

# MP08 - INTÉFERENCES LUMINEUSES

12 décembre 2019

Aubry Léonard & Décamps Boris

## Commentaires du jury

### 2017 - 2019 :

Le jury voit encore souvent des dispositifs mal alignés, avec des images présentant des aberrations, ainsi que des éléments optiques prétendument éclairés en incidence normale mais qui ne le sont pas en réalité; rappelons que de nombreux bancs d'optique peuvent être trouvés dans la collection et que l'éclairage d'un réseau en incidence normale ne s'effectue pas « à l'œil »... Ces remarques s'appliquent à tous les montages dans lesquels l'optique est utilisée et pas seulement à ceux qui ont spécifiquement trait à l'optique. D'autre part, il convient de savoir tirer parti des propriétés spécifiques des diodes laser : longueur de cohérence plus petite que celle des lasers He-Ne, accordabilité, ouverture numérique, effet de seuil (fonctionnement en LED, fonctionnement en laser). Il faut également faire attention aux lasers dits « non polarisés », dont la polarisation est en fait partielle et fluctuante, ce qui peut conduire à des signaux très fluctuants en particulier pour des expériences quantitatives. Lors de la réalisation des expériences pendant l'entretien, le jury a constaté les difficultés rencontrées par un nombre significatif de candidats pour former une image correctement en optique.

### 2016 - 2017 :

Il n'est pas 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.

### 2014 - 2015 :

(...)Pourtant ce montage peut fournir des résultats quantitatifs précis. Il est en particulier intéressant de se placer dans des cas limites où la cohérence spatiale ou la cohérence temporelle peuvent être étudiées indépendamment.

### 2012 :

Les dispositifs d'interférences sont très divers. En choisir deux bien maîtrisés permet des présentations de qualité sur les cohérences spatiale et temporelle, et une analyse du lien entre les considérations théoriques et les observations expérimentales. Des montages bien réglés et bien utilisés fournissent des résultats quantitatifs précis si le candidat s'y prend bien. Il ne faut pas confondre les annulations périodiques de contraste obtenues avec un doublet (souvent le doublet jaune du sodium) et la teinte plate de fin de cohérence temporelle due à une trop grande différence de marche. Les battements de contraste donnent des informations sur l'écart de longueurs d'onde entre les 2 raies du doublet, mais ne donnent pas d'information sur la longueur de cohérence de la source lumineuse.

## Bibliographie

- ⚡ *Optique Expérimentale*, **Sextant** → Pour la description interféromètre de Michelson
- ⚡ *Optique : une approche expérimentale et pratique*, **Houard** → Miroir de Fresnel p.200
- ⚡ *Optique : Fondements et applications*, **J. Perez** → Pour les formules théoriques des interférences de systèmes simples.
- ⚡ *Expériences d'optiques à l'agrégation de sciences physiques*, **Duffait** → Pour la description des miroirs de Fresnel.
- ⚡ *Chapitre 6 : Description statistique de la lumière laser*, **A. Aspect** → Pour les rappels sur le théorème de Wiener-Khintchine

## Prérequis

- Modèle ondulatoire de la lumière.
- Interféromètre de Michelson.
- Théorème de Wiener-Khintchine.
- Théorème de Van Cittert-Zernicke.
- Milieux biréfringents.

## Expériences

- ☞ Introduction : Miroir de Fresnel.
- ☞ Cohérence spatiale : Fentes d'Young.
- ~~☞ Cohérence temporelle : Mesure doublet sodium.~~
- ☞ Cohérence temporelle : Mesure largeur mercure.
- ☞ Polarisation : Spectre cannelé en sortie du Quartz.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Expérience introductive</b>	<b>2</b>
1.1	Miroirs de Fresnel . . . . .	2
1.2	Interféromètres, des appareils de précision . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Condition d'obtention d'interférences</b>	<b>3</b>
2.1	Cohérence spatiale . . . . .	3
2.2	Cohérence temporelle . . . . .	5
2.3	Polarisation et différence de phase . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Conclusion</b>	<b>8</b>

## 1 Expérience introductive

### 1.1 Miroirs de Fresnel

Le dispositif des miroirs de Fresnel, bien que peu étendu, permet de mettre rapidement en évidence que la superposition de deux faisceaux lumineux ne mène pas simplement à la superposition des intensités individuelles. Ce montage permet de réintroduire la notion de sources virtuelles ainsi que leur utilisation pour déterminer le déphasage en chaque point de l'écran. Il est aussi l'occasion de montrer que l'on peut augmenter la luminosité des franges en étendant la source dans la direction de l'interface.



**Miroir de Fresnel**

☞ Laser vert, lentille de 50 mm ou objectif microscope.  
 (Trou pour visualiser la source) ⊗ 5 min  
 Miroirs de Fresnel et de la place (5m).  
 Banc optique, mètre ruban, réglet

- Interfranges parallèles à la jointure des miroirs
- Franges présentes uniquement dans le recouvrement des faisceaux
- Différence de chemin optique :  $\delta = \frac{2Rx \sin \alpha}{D}$  donc interfrange  $e = \frac{\lambda D}{2sR \sin(\alpha)}$

L'on peut rapidement remonter à l'angle entre les deux miroirs avec les incertitudes qui vont bien :

$$\alpha = 29.0 \pm 1.5 \text{ mrad}$$

### 1.2 Interféromètres, des appareils de précision

Cette partie a pour but d'introduire les expériences suivantes et de mettre déjà l'accent sur la grande sensibilité des instruments utilisant les interférences optiques. Ceci provient de la grandeur devant laquelle les longueurs sont comparées :  $\lambda$ . Cependant, il faut prendre garde à avoir suffisamment de contraste et de luminosité pour être aussi sensible que possible.

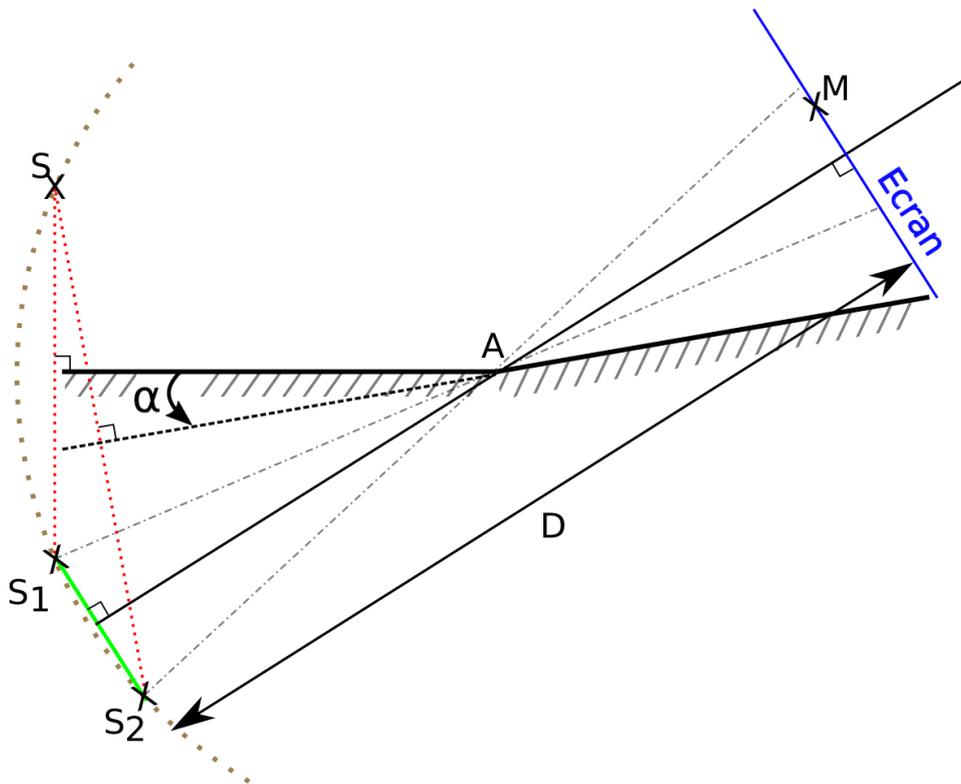


FIGURE 1 – Schéma de l'expérience des miroirs de Fresnel. Les points  $S$ ,  $S_1$  et  $S_2$  sont à la même distance de  $A$ . Celle-ci est dénotée  $R$ . Il serait judicieux d'inclure une image des franges obtenues.

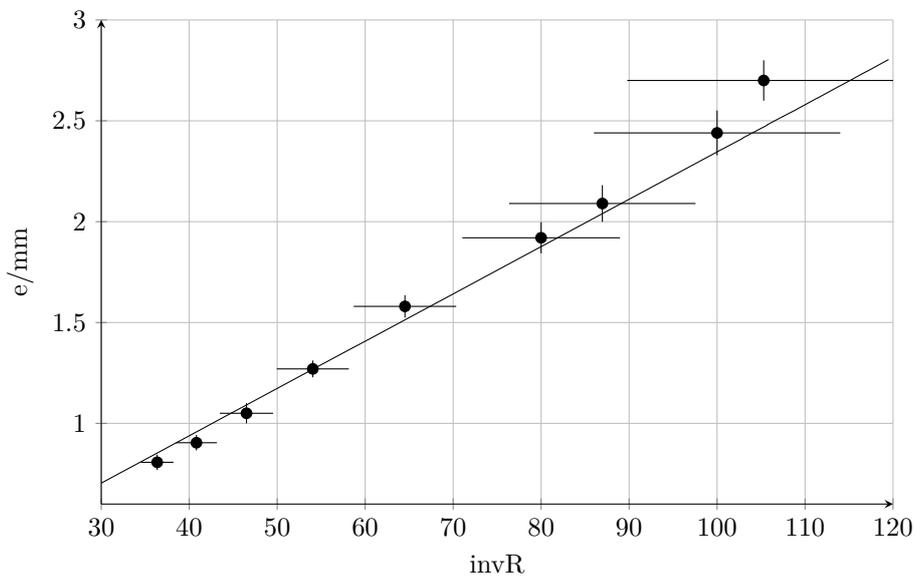


FIGURE 2 – Représentation de l'interfrange mesurée en fonction de l'inverse de distance à la source. L'extrapolation linéaire donne un intervalle de confiance à 95% :  $\alpha=(29.0 \pm 1,5 \text{ mrad})$

## 2 Condition d'obtention d'interférences

### 2.1 Cohérence spatiale

Dépend de la géométrie du montage et plus particulièrement de l'angle sous lequel la source est vue depuis le système optique.



## Fentes d'Young

▲ Lampe spectrale (Hg par exemple) + Condenseur

Filtre interférentiel P124.1,

Diapo Fente source de  $a_s = 120\mu\text{m}$ ,

Diapo fente doubles  $a_F = 70\mu\text{m}$ ,  $e_F = 300\mu\text{m}$ , ☉ 5 min

Lentille de 100mm,

Capteur CCD P17.21

Formule générale de la figure d'interférence :

$$I(x, a_S, d_S, a_F, e_F, d_F) = 2I_0 * \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi x a_F}{\lambda d_F}\right)}{\frac{\pi x a_F}{\lambda d_F}} \right)^2 \left[ 1 + \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi a_S e_F}{\lambda d_S}\right)}{\frac{\pi a_S e_F}{\lambda d_S}} \right) * \cos\left(\frac{2\pi e_F x}{\lambda d_F}\right) \right]$$

avec  $a_S$  la largeur de la fente source,  $d_S$  la distance à la fente source,  $a_F$  la largeur des fentes,  $e_F$  l'espacement entre les fentes,  $d_F$  la distance à l'écran et  $x$  la position sur l'écran. Cette expression révèle que lorsque l'angle  $\theta$  sous lequel est vu la source  $\theta \simeq \frac{a_S}{d_S}$  est plus grand que l'angle de cohérence du système interférentiel  $\theta_{spatial} = \frac{\lambda}{a_F}$ , les franges d'interférences se brouillent. Ici, cela a lieu pour une distance de l'ordre de 14 cm.

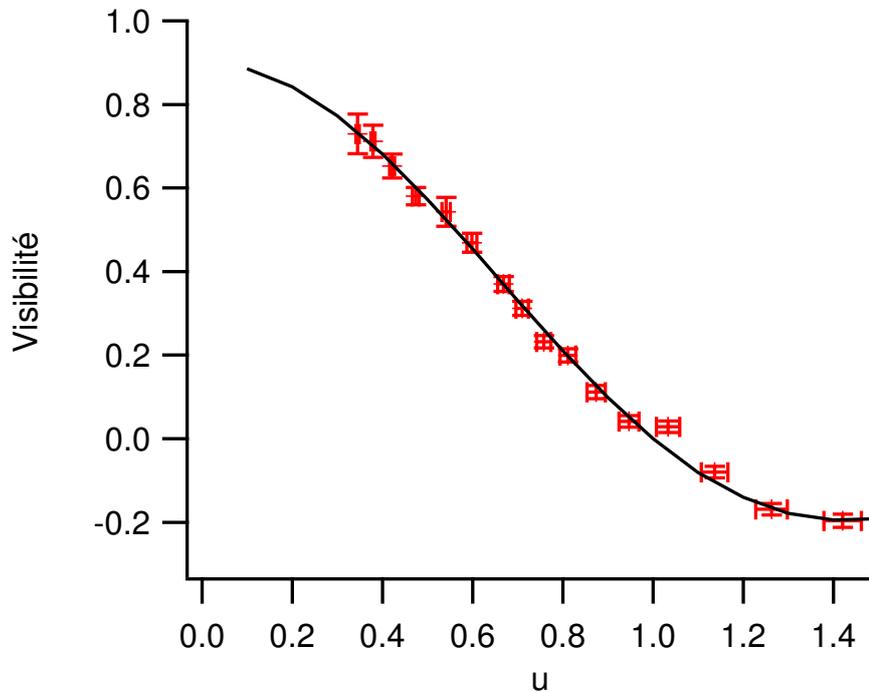


FIGURE 3 – Mesure de la visibilité de la figure d'interférence en fonction de  $u = \frac{a_S a_F}{\lambda d_S}$ . La courbe en trait plein n'est pas une extrapolation linéaire. C'est un simple guide de lecture ayant pour expression  $0.9 \sin(\pi u) / (\pi u)$ .

↓  
L'on peut mentionner que cela peut contraindre la luminosité des figures d'interférences, mais que cela a aussi eu des applications remarquables telles que la mesure de la séparation angulaire entre deux étoiles proches. Les interféromètres à division d'amplitude sont ainsi des outils permettant de s'affranchir de ce type de cohérence, mais ils sont alors limités par...

## 2.2 Cohérence temporelle

La cohérence temporelle<sup>1</sup> est une propriété intrinsèque de la source lumineuse. Elle est généralement exprimée par un temps d'auto-corrélation typique entre trains d'ondes au-delà duquel leur phase relative n'est plus déterminée. Une première illustration à l'aide des trains d'ondes changeant de phase à intervalles fixes permet de rendre compte de ce que cette quantité représente. Une fois celle-ci introduite, nous devons rappeler brièvement le schéma de principe d'un interféromètre de Michelson, mettre en évidence la différence de principe (division d'amplitude) avec le système précédent et montrer les teintes de Newton avant de changer de sources et d'installer une éventuelle détection.

### Doublet du sodium

↗ Interféromètre de Michelson P70.2.

Lampe Quartz Iode et laser.

Lampe sodium, condenseur

Photodiode P18.32, (+détection synchrone)

filtre passe bas (AO et RC) (optionnel)

Lentille de projection de 2m et 200mm.

⊗ 10 min

Attention au bruit électronique lors d'une acquisition

Latis Pro

C'est une expérience qui prend du temps, car l'on fait l'effort de montrer le réglage de l'interféromètre. Parallélisme des séparatrice et compensatrice, interférences avec le laser, teintes colorées avec une lampe. On installe alors la lumière blanche et coin d'air (lentille de 200 mm) et on observe les teintes de Newton sur les miroirs. Enfin, on revient en lame d'air et on installe la lampe de sodium avec condenseur et grande lentille de projection.

En assimilant les raies du sodium à des pics très fins séparés de  $\Delta\lambda$  avec une longueur d'onde moyenne  $\bar{\lambda} = 5892.94$  Å l'interférence peut s'écrire :

$$I(\delta) = 2I_0 \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi\Delta\lambda x}{\bar{\lambda}^2}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{\bar{\lambda}}\right) \right]$$

En mesurant 5 extinctions, on trouve une différence de marche  $\Delta l = 2926 \pm 50 \mu\text{m}$ <sup>2</sup>. Cela nous permet d'en déduire :

$$\Delta\lambda = \frac{5\bar{\lambda}^2}{\Delta l} = 5.93 \pm 0.10 \text{ \AA}$$

qui coïncide bien avec la valeur tabulée  $\Delta\lambda_{\text{tab}} = 5.974 \text{ \AA}$ .

*Et non, il ne sert à rien (ou presque) de réaliser cette manipulation dans le cadre de la cohérence temporelle car ce qui a été observé ne relève pas de la largeur spectrale d'une source mais juste de la présence de deux fréquences ce qui ne limite pas, à ce niveau, la précision d'un interféromètre*

Il faut donc mesurer la largeur spectrale d'une raie<sup>3 4</sup>.

### Largeur spectrale mercure

↗ Interféromètre de Michelson P70.2.

Lampe Quartz Iode et laser.

Lampe Mercure, condenseur, filtre interférentiel

Photodiode P18.32, détection synchrone et filtre passe bas (AO et RC) (optionnel)

Lentille de projection de 2m et 200mm

Filtre interférentiel vert 546 nm.

⊗ 10 min

Idem que précédemment sauf que cette fois, on mesure l'interférogramme et l'annulation presque totale du contraste après une différence de marche d'environ 300  $\mu\text{m}$ .

1. Quelques noms permettant de dresser un historique : Verdet, Michelson, Von Laue, Cittert et Zernike.

2. l'incertitude principale sur cette mesure vient de la position de l'extinction du contraste.

3. Pour plus de détails sur le doublet du sodium, voir l'excellent exercice 2, TD6, du cours d'onde et d'optique

4. On peut revenir à la définition du temps de cohérence  $\tau_{1/2} = \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 \gamma(\tau) d\tau \right] / \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \gamma(\tau) d\tau \right]$  pour s'en assurer

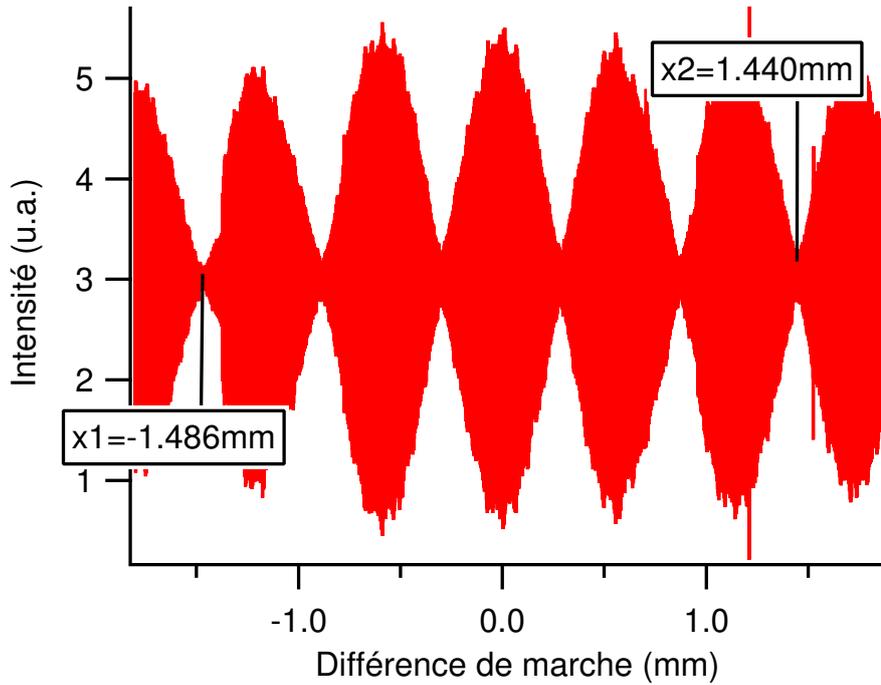


FIGURE 4 – Amplitude lumineuse en fonction de la différence de marche. La séparation entre 5 extinctions permet de remonter à la distance entre les deux raies du sodium :  $5.93 \pm 0.10 \text{ \AA}$ . Cette figure est obtenue en compensant régulièrement le défaut de parallélisme qui apparaît entre les miroirs lors de la translation. Celui-ci engendre une figure non symétriques qui fait apparaître artificiellement une décroissance du contraste.

En supposant la raie rectangulaire de largeur  $\Delta\lambda$ , on aura :

$$I(\delta) = 2I_0 \left[ 1 + \sin\left(\frac{\pi\Delta\lambda\delta}{\lambda^2}\right) \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) \right]$$

En mesurant la différence de marche  $2\delta$  entre les deux minima de la visibilité des franges, on obtient :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\delta} = 1.0 \pm 0.1 \text{ nm}$$

Il peut être judicieux de mesurer précisément cette distance en utilisant un laser comme étalon de distance...

*C'est à la fois une limite et un outil permettant de caractériser les sources lumineuses. On peut par exemple penser aux interféromètres à fibres qui font des kilomètres de long afin de caractériser la stabilité en fréquence d'une source laser. De façon similaire, la biréfringence peut limiter les performances d'une fibre optique ou être judicieusement utilisée pour créer un spectre présentant des annulations régulières.*

### 2.3 Polarisation et différence de phase

Cette expérience assez rapide permet de montrer comment utiliser le contraste d'une figure d'interférence pour remonter au spectre de la source. Elle a aussi l'avantage de permettre d'introduire la polarisation dans le phénomène d'interférence, même si celui-ci a lieu en dehors de l'interféromètre de Michelson. La présence de polariseur croisés permet néanmoins de montrer que si les axes de projections de la polarisation ne sont pas correctement choisis, le retour du contraste n'a pas lieu. De plus, cette expérience montre que les interférences peuvent à la fois être utilisées pour mesurer des propriétés physique et pour créer de propriétés voulues (cavités Fabry-Perot pour la finesse spectrale par exemple.).

### Biréfringence du quartz

☞ Source QI + AC, Lentille 200 mm

Polariseur et analyseur P119.1

Michelson (P70.2) réglé en teintes de Newton.

⊙ 5 min

Lame cristallines : Quartz || 4 mm et support P 7.14

Photodiode P18.32 et oscilloscope.

### Mesure biréfringence du Quartz

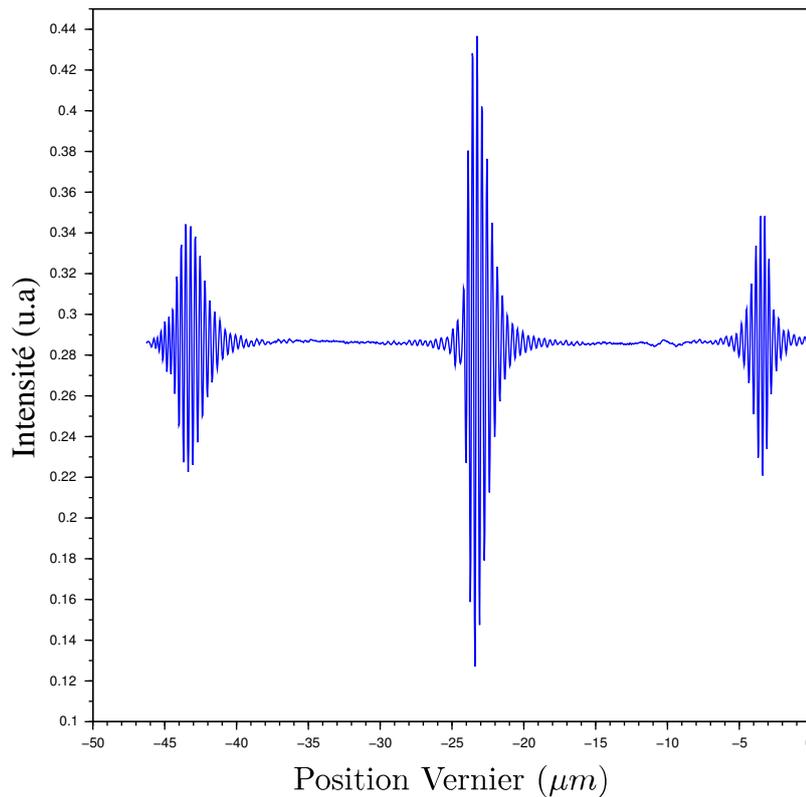


FIGURE 5 – Mesure de l'intensité des teintes de Newton pour différentes positions de Vernier. Le contraste des franges réapparaît, et est égal à la moitié du contraste à l'ordre zéro lorsque la différence de marche sonde la composante régulière du spectre de la source.

L'expression de la différence de phase entre les deux polarisations est :

$$\Delta\Phi(\lambda) = \frac{2\pi\Delta ne}{\lambda}$$

avec  $\Delta n = 0.0091$  la différence d'indice et  $e$  l'épaisseur de la lame de Quartz. L'interférence sur le polariseur de sortie fait que le spectre initial est modulé par  $[1 + \cos(\Delta\Phi(\lambda))]$ . Les interférences redeviennent constructives lorsque le coefficient de corrélation reprend une valeur non nulle ce qui intervient<sup>5</sup> pour un chariotage  $\Delta x/2$  tel que :

$$\Delta x = \Delta ne$$

la mesure de  $\Delta x$  donne  $40.01 \pm 0.07 \mu\text{m}$ . Ce qui se traduit par une mesure de l'épaisseur de la lame de verre :

5.  $\int_{-\infty}^{+\infty} S_0(\nu) \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( e^{2i\pi \frac{\nu\Delta ne}{ce}} + e^{-2i\pi \frac{\nu\Delta ne}{ce}} \right) \right] e^{-2i\pi\nu\tau} d\nu$  est non nul pour trois valeurs différentes de  $\tau$

$$e = 4.40 \pm 0.10 \text{ mm}$$

Ici, l'incertitude dominante est celle faite sur la constance de  $\Delta n$  sur la plage du visible. Celui-ci varie en effet de plus de 2%<sup>6</sup> ce qui limite la sensibilité de notre mesure.

### 3 Conclusion

Dans ce montage, il y a de nombreux points clés à présenter. Les concepts de cohérences temporelle et spatiales sont indispensables à définir proprement. Les interférences optiques à deux ondes<sup>7</sup> sont séparées en deux catégories : division de front d'onde et division d'amplitude. La division d'amplitude permet d'observer des intensités plus lumineuses dans une région de l'espace strictement définie ("théorème" de localisation) lorsque la source est incohérente. Il est important de ne pas oublier le degré de liberté interne, la polarisation, qui conditionne aussi l'obtention d'interférences. Enfin pour élargir les exemples d'utilisation des interféromètres utilisés afin d'effectuer des mesures de précision en physique, l'on peut citer les détecteurs d'onde gravitationnel, les gravimètres, les gyromètres ainsi que toute l'étude des surfaces et des contraintes qui peuvent être réalisées par interférométrie optique. Ne pas oublier aussi à quel point les interféromètres sont clés pour réaliser des surfaces réfléchissantes performantes (filtres diélectriques) et pour obtenir des références de fréquence ultra stables (cavité de Fabry-Perot, peigne de fréquence, définition de la seconde,...) mais cela risque de nous mener en dehors du champs des interférences purement optiques.

## Annexe

### Rappels et notes sur théorème de Wiener-Khintchine

Développé dans un cadre plus général des processus aléatoires stationnaires, le théorème de Wiener-Khintchine prend la forme suivante pour les ondes Electromagnétiques :

$$\Gamma(\tau) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} S(\nu) e^{-2i\pi\nu\tau} d\nu$$

où  $\Gamma$  est la fonction d'autocorrélation de l'onde EM et  $S(\nu)$  est sa densité spectrale de puissance. Ce théorème est particulièrement utile car lors de l'interférence à deux ondes, le facteur de visibilité est lié à  $\Gamma$  :

$$I(P, \tau) = 2I_0(P) \left[ 1 + |\gamma(\tau)| \cos\left(\frac{2\pi c_e \tau}{\lambda} + \alpha(\tau)\right) \right]$$

où  $\gamma$  est la version normalisée de  $\Gamma$  et la phase de  $\gamma$  :  $\alpha(\tau)$  a été explicitement introduite dans le terme oscillant pour insister sur l'existence d'un déphasage dû à la cohérence temporelle (penser à l'inversion de contraste par exemple). Petite remarque intéressante du Born & Wolf : "Les ondes se propagent mais il en est de même des corrélations entre elles."

### Rappels et notes sur le théorème de van Cittert-Zernike

Légèrement moins applicable à notre situation (il est beaucoup plus utilisé pour l'étude de sources astrophysiques) ce théorème permet de relier la contraste maximal que l'on peut obtenir dans un interféromètre aux propriétés de cohérence spatiale de l'intensité d'une source lumineuse ainsi que de l'angle sous lequel celle-ci illumine le système optique. Dans cette expression, la source est supposée totalement incohérente.

$$\Gamma(u, v, 0) = \iint I[\cos(\alpha), \cos(\beta)] e^{-2i\pi(\cos(\alpha)u + \cos(\beta)v)} d\cos(\alpha) d\cos(\beta)$$

## Questions

- Pourquoi utiliser un laser pour faire des interférences avec les miroirs de Fesnel ?  
→ Pour avoir une bonne luminosité et suffisamment de cohérence temporelle.
- Pourquoi le déphasage dû à la perte de cohérence spatiale pose problème pour voir des interférences lumineuses ?  
→ Parce qu'il dépend de l'angle sous lequel l'observateur voit le point source, et que, pour des points source incohérents, les intensités lumineuses s'additionnent.

6. voir [refractiveindex.info](http://refractiveindex.info) pour les données des indices optiques.

7. il serait d'ailleurs possible d'inclure dans ce montage un interféromètre à N ondes.

- Pourquoi la quantité importante pour évaluer la cohérence spatiale est un angle?  
→ Car ce n'est pas une propriété de la source seule mais du système source + interféromètre.
- De quel type d'incohérence se libère-t-on avec un interféromètre de Michelson ?  
→ De la cohérence spatiale, à condition d'observer les interférences dans un plan bien défini (localisation des franges d'interférence).
- Peut-on utiliser à la place d'un interféromètre de Michelson un système à division du front d'onde ?  
→ Non.
- Pourquoi chercher le contact optique sur un interféromètre de Michelson ?  
→ Pour pouvoir observer des franges avec des sources très peu cohérentes temporellement.
- Montage surprise : montrer le phénomène de diffraction dans les conditions de Fraunhofer exactes.  
→ Le montage le plus rigoureux est avec source + images envoyées à l'infini. Il est aussi possible d'annuler le terme d'ordre le plus bas en annulant le nombre de Fresnel (distance à la source = distance à l'écran d'observation).
- Comment faire du filtrage ?  
→ Obturer, dans le plan de Fourier, les fréquences spatiales d'un objet éclairé en lumière parallèle puis observer l'image de la grille par la lentille de projection.