

MP08 – INTERFÉRENCES LUMINEUSES

22 octobre 2015

*"Vous allez me dire "Très bien", je vais vous répondre
"Oui"."*

Soulard Pierre & Favreau Lucile

ISABELLE ESSA

Commentaires du jury

2015 : Il n'est raisonnable d'envisager d'apprendre à régler un interféromètre de Michelson devant le jury.

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.

2010, 2011 : 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.

Même si le montage a changé de nom en 2013, passant de "Interférences lumineuses : conditions d'obtention" à "Interférences lumineuses", les notions de cohérences spatiales et temporelles me semblent indispensables à mettre en évidence dans ce montage. Elles permettent de plus de faire une transition entre division du front d'onde et division d'amplitude et d'expliquer les différences entre les deux systèmes d'interférences. Pour autant, je pense qu'il est aussi nécessaire de montrer l'intérêt pratique des interférences et pourquoi on les utilise encore aujourd'hui.

De plus, au vu des commentaires de jury, il me semble indispensable de régler un Michelson en direct si on en utilise un. Comme c'est mon premier montage mon plan sera des plus "classique".

Bibliographie

✍ *Optiques expérimentale*, **Sextant**
✍ *Expériences d'optique*, **R. Duffait**
✍ *Optique*, **Houard**

→ Biblique

→ Biblique.

→ Pratique car on a des images de ce qu'on doit obtenir et tend un bon lien entre expérimentation et théorie.

Prérequis

➤ Optique

Expériences

- ☞ Mesure de l'interfrange en fonction de λ
- ☞ Mesure du contraste en fonction de l'angle d'ouverture de la source
- ☞ Mesure de la longueur de cohérence temporelle du blanc pour l'œil
- ☞ Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre

Table des matières

1	Interféromètre à division du front d'onde : les fentes d'Young	2
1.1	Cohérence temporelle	2
1.2	Cohérence spatiale	4
2	Interféromètre à division d'amplitude : interféromètre de Michelson	4
2.1	Réglage en live du Michelson	4
2.2	Cohérence spatiale et localisation	5
2.3	Cohérence temporelle : longueur de cohérence temporelle du blanc pour l'œil	5
3	Mesure à l'aide d'interférences	6
4	Conclusion	6

Introduction

Lorsque l'intensité lumineuse n'est pas suffisante pour qu'on puisse voir, on allume une deuxième lumière. On se dit tout naturellement que les intensités vont s'additionner.

Illustration du phénomène d'interférence

Matériel : Dispositifs des fente d'Young avec une fente puis deux.

On éclaire une fente puis deux et on montre que l'intensité résultante n'est pas la somme des deux intensités. On remarque de plus que les franges sont irisées (à relier avec l'expérience de cohérence temporelle sur les fentes d'Young.)

Nous voyons ainsi apparaître le phénomène d'interférence : l'intensité résultante n'est pas la somme des intensités de chaque source. Pour autant ce phénomène n'est pas visible tout le temps : il existe donc des conditions d'obtention. Des ondes lumineuses vont interférer si elles sont issues du même point source, à la même longueur d'onde et polarisées dans le même sens.

Dans ce montage je vais illustrer les notions de cohérence temporelle et spatiale et mesurer des grandeurs associées.

Cohérence temporelle : deux ondes de fréquences différentes ne peuvent interférer de façon cohérente à l'échelle de temps de nos récepteurs. On observe donc la somme de leur figure de diffraction.

Cohérence spatiale : les différentes sous-sources qui composent une source large spatialement sont incohérentes entre elles. On observe donc la somme de leur intensité et de leur figure de diffraction. Si les différentes figures d'interférences ne se recouvrent pas, il y a brouillage.

1 Interféromètre à division du front d'onde : les fentes d'Young

Le premier dispositif étudié sera les fentes d'Young, préférées aux trous d'Young car le montage sera plus lumineux. Il fut réalisé pour la première fois en 1801 par Thomas Young et permit de mettre en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. Il se présente sous la forme suivante. Une fente source de taille réglable éclairée par une source lumineuse (lampe QI, lampe spectrale, ...) éclaire deux fentes fines et proches (préciser la largeur et l'écart entre les deux fentes). On observa alors la figure d'interférences sur un écran, ici le dispositif Caliens.

1.1 Cohérence temporelle

Nous avons vu en introduction que chaque longueur d'onde se semblait pas donner la même figure d'interférences. C'est le phénomène de cohérence temporelle. Une source réelle n'est jamais monochromatique et deux ondes de fréquences différentes ne peuvent interférer de façon cohérente à l'échelle de temps de nos détecteurs. Chaque longueur d'onde crée donc son propre système d'interférences et ce qu'on observe est la somme de ces systèmes. Pour observer chaque système d'interférences des différentes longueurs d'ondes qui composent notre source de lumière blanche, on intercale dans le dispositif un filtre interférentiel. Pour chaque longueur d'onde on mesure l'inter-frange et on trace $i=f(\lambda)$. On compare nos résultats à la formule théorique

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

Cohérence temporelle



Matériel (je précise la nomenclature, c'est ceux qui marchaient le mieux)

- fente source : P115.1/1
- fente d'Young P116.1/1 (prendre celle du milieu $a = 300\mu m$, largeur $70\mu m$)
- Filtre P124.1/1

On trace $i=f(\lambda)$.

Incertitudes :

- inter-frange : on place ses curseurs entre α interférences. On mesure alors $I = \alpha i$ donc $u(i) = \frac{u(I)}{\alpha}$. Pour quantifier $u(I)$ on choisit un % de l'intensité convenable tel que l'extremum soit compris dedans ce qui nous donne un ΔX (je renvoie à l'exercice d'Aude sur les incertitudes avec la mesure du diamètre d'un cheveu avec un montage

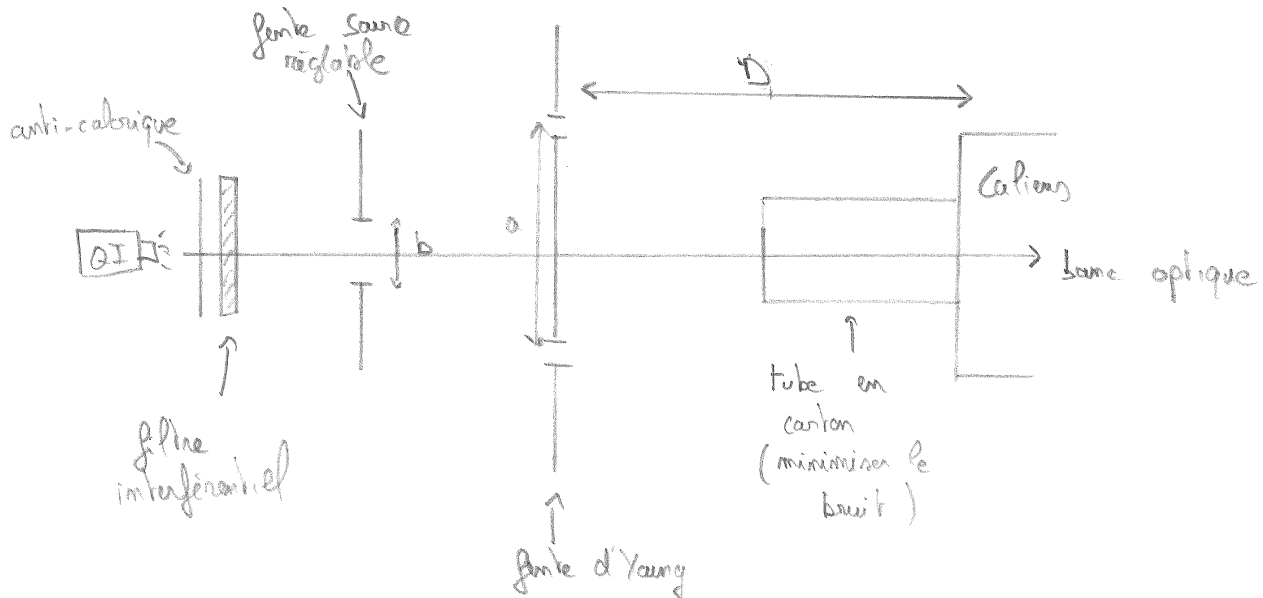


FIGURE 1 – Schéma du montage des fentes d'Young.

de diffraction). On peut aussi prendre en compte la sensibilité de Caliens mais la taille d'un pixel est de $10\mu\text{m}$ négligeable dans nos incertitudes.

- λ : les filtres ont en moyenne un écart de 10nm (à mesurer en TP)
- a : valeur de constructeur, on prend comme distribution une porte de largeur 10% de la valeurs donnée
- D : plus grande source d'incertitude car on ne sait pas où est la le récepteur dans Caliens, j'ai donc pris comme distribution une porte de largeur celle du boîtier de Caliens.

$$\text{D'où } \frac{u(\frac{D}{a})}{\frac{D}{a}} = \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(a)}{a}\right)^2}$$

On remarque que chaque longueur d'onde différente possède une inter-frange différente. Ainsi donc, les figures d'interférences se superposant, on aura à partir d'une certaine distance D , une frange claire d'une longueur d'onde λ_1 sur une frange sombre d'une longueur d'onde λ_2 et donc brouillage.

↓ L'utilisation d'une lampe avec une largeur spectrale conduit au brouillage des figures d'interférences. Néanmoins les lampes "blanches" possèdent une intensité plus forte. Une solution pour conserver cette intensité lumineuse serait d'utiliser une source monochromatique étendue. Nous allons étudier l'influence de la largeur spatiale de la source sur la figure d'interférences.

1.2 Cohérence spatiale

On se place à une longueur d'onde fixée et on fait bouger la fente source : on voit que la figure d'interférences se déplace. Ainsi comme chaque point source d'une source étendue ne sont pas cohérents entre eux, on va de nouveau observer la somme des figures d'interférences de chaque sous-source et donc, par un raisonnement similaire au précédent, obtenir un brouillage.

Cohérence Spatiale

⚡ Duffait p84

⊗

Matériel

- même matériel que précédemment, prendre le filtre qui laisse passer le plus d'intensité lumineuse (j'ai personnellement pris le vert, couleur de l'espoir)

On mesure le contraste entre deux franges successives $C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$ en fonction de l'ouverture de la fente source. Prendre quelques points pour une valeur de d . En préparation on aura tracer précisément la courbe $C = f(b)$ pour une autre valeur d_2 .

A noter la diminution du contraste, la première annulation du contraste, l'inversion de contraste et la deuxième annulation (on peut difficilement aller plus loin).

On retrouve une forme de sinus-cardinal, résultat prédit par la théorie pour une fente source rectangulaire de largeur b (théorème de Zernike ...). Il faut souligner que des mesures ont été prises avec d'autres valeurs de d et qu'on retrouve les mêmes valeurs tant que le rapport $\frac{b}{d}$ est le même. C'est bien le rapport $\frac{b}{d}$ qui importe : c'est l'angle sous lequel les fentes "voient" la source qui compte. Ainsi si l'objet est à l'infini, on n'a pas de problème de taille de la source mais on perd en intensité (exemple observation des étoiles ...).

Comparer la valeur de la première extinction avec la valeur attendue $\frac{b}{d} = \frac{\lambda}{a}$.

Incertitudes :

- b : valeur lue au vernier, incertitude porte sur une graduation et incertitude du aux données constructeur.

Ainsi donc, si on fixe les distances de notre montage (distance source/fentes d'Young ou fentes d'Young/écran), l'ouverture spatiale de la source entraîne un phénomène de brouillage et ce quelque soit l'endroit où on observe les interférences. Malheureusement une source ponctuelle est aussi un problème car l'intensité lumineuse sera faible et les figures d'interférences difficilement observables. Pour s'affranchir du problème de cohérence spatiale, on a mis au point les interféromètres à division d'amplitude. On va ici étudier l'interféromètre de Michelson et montrer en quoi les interféromètres à division d'amplitude permettent une meilleure visualisation des interférences.

2 Interféromètre à division d'amplitude : interféromètre de Michelson

Dans un dispositif à division d'amplitude, l'étendue spatiale de la source localise les figures d'interférences. Présenter le Michelson et pour meubler si nécessaire pendant vos réglages raconter son histoire.

2.1 Réglage en live du Michelson

Présenter l'interféromètre de Michelson (créé en 1881, expérience de Michelson Morley qui montre que la vitesse de la lumière ne dépend pas du référentiel où on la mesure et que l'éther n'existe pas), deux miroirs, compensatrice, séparatrice, blablabla ...

Remarque

Comme je l'ai dit dans l'intro, régler en live un Michelson est à mon avis indispensable si vous en utiliser un.

2.2 Cohérence spatiale et localisation

On montre où se situent les franges d'interférences sur le Michelson en coin d'air (à l'infini : écran dans le plan focal d'une lentille) puis lame d'air (sur les miroirs : on fait l'image d'un des miroirs avec une lentille). Montrer que c'est lumineux et contrasté. Au prix de la localisation des sources on peut utiliser une source aussi étendue spatialement que l'on veut pour étudier les interférences.

↓ On s'est affranchit de la cohérence spatiale, quand est-il de la cohérence temporelle pour l'interféromètre à division d'amplitude ?

2.3 Cohérence temporelle : longueur de cohérence temporelle du blanc pour l'œil

Pour un déphasage supérieur à la longueur de cohérence on n'observe plus d'interférences. Cette notion de longueur de cohérence est donc étroitement liée au détecteur utilisé (un capteur photosensible aura une longueur de cohérence plus grande que notre œil). La longueur de cohérence est reliée à la durée d'émission des trains d'ondes de l'onde : une source émet un train d'onde qui va être divisé en deux trains similaires par la lame semi réfléchissante. Ces deux trains d'onde ne peuvent interférer qu'avec leur "jumeau". Donc si la différence de marche est supérieure à la longueur d'un train d'onde, il ne pourra pas avoir d'interférences : le train d'onde le plus en avance sera entièrement passé avant que celui le plus en retard n'arrive.

On va chercher à mesurer la longueur de cohérence de la lumière blanche pour notre œil. Pour un déphasage plus grand que cette longueur de cohérence, à l'œil nu, on ne sera pas capable de voir des interférences en lumière blanche.

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

⚡ Sextant p169



Matériel

- Lampe QI + filtre anticalorique
- interféromètre de Michelson (je conseil le /2)
- lentille de focale 16cm
- filtre interférentiel

On travaille sur le Michelson en coin d'air avec une lampe QI, on projette avec une lentille. On chariote jusqu'à faire apparaître les franges. On observe une frange noire au centre puis des franges colorées qui s'en écartent et dont le contraste s'atténue jusqu'à disparaître : blanc d'ordre supérieur. On note sur l'écran l'endroit où les franges disparaissent. On place un filtre interférentiel et on mesure le nombre d'inter-frange N qu'il y a entre le centre et le point précédemment marqué.

Au point relevé, la différence de marche vaut $\delta = 2\alpha L_c$. Et L_c mesuré sur l'écran correspond sur le miroir à $g l_c$ avec g le grossissement de la lentille. En lumière monochromatique, $\delta = 2\alpha N i g$ en ce point et l'interfrange i vaut ici λ ($\cos(\frac{2\pi\delta}{\lambda}) = \cos(\frac{2\pi(i+\delta)}{\lambda})$). On obtient donc $2\alpha L_c = 2\alpha \lambda g$. D'où $l_c = N\lambda$.

ODG

- lumière blanche : $\Delta\nu = 10^{14} \text{ Hz}$ donc $l_c = 0.8 \mu\text{m}$
- laser He-Ne $\Delta\nu = 10^9$ donc $l_c = 20 \text{ cm}$
- Lampe spectrale $l_c = 1 \text{ mm}$

↓ On a donc vu dans quel cadre il fallait se placer pour observer des interférences avec un interféromètre à division d'amplitude. La largeur de la source entraînera la localisation des franges, elles ne seront visibles qu'à certains endroits précis, et la largeur spectrale de la source ainsi que la précision de notre détecteur limitera le déphasage maximal que nous pourrions observer avant qu'il n'y ait brouillage. En fonction du nombre de franges qu'on veut observer on choisira une source lumineuse plutôt qu'une autre.

3 Mesure à l'aide d'interférences

Remarque

C'est la partie "accordéon", à rallonger ou diminuer selon le temps qui reste.

Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre

🔧 Sextant p150 / Duffait p88

⌚ 5 minutes

Matériel

- Michelson en coin d'air
- lame de microscope

4 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 spatiale. L'utilisation d'une source polychromatique entraîne une limitation due à la précision de nos détecteurs.

Ainsi tout dispositif utilisant des interférences doit s'adapter à ces contraintes et doit également adapter la source aux conditions expérimentales. Néanmoins, comme les figures d'interférences dépendent de la source, on peut grâce à celles-ci remonter à sa composition spectrale.

Questions remarques