

MP 08 - Interférences lumineuses

Paul Grassein*, Mickaël Mateos

20 novembre 2013

Niveau de la leçon : L2

Matos : fentes d'Young, interféromètre de Michelson, Caliens, oscilloscope, fente source de largeur graduée et réglable, lampe spectrale à vapeur de mercure haute pression, lampe quartz-iode, filtres interférentiels, filtre anti-calorique, lentilles convergentes, prisme à vision directe, écran, diaphragme, verre dépoli, lame de microscope

Table des matières

1	Introduction	2
2	Fentes d'Young avec Caliens	3
2.1	Mesure de l'interfrange pour différentes longueurs d'onde	3
2.2	Estimation de la largeur de cohérence spatiale de la source	3
3	Interféromètre de Michelson	4
3.1	Cohérence spatiale : localisation des anneaux en lame d'air	4
3.2	Cohérence temporelle : largeur spectrale de la raie verte du mercure	4
3.3	Lame d'air en lumière polarisée	5
3.4	Cohérence spatiale : localisation des franges en coin d'air	5
3.5	Cohérence temporelle de la lumière blanche	5
4	Conclusion	6

Bibliographie

- **Expériences d'optique**, R. Duffait
- **Optique**, S. Houard
- **Optique expérimentale**, Sextant

Rapports de jury

2013 : 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 ou mal utilisés. 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 des longueurs d'onde entre les deux raies du doublet, mais ne donnent pas d'information sur la longueur de cohérence de la source lumineuse.

1994 : Trop de candidats ne maîtrisent pas les notions de localisation ou de non-localisation des interférences lumineuses. Quant à la définition correcte de la cohérence spatiale et de l'échelle ou de l'aire de cohérence, aucun candidat ayant pourtant choisi un sujet s'y rapportant n'a pu la donner. Certains connaissent pourtant la définition des fonctions de corrélation et le théorème de Wiener-Kintchine. Le jury attend des approches quantitatives sur la mesure de la cohérence temporelle et de la cohérence spatiale d'une vibration lumineuse.

1 Introduction

Expérience introductive : *Source : lumière blanche.*

Projeter la figure de diffraction à l'infini par une simple fente.

Remplacer la fente simple par une fente double, et remarquer l'apparition du phénomène d'interférences.

Le phénomène d'interférences est une manifestation incontestable du caractère ondulatoire de la lumière. Toutefois leur observation est loin d'être quotidienne, et délicate à obtenir en laboratoire par comparaison aux ondes sonores ou de surface dans un liquide.

Nature de l'émission : on utilise le modèle des trains d'onde émis aléatoirement par des sources distinctes, dites incohérentes.

Problème posé par la réception : on n'observe les signaux lumineux que moyennés à l'échelle du temps de réponse du détecteur (oeil, diode...). Comme la superposition des trains d'onde de deux sources distinctes est aléatoire, on n'observe pas d'interférence en moyenne.

Cela nous conduit à définir le cadre des interféromètres qu'on utilise au laboratoire : faire deux sources fictives cohérentes à partir d'une source primaire.

Dans ce montage, j'ai choisi d'illustrer trois problèmes pour l'observation d'interférences lumineuses, en lien avec l'émission et la réception de la lumière.

1. **Cohérence spatiale :** les différents points d'une source non ponctuelle produisent des interférences indépendamment les uns des autres, donc on observe la somme de leurs éclaircissements. Si les différentes figures d'interférences ne se recouvrent pas, on voit alors la figure totale se brouiller : les interférences ne sont plus visibles.
2. **Cohérence temporelle :** les interférences qu'on observe sur l'écran s'expliquent par le décalage temporel des ondes qui interfèrent en chaque point. Dans le modèle des trains d'ondes, pour deux sources fictives cohérents, si ce retard excède le temps d'émission des trains d'onde alors la superposition, alors la superposition des trains d'onde secondaires ne peut pas avoir lieu. Selon les caractéristiques d'émission de la source, il y a donc une différence de marche au-delà de laquelle il n'y a plus d'interférences.
3. **Polarisation de la lumière :** la lumière n'est pas une grandeur scalaire mais vectorielle, donc pour que la superposition d'ondes lumineuses conduise à des interférences destructives et constructives avec le maximum de contraste, elles doivent de polarisation identique.

2 Fentes d'Young avec Caliens

Les fentes d'Young sont un dispositif à division du front d'onde. Les sources secondaires sont les fentes qui diffractent chacune la lumière issue de la source primaire. On observe donc des franges d'interférences modulées par la figure de diffraction.

Sur le banc optique, aligner : une fente source de largeur réglable, les fentes d'Young à 10-20 cm, et enfin Caliens (relié à l'oscilloscope) à une distance de 60-70 cm de la bifente. Le tout est éclairé par une lampe quartz-iode munie d'un verre anti-calorifique et de filtres interférentiels. Attention à l'alignement. Avant toute mesure il faut vérifier que les franges sont bien contrastées sur Caliens en lumière filtrée. Pour cela il est nécessaire de fixer un tube en carton autour de son objectif, et de minimiser tant que possible le bruit qui vient de la lampe.

Notations :

- a : écartement des fentes d'Young
- b : largeur de la fente source
- d : distance fente source-bifente
- D : distance bifente-Caliens

2.1 Mesure de l'interfrange pour différentes longueurs d'onde

Le but de cette expérience est de vérifier la prévision de la figure d'interférences quand la cohérence temporelle est réalisée.

Expérience 1 : *mesurer avec l'oscilloscope l'interfrange i pour différents valeurs de λ associées aux filtres interférentiels.*

*En modélisant la série de points par la loi $i = \lambda * D/a$, vérifier la linéarité et en déduire une mesure de a connaissant D au mm près.*

Remarque : les filtres sont plus ou moins atténuateurs donc attention aux imprécisions et aux calibres pendant l'observation à l'oscilloscope.

Conclusion : la linéarité est bien vérifiée et on trouve une valeur de a proche de celle annoncée sur la diapositive.

2.2 Estimation de la largeur de cohérence spatiale de la source

Ici on veut mettre en évidence la cohérence spatiale par la perte de contraste due à l'utilisation d'une source étendue. On va franchir la première annulation du contraste à deux reprises, en jouant sur deux paramètres de la fente source : b et d .

Expérience 2 : *pour cette partie, mettre le filtre orange, qui laisse passer le maximum de lumière. Partir de $d \simeq 15$ cm et de $b \simeq 150$ μ m.*

Augmenter b jusqu'à obtenir la figure de diffraction à la place des interférences ($C=0$).

Calculer alors le rapport b/d , qui est l'angle fait par la fente source vue de la bifente.

*Vérifier qu'on a alors $a = l_S = \lambda * d/b$, soit la largeur de cohérence de la source.*

Faire augmenter b d'une centaine de μ m au-delà de cette valeur d'annulation, et noter sa valeur finale.

En gardant b constant, reculer alors la fente source sur le banc optique afin de retrouver l'annulation de contraste.

*Vérifier que pour la nouvelle valeur de d on retrouve le même angle b/d et qu'on a à nouveau : $a = \lambda * d/b$.*

Conclusion : étendre la source pour gagner en luminosité conduit au brouillage des franges par perte de cohérence spatiale. Ceci est généralisable à tous les dispositifs à division du front d'onde : on doit faire un compromis entre contraste et étendue spatiale de la source.

3 Interféromètre de Michelson

L'interféromètre de Michelson est un dispositif à division d'amplitude utilisant une lame semi-réfléchissante. Muni de deux bras orthogonaux de longueurs réglables, il a été conçu à la fin du 19^{ème} siècle dans le but de réaliser l'expérience de Michelson et Morley.

Les dispositifs à division d'amplitude peuvent produire des interférences très contrastées même avec des sources étendues. Il y a toutefois un prix à payer : les franges ne peuvent être observées qu'en un endroit précis du champ d'interférences, la surface de localisation. Sur cette surface, les figures d'interférences de tous les points sources sont identiques, ce qui garantit un contraste maximal.

3.1 Cohérence spatiale : localisation des anneaux en lame d'air

On commence par illustrer ce qui précède au sujet de la localisation des interférences. Le réglage du parallélisme des miroirs est l'occasion de parler des vis de réglage fin et grossier, et surtout d'étaler sa science sur les interférences au moment d'expliquer pourquoi on fait "oui-oui, non-non".

Expérience 3 : *le Michelson arrive réglé approximativement en lame d'air. En utilisant la lampe à vapeur de mercure et un dépoli, parfaire le réglage du parallélisme des miroirs à l'oeil.*

Une fois cela fait, fermer un diaphragme devant l'orifice de la lampe, enlever le dépoli et observer les anneaux sur l'écran à une distance quelconque. Commenter la forme et éventuellement la couleur. Les interférences sont visibles quelle que soit la distance de l'écran, elles sont délocalisées.

Rapprocher l'écran à une distance relativement courte, ouvrir progressivement le diaphragme. Remarquer le brouillage progressif des anneaux du au fait qu'on a élargi la source.

Eloigner l'écran franchement, constater l'amélioration du contraste. Extrapoler en mettant l'écran au foyer de la focale de 1m. Le contraste est parfait : les interférences sont donc localisées à l'infini.

Conclusion : on a montré la localisation des interférences pour le réglage en lame d'air. C'est très pratique car le Michelson permet ainsi d'obtenir beaucoup d'anneaux à la fois bien contrastés et avec beaucoup de luminosité!

3.2 Cohérence temporelle : largeur spectrale de la raie verte du mercure

Le principe de cette expérience est de mesurer un ordre de grandeur de la longueur de cohérence L_C (temporelle) de la raie verte du mercure, et d'en déduire une estimation de la largeur de cette raie par la formule $L_C \simeq \lambda^2 / \Delta\lambda$.

Puisque le seul geste ici est de chariotter, parler de la vis de translation, et expliquer le sens défilement des anneaux en raisonnant sur la variation de l'ordre d'interférence : d'une part qu'on fait varier l'épaisseur de la lame d'air, d'autre part d'un anneau à l'autre sur l'écran. La raie verte est à $\lambda = 546,2$ nm.

Expérience 4 : *mettre le filtre interférentiel vert devant la lampe spectrale (il correspond à la raie verte du mercure).*

Chariotter dans un sens jusqu'à ce que les anneaux commencent à se brouiller quand δ atteint L_C . Noter la position de la vis de translation.

Chariotter dans l'autre sens, franchir le contact optique et atteindre le brouillage opposé. Relever la position de la vis et en déduire L_C , puis $\Delta\lambda$. La valeur attendue est de quelques dizaines de nm.

Conclusion : on pourrait obtenir un profil spectral plus précis de la raie en calculant la transformée de Fourier d'un interférogramme réalisé à l'aide du moteur de la vis de translation et de Caliens. Cela prend un certain temps mais bien fait, mais ça peut permettre de discuter l'aspect basse ou haute pression de

la lampe, selon que le profil de la raie est respectivement gaussien ou lorentzien. En attendant, on peut raisonnablement considérer cette raie comme quasi-monochromatique.

3.3 lame d'air en lumière polarisée

On va montrer sur le Michelson que des ondes polarisées orthogonalement n'interfèrent pas.

Expérience 5 : *chariotter vers une zone où on a beaucoup d'anneaux bien contrastés. Rester avec le filtre vert devant la lampe à mercure.*

A l'aide de potences, placer un polariseur sur chaque voie de l'interféromètre.

Si les directions sont identiques, le contraste reste maximal. Si elles sont orthogonales, les interférences sont brouillées.

Conclusion : on a montré une limite du modèle scalaire de la lumière pour les interférences. Deux ondes polarisées orthogonalement n'interfèrent pas.

3.4 Cohérence spatiale : localisation des franges en coin d'air

On va passer en coin d'air. Cela implique de passer en lumière blanche et de discuter la cohérence temporelle encore plus restreinte de la lampe quartz-iode.

Expérience 6 : *Virer le filtre interférentiel. Se mettre au contact optique avec le maximum de précision permis par la lampe spectrale : pour cela se donner une zone d'incertitude avec le vernier de la vis de translation. Au besoin, régler le parallélisme compensatrice/séparatrice selon l'ellipticité des anneaux.*

Passer en lumière blanche, on doit tomber sur les teintes de Newton. Si besoin, chariotter légèrement le long de l'intervalle d'incertitude.

Se rapprocher de la teinte plate. Au besoin, parfaire le parallélisme des miroirs.

Au contact optique, passer en coin d'air avec source ponctuelle : diaphragme fermé devant la QI, avec condenseur réglé de sorte à avoir un faisceau parallèle, écran sans lentille de projection. Observer les franges délocalisées du coin d'air.

Ouvrir le diaphragme, constater le brouillage des franges.

Enfin, avec une lentille de 16 ou 20 cm, faire l'image des miroirs sur l'écran. Le plan de localisation des franges d'interférence se situe donc près des miroirs.

Conclusion : en coin d'air aussi, on peut utiliser une source étendue et garder un bon contraste, à condition d'observer les franges localisées près des miroirs.

3.5 Cohérence temporelle de la lumière blanche

Je propose, au choix, deux expériences différentes pour mesurer ou exploiter la très faible longueur de cohérence de la lumière blanche.

La vis du Michelson n'est pas assez précise ($10\text{ }\mu\text{m}$) pour déterminer L_C . Un moyen de le faire en coin d'air est de reprendre la lampe au mercure et de se servir de ses franges comme d'une règle de pas λ .

Ensuite, grâce à cette très faible longueur de cohérence, on peut mesurer des longueurs ou des indices avec une précision de $10\text{ }\mu\text{m}$ (vernier de la vis de translation). Le cas classique : épaisseur optique $\tau = n \times e$ d'une lame de microscope.

Expérience 7a : *prendre un angle de coin d'air assez faible de façon à étaler les franges de lumière blanche sur la plus grande longueur possible. Sur une feuille, marquer l'empreinte sur l'écran de l'ensemble des franges, d'un brouillage à l'autre.*

Passer à la lampe à mercure avec filtre interférentiel, en éclairage parallèle. Sur l'écran, compter le

*nombre d'interfranges contenu dans l'empreinte de la figure en lumière blanche.
La longueur de cohérence temporelle de la QI est alors égal à ce nombre multiplié par λ_{filtre} .*

Conclusion : la très faible cohérence temporelle de la lumière blanche explique les difficultés qu'on rencontre pour observer des interférences avec cette source, et aussi la relative rareté de ces phénomènes dans la nature (principalement sur les films de savon ou d'huile). En contrepartie, la faible longueur de cohérence temporelle est un avantage pour mesurer des longueurs avec le Michelson, car c'est le critère le plus sélectif qu'on ait pour repérer le contact optique.

Une autre manip' un peu serrée : projeter, via le prisme à vision directe, un spectre cannelé d'une portion du coin d'air, sélectionnée par une fente, en commentant les extinctions de longueur d'onde selon la couleur de la zone du coin d'air observée. A ce sujet, on doit pouvoir avoir la même discussion que celle menée dans le Houard dans la partie consacrée aux interférences, dans le chapitre où il traite les teintes de Newton.

4 Conclusion

On a vu un interféromètre à division du front d'onde, les fentes d'Young, et un autre à division d'amplitude, le Michelson.

Pour les fentes, la cohérence spatiale imposait de devoir faire un compromis entre contraste et luminosité (obtenue par élargissement de la source). Ce problème est surmonté dans les dispositifs à division d'amplitude, au prix de la localisation des interférences. Ainsi avec le Michelson on a formé des interférences très lumineuses et contrastées.

Avec le Michelson, on a utilisé des sources de cohérence temporelle de plus en plus faible (laser, lampe spectrale, lumière blanche). On a pu voir qu'à chaque fois, la plage de différence de marche permettant d'observer les interférences était réduite en même temps que la largeur spectrale de la source augmentait. C'est pour cela qu'obtenir les interférences en lumière blanche est difficile.

Cela dit, le fait d'avoir pris des sources de faible cohérence temporelle a nécessité et permis un réglage à chaque fois plus fin de l'interféromètre. Les interférences en lumière blanche sont quant à elles tellement sélectives qu'elles peuvent servir à repérer précisément le contact optique, et donc mesurer l'épaisseur de matériaux transparents.