

MP 08 – INTERFÉRENCES LUMINEUSES

25 novembre 2016

Clément Gouiller & Noémie Dagès

Et là, on voit les interférences... Après, faut imaginer !
ANONYME

Commentaires du jury

2015, 2016 : Il n'est raisonnable d'envisager d'apprendre à régler un interféromètre de Michelson devant le jury. Par ailleurs, les connaissances théoriques sur les cohérences spatiale et temporelle doivent être reliées aux observations expérimentales. Enfin, il est judicieux de réaliser des expériences simples avant de se lancer dans des expériences sur les notions de cohérence.

2013, 2014 : Trop de candidats ne font pas le rapport entre leurs connaissances théoriques sur les cohérences spatiale et temporelle, et leurs observations expérimentales. Il en résulte souvent des montages mal réglés et mal utilisés.

2012 : Les dispositifs d'interférences sont très divers. En choisir deux bien maîtrisés permet des présentations de qualité sur les cohérences spatiales et temporelles, et une analyse du lien entre les considérations théoriques et les observations expérimentales.

Bibliographie

➤ *Optique expérimentale*, **Sextant**
➤ *Optique*, **Houard**
➤ *Expériences d'optique*, **Duffait**

→ Toujours utile en optique.
→ Théorie des interférences
→ Manips

Prérequis

- Interférences à division du front d'onde et d'amplitude
- Interféromètre de Michelson

Expériences

- ☕ **Fentes d'Young** : Mesure de l'interfrange en fonction de λ
- ☕ **Fentes d'Young** : Mesure du contraste en fonction de l'ouverture
- ☕ **Michelson** : Passage de la configuration lame d'air à coin d'air
- ☕ **Michelson** : Mesure de la longueur de cohérence de la lampe QI
- ☕ **Michelson** : Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre par deux méthodes

Table des matières

1	Interférences par division du front d'onde	2
1.1	Cohérence temporelle	3
1.2	Cohérence spatiale	3
2	Interférences par division d'amplitude	4
2.1	Cohérence temporelle	4
2.2	Derniers réglages du Michelson	4
2.3	Cohérence spatiale	4
2.4	Polarisation de la lumière (partie accordéon en fonction du temps)	5
3	Mesure à l'aide d'interférences	5

Introduction

Dans les cours précédents, nous avons étudié le phénomène d'interférences lumineuses : l'intensité résultante n'est pas toujours égale à la somme des intensités de chaque source.

Observation du phénomène d'interférence

🔧 Imagination débordante

⌚ 1 min

On éclaire une fente puis deux et on remarque que les intensités ne se somment pas.

Pour pouvoir observer ce phénomène, il faut néanmoins se placer dans des conditions particulières : des ondes lumineuses peuvent interférer si elles proviennent d'un même point source, sont de même longueur d'onde et polarisées non orthogonalement.

Dans ce montage, à travers deux dispositifs interférométriques, nous allons illustrer les conditions d'obtention d'interférences qui sont :

- **Cohérence spatiale** : les différents points d'une source non ponctuelle produisent des interférences indépendamment les uns des autres, on observe donc la somme de leurs intensités. Si les différentes figures d'interférences ne se recouvrent pas, il y a brouillage : les interférences ne sont plus visibles.
- **Cohérence temporelle** : deux ondes de fréquences différentes ne peuvent interférer à l'échelle du temps de réponse de nos récepteurs.
- **Polarisation de la lumière** : deux ondes polarisées orthogonalement ne peuvent interférer.

1 Interférences par division du front d'onde

Intéressons nous d'abord aux fentes d'Young. Ce dispositif a été mis au point par Thomas Young en 1801 et se présente sous la forme suivante (cf FIGURE 1) :

- une lampe QI munie d'un filtre anticalorique
- une fente réglable proche de la lampe (P115.1/3)
- une bifente disposée à environ 15 cm de la fente source (P116.1/2)

La figure d'interférences est observée grâce au dispositif Caliens. On dispose un tube entre ce dernier et les fentes pour diminuer le bruit lors de l'acquisition.

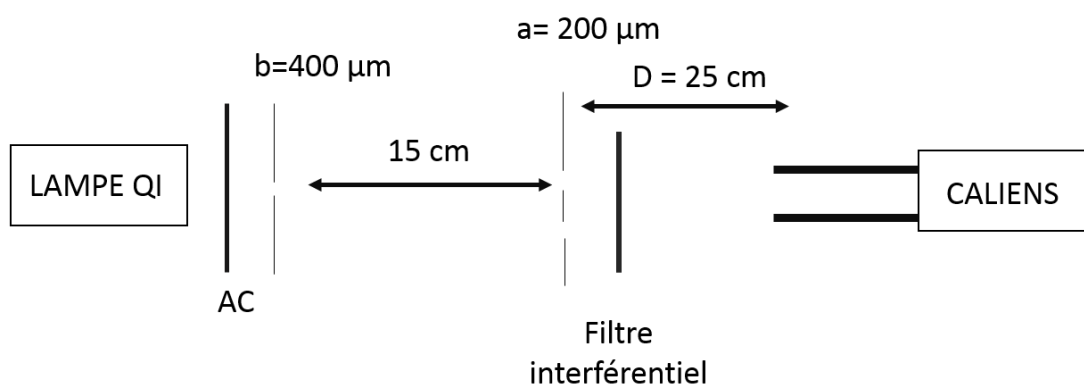


FIGURE 1 – Schéma du montage des fentes d'Young.

ATTENTION : Les interférences étant peu lumineuses, ne pas mettre de polariseurs ni de filtre gris sur le détecteur Caliens !

1.1 Cohérence temporelle

La lumière blanche peut être considérée comme une source ayant un spectre étendu décomposable en raies élémentaires quasi monochromatiques et incohérentes entre elles. Chaque longueur d'onde donne alors sa propre figure d'interférence. En lumière monochromatique, l'interfrange est donnée par la formule $i = \frac{\lambda D}{a}$.

Mesure de l'interfrange en fonction de la longueur d'onde

🔗 Duffait p 55 - Houard p 197-198

⊖

Le but de l'expérience est de vérifier la formule $i = \frac{\lambda D}{a}$ et d'en déduire a . Pour cela, on réalise le montage schématisé sur la figure ci-dessus. On ajoute un filtre interférentiel permettant de filtrer plusieurs longueurs d'ondes (P124.1/9). Pour chaque filtre, on observe la figure d'interférence et on mesure le maximum d'interfranges possibles. On trace ensuite i en fonction de λ .

On obtient une droite $i = c \lambda$ avec une incertitude Δc sur la valeur de c (donnée par le logiciel).

A l'aide du banc optique, on mesure $D = \dots \pm \dots$ cm.

Calcul des incertitudes pour chaque point de la droite

- En préparation, on a mesuré l'erreur sur λ (la bande passante du filtre interférentiel) grâce à un spectromètre. $\Delta \lambda = 8 \text{ nm}$ pour les filtres utilisés.
- Sur le logiciel Caliens, on mesure $u(I) = u(i) \cdot n$ où n est le nombre d'interfranges mesurés. D'où $u(i) = \dots$ m

Obtention de a et incertitudes

On a : $c = \frac{D}{a}$ donc $a = \frac{D}{c} = \frac{25 \cdot 10^{-2}}{1,32 \cdot 10^3} = 189 \mu\text{m}$ et par propagation des incertitudes : $\Delta a = \sqrt{\left(\frac{1}{c} \Delta D\right)^2 + \left(\frac{-D}{c^2} \Delta c\right)^2}$.

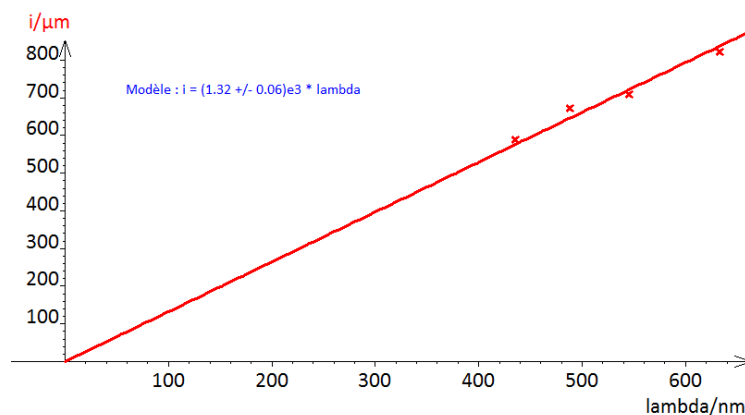


FIGURE 2 – Linéarisation de i en fonction de λ .

1.2 Cohérence spatiale

On veut maintenant s'intéresser à la cohérence spatiale. On se place donc à une longueur d'onde fixée grâce au filtre interférentiel (on prend le filtre qui laisse passer le maximum de lumière, le rouge fonctionne bien). On remarque que lorsqu'on augmente la largeur de la fente source, le contraste diminue pour s'annuler et enfin réaugmenter.

Étude de la première annulation du contraste

🔗 Houard p 209-210

⊖ 5 min

Pour différentes valeurs de b (largeur de la fente source), on bouge les bifentes et on mesure la distance fente source-bifente (d) où se produit la première annulation de contraste. Le contraste prévu par la théorie est : $\text{sinc}\left(\frac{\pi b a}{\lambda d}\right)$. Pour une distance d fixée, la largeur de cohérence spatiale de la source est par définition la largeur $b_1 = l_s$ de la fente source produisant la première annulation du contraste, qui dépend donc de d comme on l'a montré. Elle vaut $l_s = b_1 = \frac{\lambda d}{a}$. La régression linéaire permet de déterminer de nouveau a , l'écart entre les fentes doubles : $\text{Coe}fDir = \frac{\lambda}{a}$ donc $a = \frac{\lambda}{\text{Coe}fDir}$.

Remarque : Si Caliens sature pour des valeurs de b trop grandes, on peut ajouter un polariseur pour diminuer l'intensité.

Nous avons donc vu que l'ouverture spatiale de la source entraîne un phénomène de brouillage quelque soit l'endroit où l'on observe les interférences. Pour s'affranchir de ce problème de cohérence spatiale, les interféromètres à division d'amplitude ont été mis au point. Nous allons étudier l'interféromètre de Michelson et montrer en quoi il permet d'obtenir une meilleure visualisation des interférences.

2 Interférences par division d'amplitude

2.1 Cohérence temporelle



Mesure de l'écart du doublet du sodium

⚡ Houard p230

⌚ 5min

Matériel :

- Lampe sodium + filtre AC
- interféromètre de Michelson avec moteur (le /2 marche bien)
- lentille convergente (focale environ 1m)
- filtre interférentiel orange
- photodiode Thorlabs
- Acquisition LatisPro

Le doublet du sodium est constitué de deux raies très proches. La largeur spectrale est reliée à la longueur de cohérence par la formule $\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{L_C}$.

Mesurons donc l'écart entre les deux raies du sodium. Le Michelson est préréglé pour observer directement les interférences avec la lampe à sodium, en lame d'air. On rajoute un filtre orange pour ne laisser passer que les deux raies du doublet. L'observation se fait sur un écran placé dans le foyer image d'une lentille de focale 1m. On montre qualitativement que le contraste passe par des maxima et des minima en augmentant l'épaisseur de lame d'air. On parle de battements du doublet du sodium. Entre deux minimums du contraste, le miroir s'est déplacé de $\Delta e = \frac{\lambda_0^2}{2\Delta\lambda}$.

En préparation, un interférogramme a été réalisé à l'aide du moteur du Michelson (partir proche du contact optique et laisser le moteur tourner une trentaine de minutes). En live, on se contente de montrer qualitativement le phénomène de brouillage régulier et on exploite l'interférogramme fait en préparation.

2.2 Derniers réglages du Michelson



Réglage du Michelson

⚡ Sextant

⌚ 5 min

Montrer les anneaux observés avec une lampe spectrale. Recentrer la figure d'interférences et faire diverger les anneaux (chariotage) jusqu'à la teinte plate de la lampe. Passer en lumière blanche (filtre AC et condenseur pour faire converger sur les miroirs). En chariotant un tout petit peu devraient apparaître les teintes de Newton, synonymes d'un réglage au contact optique.

Il nous semble important de montrer ce réglage, preuve d'une maîtrise du Michelson. D'aucuns vous diraient que c'est risqué si vous trouvez pas les teintes... À vous de voir

2.3 Cohérence spatiale



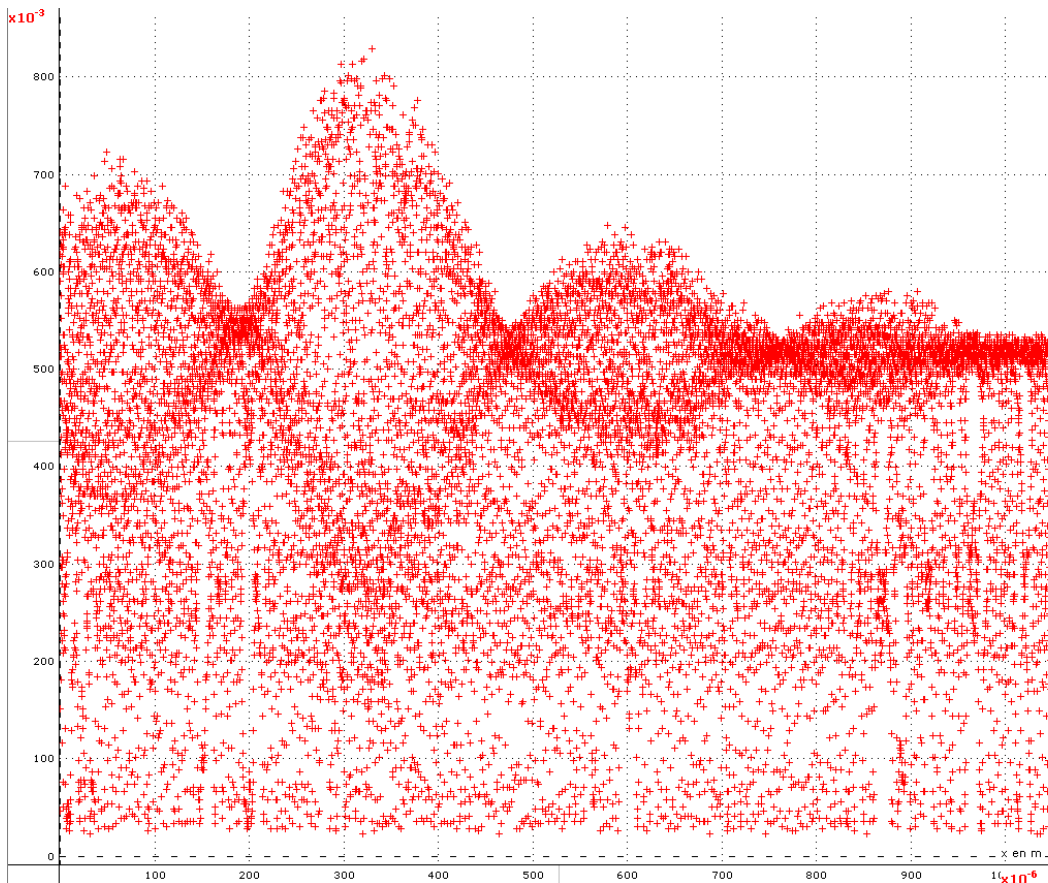


FIGURE 3 – Battements du sodium (tension de la photodiode en fonction du déplacement du chariot) Le contact optique est a priori au maximum de contraste, et on ne s'explique pas trop la bande de bruit en bas

Localisation des franges et cohérence spatiale



⊖ 3 min

La source est pour l'instant de lumière blanche, étendue. On place l'écran à environ 1 m du Michelson. On place une lentille de projection entre le Michelson et l'écran. On fait bouger la lentille de projection pour montrer que les franges sont localisées. Ceci est dû au fait que la source n'est pas cohérente spatialement. Ajouter un diaphragme après le condenseur pour créer une source ponctuelle. Déplacer l'écran : les interférences ne sont plus localisées. On voit donc qu'un interféromètre à division d'amplitude permet de s'affranchir du problème de cohérence spatiale, avec pour inconvénient la localisation des interférences.

2.4 Polarisation de la lumière (partie accordéon en fonction du temps)

L'interféromètre est réglé en lame d'air. On place deux polariseurs à l'aide de potences devant les deux miroirs. Lorsque les deux ondes sont polarisées orthogonalement, les interférences ne sont plus visibles.

3 Mesure à l'aide d'interférences



Mesure par spectroscopie de l'épaisseur d'une lame

🔧 Pas de livre :'

⌚ 5 min

Partir de l'interféromètre de Michelson (lampe QI, réglé en coin d'air au contact optique). Placer le spectromètre ÉTALONNÉ AU PRÉALABLE au niveau de la raie centrale des teintes de Newton. Insérer la lame d'épaisseur inconnue dans un des bras de l'interféromètre (faire attention que la lumière reçue par le spectromètre passe bien par la lame). On est désormais dans du blanc d'ordre supérieur. Enregistrer le spectre, qui doit être cannelé. Prendre deux minima éloignés, séparés de $N-1$ autres minima et noter leurs longueurs d'onde λ_1 et λ_2 . Tous les minima correspondent à des longueurs d'ondes vérifiant : $\lambda_k = \frac{2(n-1)e}{k+1/2}$ On a donc pour un autre minimum choisi séparé du premier par $N-1$ autres :

$$\lambda_{k+N} = \frac{2(n-1)e}{k+N+1/2}$$

En combinant ces équations, on obtient :

$$e = \frac{N\lambda_k\lambda_{k+N}}{2(n-1)(\lambda_{k+N}-\lambda_k)}$$

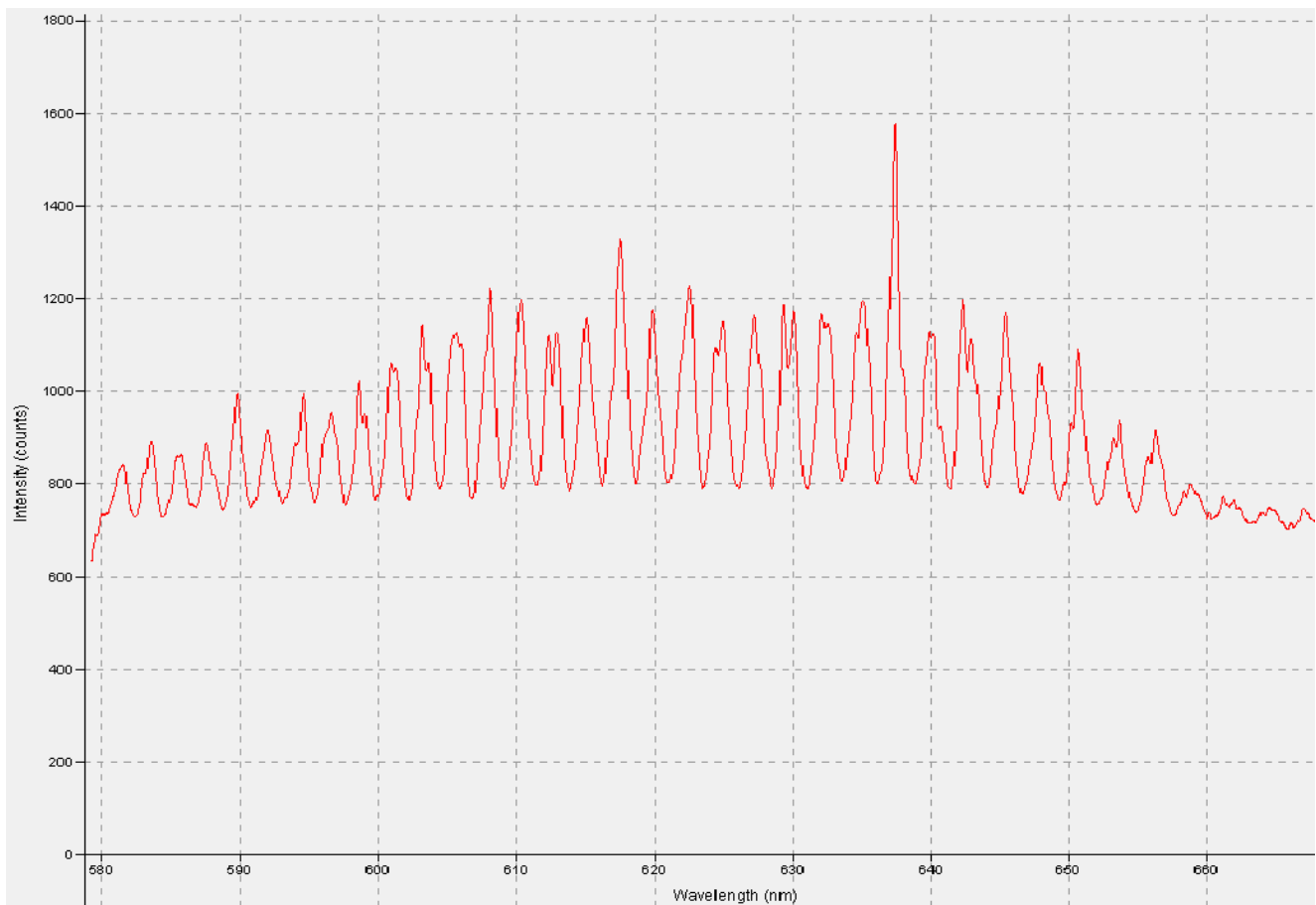


FIGURE 4 – Allure du spectre cannelé obtenu (avec Spectrasuite, et le petit spectro noir très résolu dans le rouge)

Remarques : On considère ici que l'indice du verre est indépendant de la longueur d'onde, ce qui s'avère être une bonne approximation étant donné que la notice des lamelles de microscope indique que c'est du verre de type borosilicaté B253, et une recherche sur le net donne par exemple : $n(\lambda = 546) = 1.5255$ et $n(\lambda = 588) = 1.5231$ ce qui n'est pas une source d'erreur significative.

Conclusion

Au cours de ce montage, nous avons mis en évidence les différentes conditions d'obtention des interférences à l'aide de deux dispositifs interférentiels.

Pour les fentes, la cohérence spatiale imposait un compromis entre la luminosité et le contraste mais cela a pu être résolu par l'utilisation d'interféromètre à division d'amplitude.

Avec le Michelson, nous avons pu observer des interférences avec des sources de cohérence temporelle de plus en plus faible : plus on augmente la largeur de la source spectrale, plus la longueur de cohérence est faible. Ainsi, c'est pour cela que le réglage du Michelson en lumière blanche est plus difficile mais plus précis.

Grâce à ces interférences, nous avons également pu effectuer la mesure de l'épaisseur d'une lame de verre

Autre manip possible de cohérence temporelle au Michelson



Longueur de cohérence temporelle pour l'oeil de la lumière blanche

🔧 Sextant p169

⌚ 8min

Matériel :

- Lampe QI + filtre AC
- interféromètre de Michelson (le /2 marche bien)
- lentille convergente (focale environ 15 cm)
- filtre interférentiel

Le Michelson est réglé en coin d'air, en lumière blanche (on doit voir les teintes de Newton). On règle la valeur du coin d'air de façon à voir toutes les franges de Newton sur l'écran (on observe une frange noire au centre puis des franges colorées qui s'en écartent et dont le contraste s'atténue jusqu'à disparaître : on atteint un blanc d'ordre supérieur). On note sur l'écran l'endroit où les franges disparaissent (au stylo/feutre). On place un filtre interférentiel le plus sélectif possible, de couleur verte (peu importe la couleur mais le vert marche bien). On compte combien d'interfranges (N) séparent les marques au feutre. Dans ces conditions, on a : $L_c = N\lambda$ puisqu'entre deux franges la différence de marche vaut λ et que la longueur de cohérence temporelle est, par définition, la différence de marche maximale entre deux rayons qui interfèrent.

Journal intime post-résultats, hypothèses sur l'origine de l'accent de la speakerine, pronostics pour France-All Black