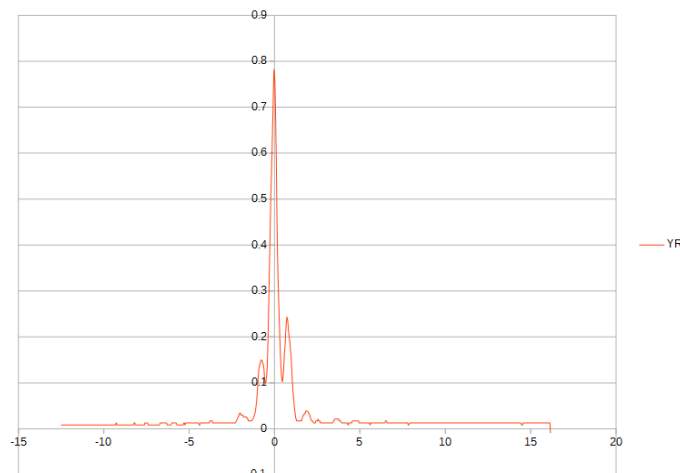


FIGURE 4.3 – Courbe expérimentale des interférences à un laser (fente : 0.2mm, interfente : 0.3mm et distance : 415mm)

On constate que les pics secondaires ne sont pas de la même taille. Ceci est incorrect car la courbe théorique des interférences est symétrique par rapport au pic principal. Cette différence est due au fait que les ouvertures des fentes ne reçoivent pas la même intensité du laser. Ceci est un problème qui s'explique par la précision de notre montage.

Lorsqu'on passe à deux lasers on a réussi à mesurer, comme pour la diffraction, trois courbes expérimentales : courbe rouge, courbe verte, courbe rouge+vert. Comme pour la diffraction, les courbes expérimentales ont été centrées à 0 et normalisées en fonction de l'intensité maximale de la courbe rouge+vert.

Expérimentalement, on constate que les pics principaux des lasers vert et rouge ne sont pas centrés à la même position. Ceci provoque que notre courbe expérimentale soit complètement différente de la courbe théorique. En effet, ce problème de coïncidence peut provoquer que des pics déformés en comparaison à la théorie. La courbe théorique est tracée en sachant que les pics sont centrés. Donc au moment de faire la somme on a donc bien une courbe symétrique. Cependant, si les courbes ne sont pas centrées alors lors de la somme on a donc des incohérences.

On a effectué l'exploitation pour une mesure qui présente des courbes plus ou moins symétriques. La figure 4.4 présente la superposition de nos deux courbes théoriques et expérimentales :

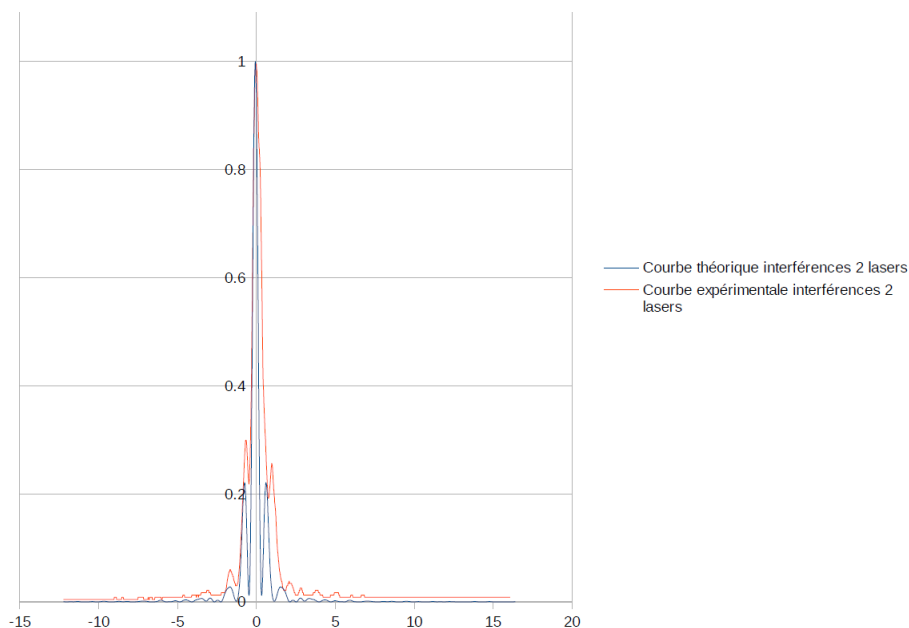


FIGURE 4.4 – Superposition des courbes des interférences à deux lasers (fente : 0.2mm, interfente : 0.3mm et distance : 415mm)

On constate que nos courbes sont très différentes. En effet, les pics secondaires de la courbe expérimentale sont plus importants que ceux de la théorique. De plus, entre le pic principal et le secondaire on devrait théoriquement se rendre près de 0. Cependant, ceci n'est pas le cas. On a donc un problème de résolution qui est dû au fait que les pixels de la caméra sont trop grands et la précision n'est pas suffisante. On peut donc conclure que les résultats expérimentaux montrent que notre montage n'est pas adapté à l'étude des interférences. (Voir annexe A)

On pourrait dans le futur envisager un montage plus adapté pour traiter ce manque de précision. Premièrement, pour régler le fait que les pics secondaires ne sont pas identiques, on pourrait mieux éclairer les ouvertures de la fente. Puis, pour régler le problème du centrage des courbes rouge et vert, on pourrait utiliser des supports micrométriques sur le laser rouge (vu que le laser vert est la référence lors du réglage). En effet, on aurait la possibilité de mieux régler les position du laser rouge. Le support devrait donc permettre d'assurer les mouvements au long des axes et les mouvements de rotation. Finalement, il faudrait trouver un moyen de bien positionner la lame à 45 degrés.



## Conclusion et perspectives

Pour conclure, ce projet nous a permis de déterminer un montage et une méthode optimale afin de retrouver la longueur d'onde d'un laser inconnu. En effet, grâce à nos différentes expériences nous avons pu conclure que le « meilleur » montage comprenait une caméra CCD, une distance fente-écran de 402mm et une largeur de fente de 0,2mm.

En ce qui concerne la méthode, nous avons sélectionné la comparaison simple entre la courbe donnée par un laser inconnu et les courbes théoriques faites pour différentes longueurs d'ondes connues. Ce choix a été motivé par plusieurs raisons. La première est la complexité de la mise en place du montage à deux lasers, la seconde est le fait que, pour les interférences, le dispositif à deux lasers ne correspond pas aux résultats théoriques attendus avec une dissymétrie dans l'intensité des pics secondaires, et de la courbe en elle-même. Néanmoins, l'utilisation du montage à deux lasers pourrait se faire pour les interférences si on utilise un support micrométrique pour le laser rouge et on trouve une manière de bien régler la lame à 45 degrés. De plus, il serait indispensable de bien vérifier que les deux ouvertures des fentes soient éclairées avec la même intensité. Cette amélioration est notre perspective principale d'amélioration du projet.

D'un point de vue plus général, cette étude nous a permis de réellement faire face à un projet en tant que tel. Effectivement, nous avons dû gérer notre propre planning, réaliser nos propres expériences et nous nous sommes rendus compte qu'il était vraiment compliqué de respecter les délais. Notre principale difficulté fut la réalisation de nos montages, car nous savions ce que nous voulions observer, à savoir des diffractions et interférences, mais notre problème était : « comment le faire ? Quel capteur pourrait nous permettre à la fois de nous déplacer sur une distance donnée et de donner l'intensité émise par le laser ? ». Cette difficulté nous a donc légèrement décalé dans notre planning théorique, mais grâce à cette expérience nous avons compris l'intérêt de planifier correctement notre projet en amont en essayant d'imaginer les difficultés à venir et de clarifier le rôle de chacun pour faciliter l'organisation du groupe et le travail de chaque membre. Ce projet nous a aussi permis de développer notre capacité à travailler en groupe avec des personnes que l'on ne connaissait pas. Ainsi, cet exercice nous a appris de nombreuses choses, à la fois dans le domaine scientifique et sur le plan méthodologie, organisation de projet.

# Bibliographie

- [1] LIEN INTERNET, [http://national.udppc.asso.fr/attachments/article/Arpenteur\\_du\\_Web\\_Interferences\\_\\_diffraction.pdf](http://national.udppc.asso.fr/attachments/article/Arpenteur_du_Web_Interferences__diffraction.pdf) (consulté le 09/02/2017)
- [2] LIEN INTERNET, <http://www.ac-nice.fr/clea/lunap/html/Interf/InterfEnBref.html> (consulté le 09/02/2017)
- [3] LIEN INTERNET, [http://webetab.ac-bordeaux.fr/Etablissement/LJay/pedagogie/disciplines/phychi/physique/1STL/docs/cours\\_diffraction\\_interference.pdf](http://webetab.ac-bordeaux.fr/Etablissement/LJay/pedagogie/disciplines/phychi/physique/1STL/docs/cours_diffraction_interference.pdf) (consulté le 10/03/2017)
- [4] LIEN INTERNET, [http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/jacques\\_charrier/tp/interferences/historique.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/jacques_charrier/tp/interferences/historique.html) (consulté le 07/05/2017)
- [5] LIEN INTERNET, [https://media4.obspm.fr/public/FSU/pages\\_ccd/camera-ccd-apprendre.html](https://media4.obspm.fr/public/FSU/pages_ccd/camera-ccd-apprendre.html) (consulté le 10/06/2017)
- [6] LIEN INTERNET, [http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP\\_C\\_M09\\_G02/co/Contenu\\_62.html](http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M09_G02/co/Contenu_62.html) (consulté le 11/06/2017)
- [7] COURS, Cours d'optique ondulatoire (sections classiques et internationales)

# Annexe A

## Ensemble des résultats obtenus

### Photodiode

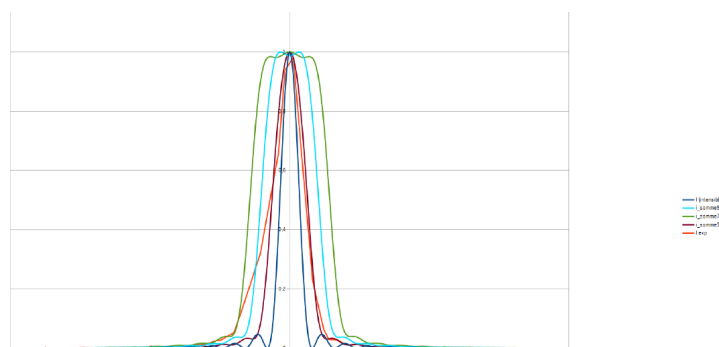


FIGURE A.1 – Courbes des intensités en fonction des intervalles

### Caméra CCD

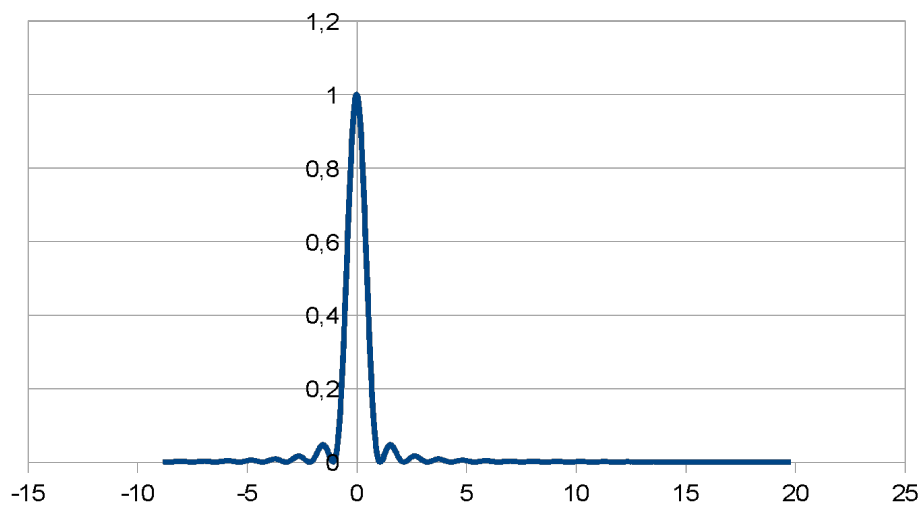


FIGURE A.2 – Courbe théorique pour une fente de 0,2 et une distance de 40 cm

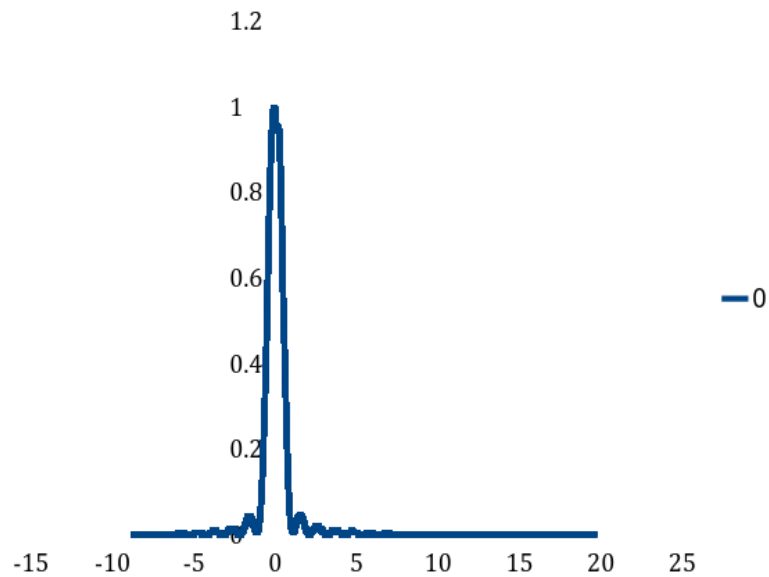


FIGURE A.3 – Courbe expérimentale pour une fente de 0,2 et une distance de 40 cm

### Diffraction à deux lasers

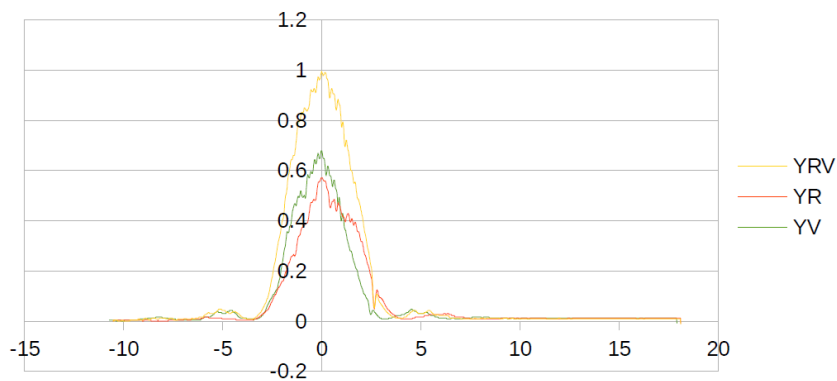


FIGURE A.4 – Courbes expérimentales de la diffraction à deux lasers (fente : 0.1mm et distance : 603mm)

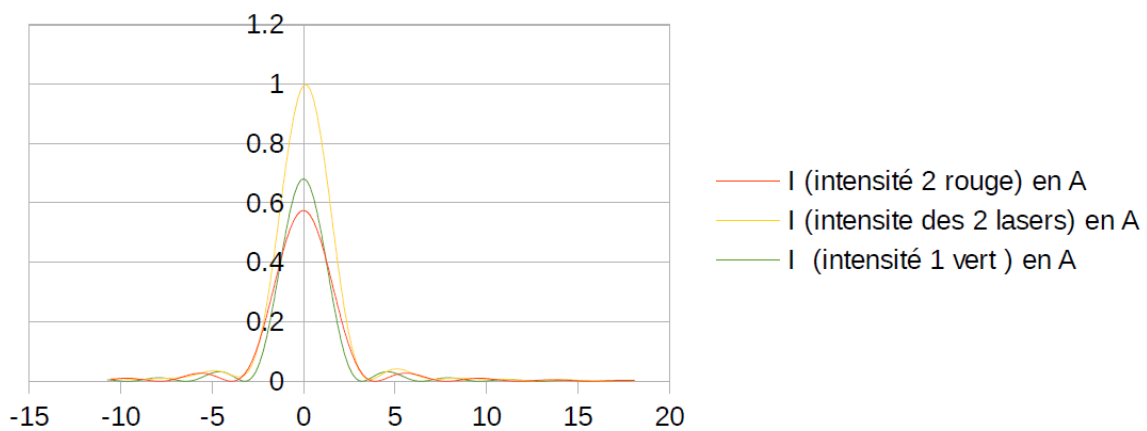


FIGURE A.5 – Courbes théoriques de la diffraction à deux lasers (fente : 0.1mm et distance : 603mm)

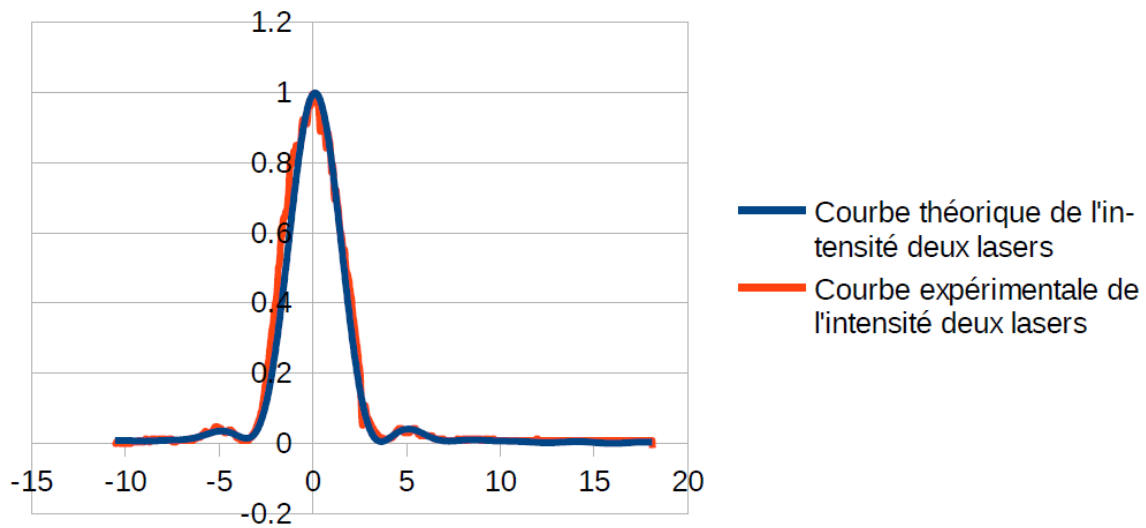


FIGURE A.6 – Superposition des courbes de la diffraction à deux lasers (fente : 0.1mm et distance : 603mm)

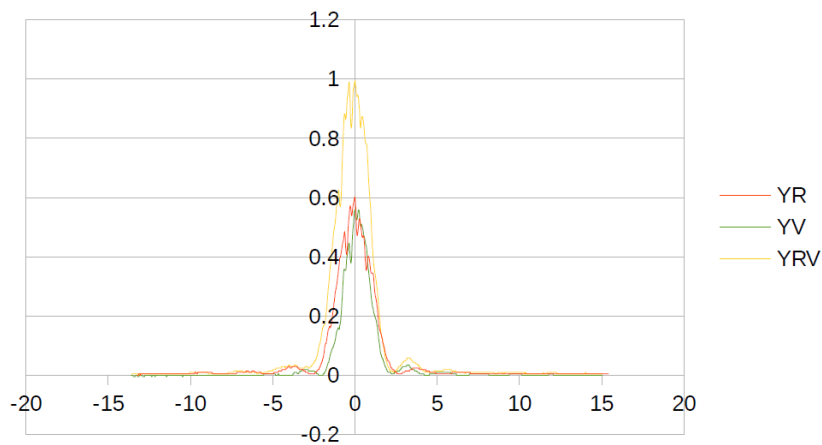


FIGURE A.7 – Courbes expérimentales de la diffraction à deux lasers (fente : 0.1mm et distance : 400mm)

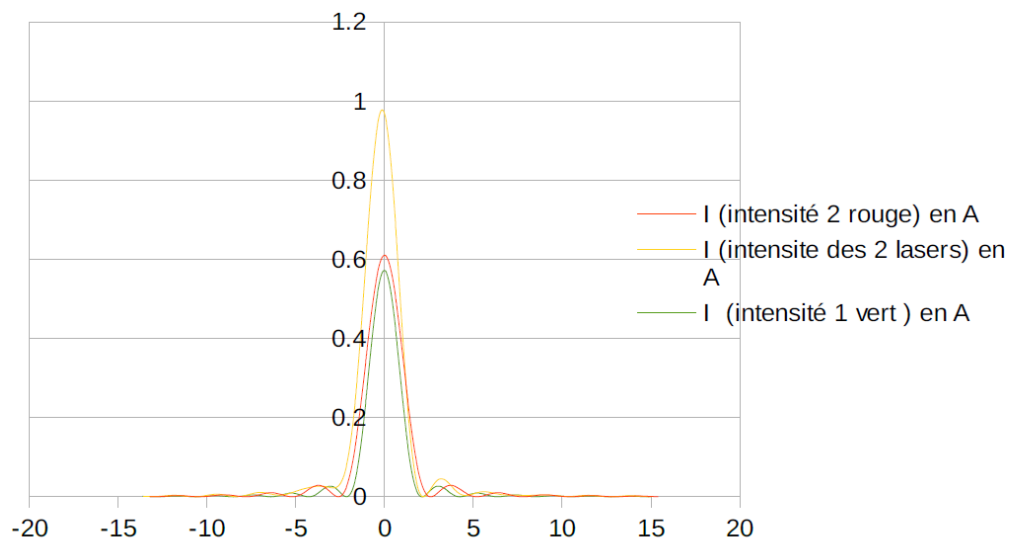


FIGURE A.8 – Courbes théoriques de la diffraction à deux lasers (fente : 0.1mm et distance : 400mm)

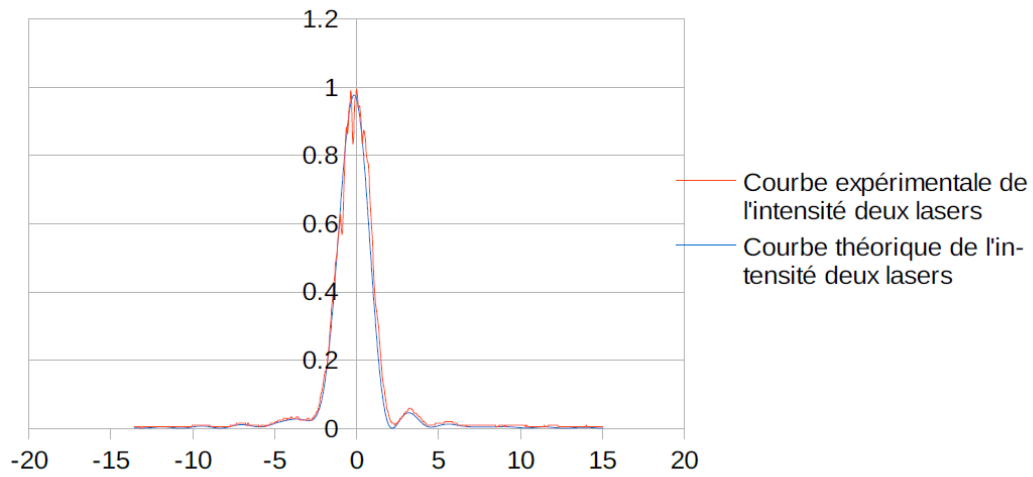


FIGURE A.9 – Superposition des courbes de la diffraction à deux lasers (fente : 0.1mm et distance : 400mm)

### Interférences à deux lasers

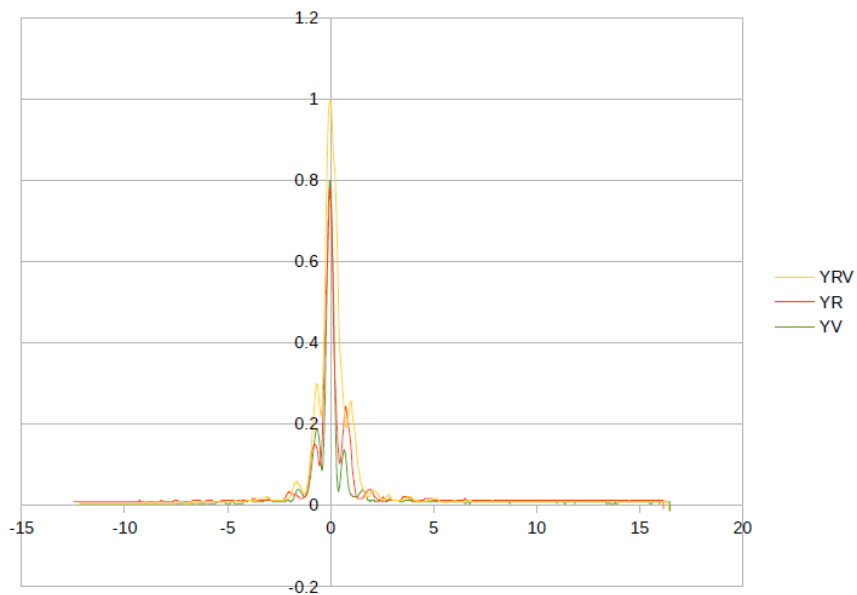


FIGURE A.10 – Courbes expérimentales de la diffraction à deux lasers (fente : 0.2mm, interfente : 0.3mm et distance : 415mm)

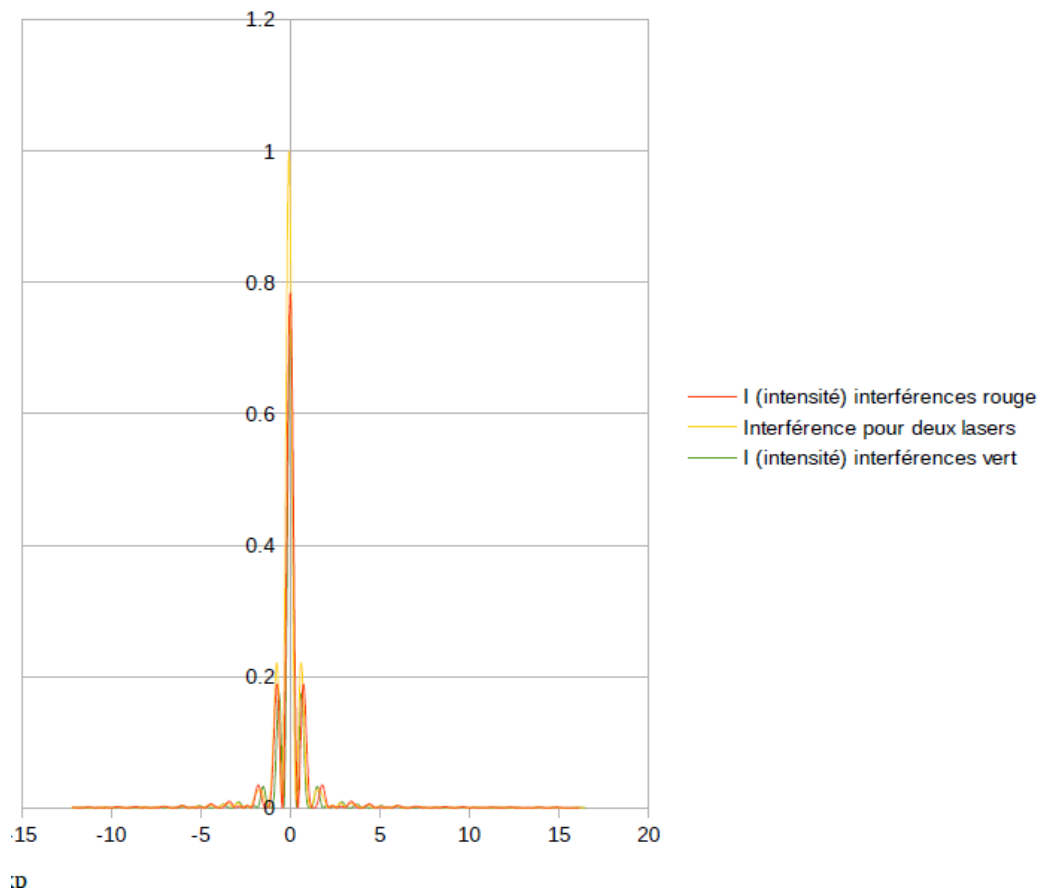


FIGURE A.11 – Courbes théoriques de la diffraction à deux lasers (fente : 0.2mm, interfente : 0.3mm et distance : 415mm)