

# MP08 – INTERFÉRENCES LUMINEUSES

22 mai 2019

Lagoin Marc & Ramborghi Thomas

## Commentaires du jury

- Savoir régler un Michelson avant d'arriver à l'oral.
- Les connaissances théorique sur la cohérence temporelle et spatiale doivent être reliées aux observations expérimentales.
- Il faut maîtriser les notions de localisation et de non-localisation des interférences lumineuses.

## Bibliographie

- ✦ *Optique expérimentale*, **Sextant** le chapitre II.2 de la page 142 à la page 179 traite du sujet du montage
- ✦ *Physique expérimentale*, **Jolidon** pour le réglage d'un Michelson page 83 et page 218 pour l'étude du doublet du sodium

## Expériences

- Étude du système de fentes d'Young
  - ☛ Mise en évidence qualitative de la cohérence temporelle
  - ☛ Vérification de la relation entre l'interfrange,  $\lambda$ , la distance fentes-écran et la largeur entre les fentes
  - ☛ Mise en évidence qualitative de la cohérence spatiale
  - ☛ Mesure l'angle de cohérence spatiale d'une source incohérente
- Étude de l'interféromètre de Michelson
  - ☛ à suivre ...

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Interféromètre à division du front d'onde : Fentes d'Young</b>	<b>2</b>
1.1	Étude de la cohérence temporelle (page 167 du Sextant pour un rappel théorique) . . . . .	3
1.2	Étude de la cohérence spatiale (page 171 du Sextant pour un rappel théorique) . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Interféromètre à division d'amplitude : le Michelson</b>	<b>4</b>

## Introduction

**Introduction :** Comme nous l'avons vu précédemment en cours, le phénomène d'interférence est une manifestation du caractère ondulatoire de la lumière. En effet, la vision corpusculaire de la lumière prévoit que les intensités de deux sources lumineuses que nous superposons sont censées s'additionner. Or nous observons que ce n'est pas toujours de cas. Ce phénomène résulte donc de l'interaction entre les différentes ondes superposées.

Nous pouvons prendre la première expérience afin de l'illustrer. Nous cachons une fente puis la seconde pour finir par laisser passer la lumière par les 2 fentes.

Cependant cette constatation n'est pas toujours faite et certaines fois nous observons une simple sommation. Quelle est donc la recette à suivre ?

- Les 2 sources doivent être cohérente spatialement : 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.
- Les 2 sources doivent être cohérente temporellement : une source réelles n'étant pas monochromatique, nous savons que l'onde émise résultante est en réalité un paquet d'onde de longueur fini ; ce qui correspond à un spectre de longueur finie. Si la taille caractéristique du train d'onde multipliée par  $c$  est inférieure au temps de réponse du détecteur, alors les 2 ondes ne peuvent interférer.
- À ces deux limitations de cohérence s'ajoute une restriction sur la polarisation. En effet 2 ondes polariser orthogonalement ne peuvent interférer.

En vue de la difficulté liée aux problèmes de cohérences, nous allons devoir ruser lors du choix de nos sources. Outre le recours aux lasers, nous avons 2 moyens de procéder utilisant une source unique :

- \* Nous pouvons choisir de séparer le front d'onde de la source en deux : nous parlons dans ce cas de division du front d'onde. Dans ce cas, chaque sous-source possède l'amplitude de l'onde initiale mais une extension spatiale réduite.
- \* La seconde possibilité est de faire passer le faisceau incident par un milieu semi-réfléchissant : nous parlons dans ce cas de division d'amplitude. Ici chaque sous-source possède l'extension du faisceau incident mais avec, cette fois-ci, une amplitude réduite.

Nous allons, au cours de ce montage vous montrer un dispositif illustrant chacun un type d'interféromètre. Nous nous contenterons, dans notre première approche, à de l'interférence à 2 sous-sources.

### Transition :

Comme premier système, nous allons utiliser d'un des premiers systèmes à avoir mis en évidence les interférences lumineuses : les fentes d'Young<sup>a</sup>. Le système de fentes d'Young fut proposé par Augustin Fresnel. Il possède l'avantage d'être relativement simple ; nous avons vu le calcul associé en cours.

<sup>a</sup>. La première expérience est celle des trous d'Young réalisé par Thomas Young en 1801 qui cherchait à montrer, par analogie, que le phénomène d'interférence observé pour des ondes sonores pouvait s'étendre aux ondes lumineuse.

## 1 Interféromètre à division du front d'onde : Fentes d'Young

Les fentes d'Young sont deux fentes identiques, de largeur  $d$  séparées d'une distance  $a$ . Un interféromètre de type fentes d'Young repose sur la diffraction par chacune des fentes, les deux ondes diffractées interférant. Bien que la diffraction soit essentiel pour permettre la superposition des faisceaux, nous concentrerons nos études sur l'interférence durant ce montage.

Lors de l'étude des cohérences temporelles et spatiales rappelées précédemment, il faudra avoir un montage de bonne qualité, car les figures sont très peu lumineuses. Les conseils qui suivent concernent ces expériences :

- Pour éviter les lumières parasites, placer un tube de carton entre les fentes d'Young et le capteur CCD placé en fin de montage pour réaliser les mesures.
- Pour perdre le moins de lumière possible, rendre le montage aussi compact que possible, aligner correctement les différents éléments, et éclairer au maximum la bifente. Focaliser la lumière de la QI sur la fente source à l'aide d'un condenseur.

- Utiliser les fentes d'Young les plus fines et les rapprocher si possibles pour obtenir une figure d'interférence aussi large que possible et un interfrange aussi grand que possible.

## 1.1 Étude de la cohérence temporelle (page 167 du Sextant pour un rappel théorique)

On se place dans cette partie dans l'étude d'une source peu étendue (pour ne pas être gêné par la cohérence spatiale).

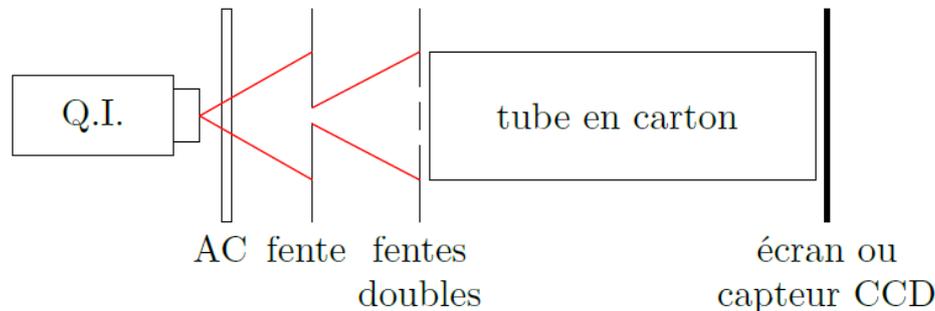


FIGURE 1 – Dispositif d'étude des fentes d'Young. Cette figure a été prise dans le poly de Jérémy Ferrand.

En utilisant des filtres interférentiels, on met en évidence que chaque longueur d'onde contenue dans le rayonnement émis par la lampe QI crée son propre système d'interférences, caractérisé par un interfrange différent.

L'expérience proposée ici permet de mettre en évidence le mécanisme physique, et de vérifier la relation déterminée en cours

$$i = \frac{\lambda D}{a} \quad (1)$$

avec :  $i$  l'interfrange,  $D$  la distance entre les fentes et l'écran (ou le capteur) et  $a$  l'écart entre les fentes. En revanche, elle ne permet pas de mesurer une longueur de cohérence temporelle.



### mise en évidence de la cohérence temporelle et vérification de l'équation 1



⌚ 5 minutes

On réalise le montage dont le schéma est donné en figure 1. Éclairer les fentes d'Young par une source de lumière blanche. En utilisant des filtres interférentiels, observer la figure d'interférence pour différentes longueurs d'ondes, toutes autres choses étant fixées. On peut commencer par une étude qualitative avec un écran blanc avant de prendre des mesures.

- mise en évidence de la cohérence temporelle : On observe que la figure d'interférence s'élargit avec la longueur d'onde, tous les autres paramètres étant fixés. Sans filtre interférentiel, ces figures d'interférence se superposeraient, ce qui conduirait à un brouillage. À la lumière de ces observations, on interprète la figure d'interférence en lumière blanche et on discute de l'effet de la cohérence temporelle. Cette partie peut être fait sur écran (car surement plus visuel).
- vérification de la relation 1 : On fait varier  $\lambda$  et on mesure  $i$  avec Caliens. On trace la droite  $i = f(\lambda)$ , on remonte à  $D$  ou  $a$  par régression linéaire. Pour réduire l'incertitude, on pense par prendre un grand nombre d'interfranges.

## 1.2 Étude de la cohérence spatiale (page 171 du Sextant pour un rappel théorique)

Nous nous plaçons cette fois-ci dans le cas d'une source monochromatique (pour ne pas être gêné par la cohérence temporelle). Étudions l'influence de la taille de la source, que nous noterons  $l_S$ , sur la figure d'interférences. Elle est

situé à une distance  $d$  des fentes. En prenant une fente source fine, bien que la source de lumière soit polychromatique, il est possible d'observer des interférences. Les différents points de la fente réglable sont autant de points source a priori incohérents entre eux, ils vont donc produire des figures d'interférences qui vont se brouiller, mais si la source a une extension spatiale faible, ce brouillage est faible.

### **mise en évidence de la cohérence spatiale**



⊖ 1 minute

Si on élargit la fente source, le brouillage se fait plus fort et la figure d'interférences disparaît progressivement.

Pour la mesure quantitative qui va suivre, nous conseillons vivement de lire le Sextant de la page 171 à 177. Un résumé est donné ci-dessous.

Rappel des rayonnements des différents types de sources (voir figure page 172) :

- un ensemble de sources élémentaires incohérentes entre elles rayonnent dans toutes les directions par addition des intensités de chaque sous-source.
- un ensemble de sources élémentaires cohérentes entre elles et très proches a un rayonnement d'autant plus directif que sa largeur est grande  $l_S$ . À grande distance, elles rayonnent principalement dans un angle  $\theta_C \approx \frac{\lambda}{l_S}$  donné par la diffraction de Fraunhofer. L'angle  $\theta_C$  est appelé largeur angulaire de cohérence spatiale.

Il est possible en pratique de réaliser une source secondaire cohérente à partir d'une source incohérente. Pour cela, il faut placer une fente dans la zone de l'angle  $\theta_C$  (voir figure page 173).

### **Mesure l'angle de cohérence spatiale d'une source incohérente**



⊖ 5 minute

Nous allons modifier la distance  $d$  entre la fente source et les fentes d'Young. Partant d'une configuration où les fentes sont contenues dans le cône, nous allons réduire  $d$  jusqu'à ce que la distance  $a$  entre les fentes soit plus petite que la largeur de la lumière incidente. Nous passons dans cette manière d'une source cohérente à une source incohérente. Si nous capturons la figure obtenue à l'aide de Caliens, nous observons une disparition de l'interférence (des pics) lorsque :

$$\tan\left(\frac{\theta_C}{2}\right) = \frac{a}{2d} \quad (2)$$

Il nous suffit alors de repérer la disparition des interférences et mesurer la distance  $d$  à laquelle le phénomène se produit. Nous pourrions vérifier la cohérence de ce résultat en le comparant au résultat du quotient de  $\lambda$  par  $l_S$  ( $\theta_C \approx \frac{\lambda}{l_S}$ ).

### **Transition :**

Comme nous venons de le voir, ce type d'interféromètre peut se retrouver inefficace dès lors que la source est trop étendue. Nous allons voir à présent, le second type d'interféromètre qui n'est pas limité par la cohérence spatiale.

## **2 Interféromètre à division d'amplitude : le Michelson**

Nous ne détaillerons pas ici le réglage de l'interféromètre car il est très bien décrit dans le Jolidon page 83.

### **Étude interférométrique du doublet du sodium**

↗ Jolidon page 218

⊖ 5 minute

Tout y est très bien expliqué donc nous ne ferons pas de redite !

Si les manip sont trop faciles et qu'il reste du temps en fin de montage (LOL), nous pouvons également réaliser l'étude de la cohérence de polarisation avec l'interféromètre de Michelson (page 223) ou l'interférence par biréfringence (page 233).

## Conclusion

Lors des différentes expériences que l'on a réalisées, nous avons pu observer expérimentalement les notions de cohérence temporelle et spatiale. Pour un dispositif à division du front d'onde, l'élargissement spatial de la source entraîne un phénomène de brouillage. Les interféromètres à division d'amplitude permettent de s'affranchir de cet effet : pour une source étendue, les franges ne sont pas brouillées mais localisées. En revanche, on ne peut s'affranchir de la cohérence temporelle dès lors que nous nous éloignons du contact optique. Ceci se traduit par l'apparition des teintes de Newton puis d'un blanc d'ordre supérieur.

Cependant, il est possible de tirer partie de cette figure à l'aide d'un outil d'analyse spectral. En effet, dans le cas d'une lame mince éclairée en lumière blanche, l'écart de cette teinte au blanc nous permet de déterminer les longueurs d'ondes qui interfèrent destructivement ; qui nous permette de remonter à des informations sur la lame telles que son épaisseur.

En ouverture, nous pouvons parler de la cohérence de polarisation si nous n'avons pas eu le temps de la traiter durant le montage.

## Annexe

### Autres dispositifs d'interférométrie à division du front d'onde (Wikipédia)

Parmi les alternatives aux fameuses fentes d'Young, nous pouvons citer :

- les miroirs de Fresnel : dispositif interférométrique composé de deux miroirs plans légèrement inclinés l'un par rapport à l'autre. Inventé par Augustin Fresnel, ce dispositif est destiné à mettre en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. Il voit le jour à la même période que l'expérience des trous de Young, mais les miroirs de Fresnel ne démontrent que le phénomène d'interférences, alors que les trous d'Young permettent de mettre en évidence diffraction et interférences. Un schéma issue de Wikipédia est donné en figure 2.

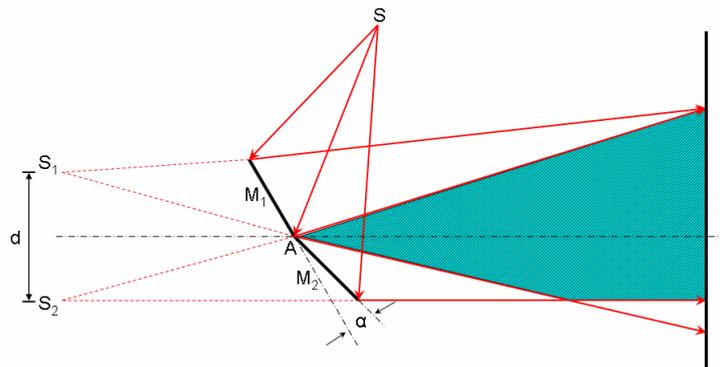


FIGURE 2 – Schéma des miroirs de Fresnel.

- le miroir de Lloyd : dispositif qui a permis de mettre en évidence l'existence d'interférences entre deux faisceaux de lumière issus d'une même source en utilisant une surface réfléchissante. Un schéma issue du site [optique ingénieur](#) est donné en figure 3.
- la bilentille de Billet : ce dispositif utilise une source primaire associée à une lentille découpée selon son diamètre en deux demi-lentilles, et un écran placé perpendiculairement à l'axe optique de la bilentille. Chaque demi-lentille donne sa propre image de la source primaire. Chaque image constitue donc une source secondaire. Un schéma issue du site [optique ingénieur](#) est donné en figure 4

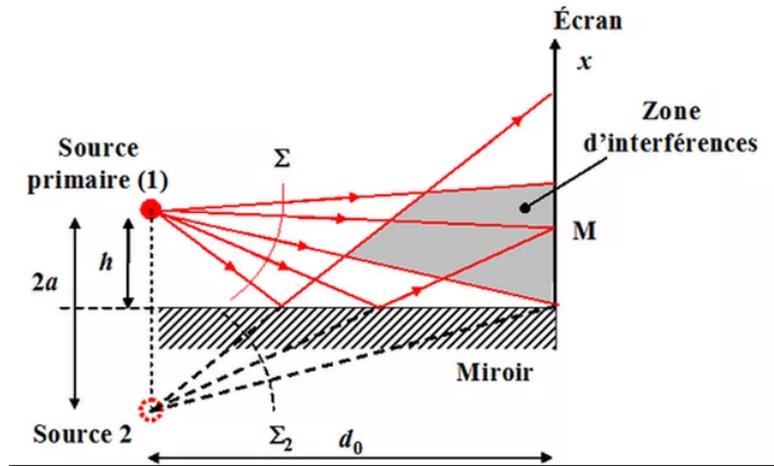


FIGURE 3 – Schéma du miroir de Lloyd.

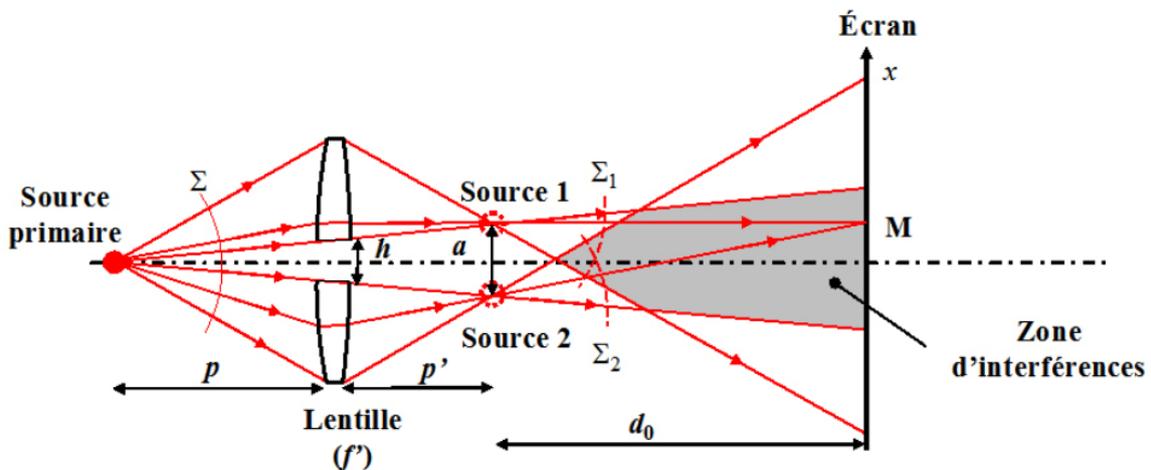


FIGURE 4 – Schéma de bilentille de Billet.

### Influence de la largeur des sources

Si nous prenons 2 fentes séparées d'une longueur a, à une distance l de la source non ponctuelle de largeur b et une distance D de l'écran, alors l'intensité en 1 point x de l'écran est donnée par :

$$I = 2 I_0 \left( 1 + \gamma \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{a x}{D}\right) \right) \quad \text{avec :} \quad \gamma = \text{sinc}\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{a b}{l}\right) \tag{3}$$

### Influence de la largeur spectrale

Si nous reprenons le système précédent mais en remplaçant la source étendue par une source ponctuelle de largeur spectrale  $\Delta\nu$  autour de  $\lambda_0$ , alors l'intensité sur l'écran est donnée par :

$$I = I_0 \left( 1 + \gamma \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{a x}{D}\right) \right) \quad \text{avec :} \quad \gamma = \text{sinc}\left(\frac{\pi a x \Delta\nu}{c D}\right) \tag{4}$$

### Cohérence temporelle

**D'après Wikipédia :** La cohérence temporelle d'une onde est liée à la largeur de bande spectrale de la source. Une onde réellement monochromatique (une seule fréquence) aurait, en théorie, un temps et une longueur de cohérence infinis. En pratique, aucune onde n'est réellement monochromatique (cela impliquerait un train d'ondes de durée infinie), mais, en général, le temps de cohérence de la source est inversement proportionnel à sa largeur de bande  $\Delta\nu$ . On définit le temps de cohérence  $\tau_c$  de la source par l'inverse de la largeur spectrale  $\tau_c = \frac{1}{\Delta\nu}$ . La longueur de cohérence temporelle est  $L_c = c \tau_c$  où c est la vitesse de propagation de l'onde. Si les différents chemins suivis par l'onde diffèrent d'une longueur supérieure à  $L_c$ , il n'y aura pas d'interférences : on peut dire, dans ce cas, que la différence de marche

est supérieure au train d'onde (ou longueur de cohérence).

Reprenons le cas d'une double fente équivalent à un système de 2 sous-sources. Si nous notons  $\tau$  le retard d'un faisceau lumineux passant par une fente par rapport à celui passant par l'autre, alors l'intensité sur l'écran  $I$  (tel que  $I = \langle |A|^2 \rangle$ ) s'écrit :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re}(\gamma(\tau)) \quad \text{avec :} \quad \gamma = \frac{\langle A(t)A^*(t-\tau) \rangle}{\langle |A(t)|^2 \rangle} \quad (5)$$

où  $\gamma$  est le degré de cohérence complexe. Si  $I_1 = I_2$ , alors nous pouvons montrer que le contraste  $\mathcal{C} = |\gamma|$ .

Un résultat important est le **théorème de Wiener Khintchine** : la densité spectrale de puissance  $g(\nu)$  d'un processus stochastique stationnaire au sens large est analogue à la transformée de Fourier de la fonction d'auto-corrélation  $\mathcal{A}$  correspondante ; ce qui s'écrit :

$$g(\nu) \equiv \frac{|A(\nu)|^2}{2T} = \int \mathcal{A} e^{2i\pi\nu t} dt \quad \text{avec :} \quad \mathcal{A} \equiv \langle A(t)A^*(t-\tau) \rangle \quad (6)$$

Application : spectromètre à transformée de Fourier  $\rightarrow$  mesure  $\gamma(\tau) \xrightarrow{TF^{-1}} g(\nu)$  spectre.

## Cohérence spatiale

**D'après Wikipédia** : Les ondes ont également une cohérence spatiale ; c'est la capacité de chacun des points du front d'onde à interférer avec n'importe quel autre point. En effet, si la source est étendue, il y aura addition d'ondes incohérentes émises par chaque point source, ce qui peut brouiller l'illumination et générer des interférences. L'expérience des fentes de Young repose sur la cohérence spatiale du faisceau illuminant les deux fentes : si le faisceau avait été incohérent spatialement, par exemple si la lumière solaire n'était pas passée à travers une première fente, alors aucune frange d'interférence ne serait apparue. La largeur de cohérence de la source donne la taille maximale permise pour qu'il y ait interférences. Dans le cas des fentes de Young, la largeur de cohérence est  $l_s = \frac{\lambda D}{\Delta S}$  ( $\lambda$  est la longueur d'onde de la source,  $\Delta S$  la largeur de la distribution spatiale d'intensité et  $D$  la distance où l'on se place) : la largeur de cohérence dépend donc à la fois de caractéristiques intrinsèques à la source ( $\lambda$  et  $\Delta S$ ) et de la distance à laquelle on se trouve : plus on s'éloigne, plus la source se rapproche d'une source ponctuelle.

Comme dans le cas de la cohérence temporelle, reprenons le cas de deux fentes où  $P_1(x_1, y_1)$  et  $P_2(x_2, y_2)$  sont leur position. nous définissons le degré de cohérence complexe  $\gamma^1$  :

$$\gamma = \frac{\langle A(P_1)A^*(P_2) \rangle}{\sqrt{\langle |A(P_1)|^2 \rangle \langle |A(P_2)|^2 \rangle}} \quad (7)$$

Ici le résultat important est le **théorème de Zernike Van Cittert** : la transformée de Fourier de la distribution spatiale d'intensité est égale au degré de cohérence complexe ; ce qui s'écrit :

$$\langle A(P_1)A^*(P_2) \rangle = \int I(x, y) e^{-\frac{2i\pi}{\lambda}(px + qy)} dx dy \quad (8)$$

où  $p = \frac{(x_1 - x_2)}{d}$  et :  $q = \frac{(y_1 - y_2)}{d}$

1. Pour moi, il s'agit exactement de la même formule mais en remplaçant la variable temporelle par une variable spatiale.