

MP 08 – Interférences lumineuses

Correcteur : Arnaud Le Diffon

Rapports de jury

2017 : 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.

2015-2016 : 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 : Certains candidats ne font pas le rapport entre leurs connaissances théoriques sur les cohérences spatiale et temporelle, et leurs observations expérimentales. Il en résulte alors 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. Enfin, il n'est pas raisonnable d'envisager d'apprendre à régler un interféromètre de Michelson devant le jury.

Biblio : [1] Taillet, « Dictionnaire de physique »
[2] Sextant « Optique expérimentale »
[3] ALD, « Physique expérimentale »
[4] Duffait, « Expériences d'optique »
[5] Garing, « Mille et une questions de prépa, PC »

Introduction :

Définition des interférences : [1] p 291

Phénomène par lequel la superposition de plusieurs ondes produit localement une intensité qui diffère de la somme des intensités individuelles. Témoigne de la nature ondulatoire de la lumière.

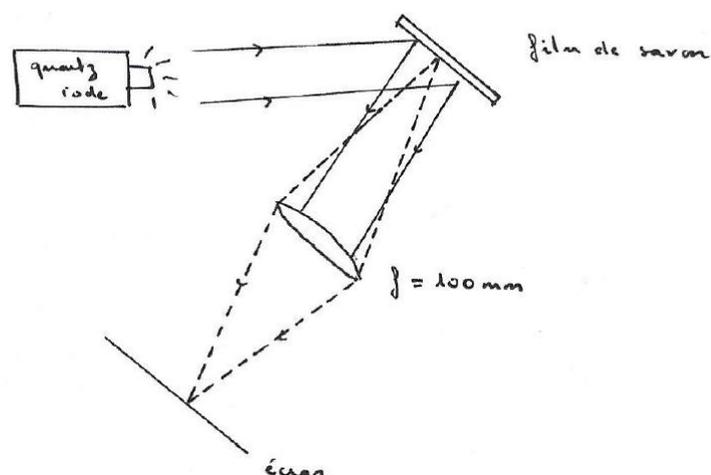
Dans la vie quotidienne, il est possible de voir des interférences. Par exemple, les **irisations d'une bulle de savon**.

Manip introductive : Mise en évidence des interférences produites par une lame de savon en lumière blanche.

[2] p 155-161

Montage :

Interférences en lumière blanche d'une lame de savon



- ✓ Molécules de savon forment des édifices stables car molécules amphiphiles -> arrangement en bicouches
- ✓ La durée de vie du film est limitée par le drainage de la pellicule d'eau sous l'action de la gravité.

- ✓ La solution contient un mélange eau/savon/glycérine dont les proportions sont optimisées de manière à obtenir des couches stables (assez de savon pour avoir une lame irisée, assez de glycérine pour ne pas qu'elle claque !)
- ✓ Lorsque l'épaisseur du film devient comparable aux longueurs d'onde visibles, on constate l'apparition de franges (d'égale épaisseur), δ de l'ordre du μm $\delta \approx \lambda_{\text{visible}}$.
- ✓ Eclairage en lumière blanche, franges localisées sur lame dont on regarde l'image sur un écran au travers d'une lentille ($f = 100\text{mm}$). Grande image si petite focale.
- ✓ Montage en réflexion et pas en transmission pour maximiser le contraste
- ✓ Il faut attendre qu'il n'y ait plus de turbulences pour obtenir des franges stables !

Expression de la différence de marche :

$$\delta = \lambda/2 + 2n\cos i, n=\text{indice de la lame et } i \text{ angle de réfraction à l'intérieur du film}$$

Résultat :

Lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche de savon, on observe :

- Ordre zéro : **frange noire** car l'épaisseur du film de savon est trop faible $\delta < \lambda_{\text{visible}}$.
- Extinction de certaines longueurs d'onde : apparition de différentes couleurs : **teintes de Newton**
- Malgré l'extinction de nombreuses longueurs d'onde, il reste suffisamment de composantes de chacune des trois couleurs fondamentales (bleu, jaune, rouge) pour que l'impression visuelle soit identique au blanc : **blanc d'ordre supérieur**.

Attention, la lentille inverse l'image, on verra le blanc d'ordre supérieur en haut et pas en bas !

Commentaire ALD : bonne manip mais difficile à régler, voir s'il y en a des plus sûres !

Objectif du montage : Explorer les deux grands intérêts des interférences :

- Sonder les propriétés de cohérence d'une source lumineuse
- Mesure précise de longueurs (spectroscopie)

Il existe deux grands types d'interféromètres : division d'amplitude et de front d'onde permettant tout deux d'obtenir un terme d'interférences non nul. Nous utiliserons les deux (fentes d'Young + Michelson).

I. Fentes d'Young

1. Figure d'interférences, [5] p305

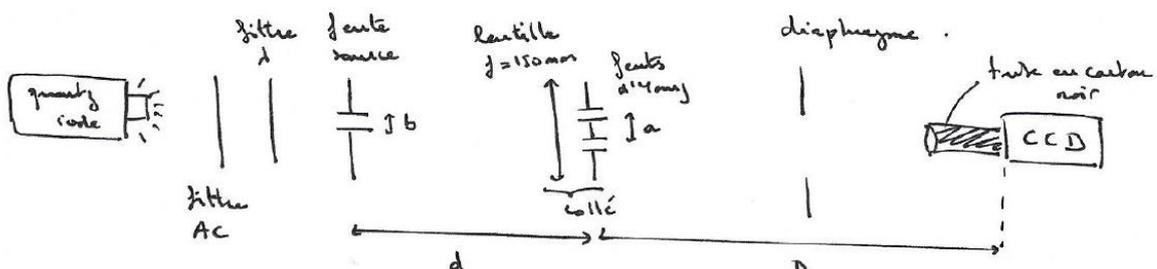
En lumière blanche, une fente donne figure de diffraction.

Deux sources secondaires (fentes d'Young, largeur $70\mu\text{m}$, espacées de $a = 230\mu\text{m}$) donnent une succession de franges noires et brillantes visibles à l'œil. L'addition de deux ondes lumineuses peut bien donner de l'obscurité !

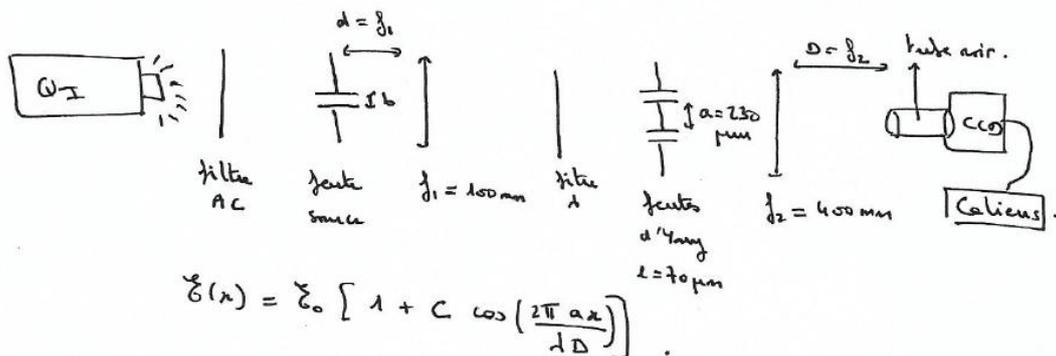
On constate que la figure d'interférences est visible partout entre les fentes d'Young et l'écran : la figure d'interférences est **délocalisée** !

On peut faire deux montages pour être dans les conditions de Fraunhofer et pouvoir utiliser les formules classiques des interférences.

Montage 1 : fentes d'Young collées à la lentille de projection



Montage 2 : fentes d'Young éclairées en incidence normale



L'éclairement est constitué d'une sinusoïde (période spatiale : $i = \lambda D/a$) modulée par un facteur de contraste C . C'est pour cela que la figure d'interférences possède une extension spatiale finie (il y a brouillage !).

Transition : De quoi dépend ce facteur de contraste ?

Détails sur le montage :

- La caméra CCD est très sensible et sature très vite : il faut placer un tube en carton noir en entrée, limiter la lumière parasite de la lampe quartz-iode avec un diaphragme voire ajouter des filtres adaptés à l'entrée de la CCD.
- Attention certaines caméras ont des faux contacts, ne pas hésiter à en changer.
- Il y a des problèmes d'installation des pilotes de la caméra sur certains ordis, ne pas hésiter à en changer.
- Il faut bien allumer l'ordinateur puis allumer la CCD et lancer le logiciel Caliens en dernier (caméra capricieuse !)
- Au départ on avait fait le montage sur un banc optique mais finalement cela s'est avéré moins souple en terme de hauteur de pied et de réglages. C'est pour cela qu'on a préféré mettre les optiques sur des pieds sans le banc.

2. Influence de la longueur d'onde - cohérence temporelle

- On place un filtre interférentiel avant les fentes d'Young et on mesure l'interfrange sur le logiciel Caliens. On mesure l'étendue spatiale des différents pics et on divise par le nombre de pics. On considère qu'on a une incertitude d'environ $50\mu\text{m}$ divisée par le nombre de pics.
- On réitère l'opération pour différents filtres donc différents λ . L'interfrange change ! Chaque longueur d'onde crée son propre système d'interférences, qui occasionne un brouillage en lumière blanche. Lorsqu'on utilise une source avec une certaine largeur spectrale $\Delta\nu$, on a ainsi un brouillage. Il s'agit de problèmes de cohérence temporelle.
- Vérification de la formule de l'interfrange : $i = \lambda D/a$. On trace $i = f(\lambda)$ et on compare la valeur de la pente D/a avec une valeur attendue (a donnée constructeur sans incertitudes, D mesurée sur le banc avec un réglet, incertitude de 5mm).
- On trouve $D/a = 1280 \pm 60$ au lieu de 1565.

Remarques :

- On a préparé le montage 2 en espérant avoir un D/a plus proche de la valeur attendue. Dans les compte-rendus, ils ont fait le montage 1, avaient aussi un gros écart et disaient qu'ils obtiendraient mieux avec le montage 2, on sait maintenant que ce n'est pas le cas !
- Les filtres interférentiels ont un sens !

Commentaires ALD :

- Le point ajouté avec une autre couleur n'est pas inclus dans le fit, il vaut mieux l'ajouter dans la wave faite en préparation, quitte à ce qu'il ait la même couleur

- Le résultat est assez loin de celui attendu, mesurer les focales des lentilles par autocollimation pour évacuer les sources d'erreur
- Bien expliquer qu'avec les fentes d'Young, on a une périodicité spatiale qui dépend de λ , introduction à la cohérence temporelle !
- Si les pics sont peu visibles (pour les faibles λ), il vaut mieux ne pas les utiliser, la précision sera meilleure même si on en considère moins !

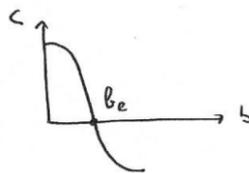
Transition : Autre facteur qui joue sur le contraste : la largeur de la fente source !

3. Influence de la largeur de la fente – cohérence spatiale

Le contraste pour une source monochromatique λ présente l'allure suivante :

$$\text{source étendue} : C = \text{sinc} \left(\frac{\pi ab}{\lambda d} \right)$$

On constate que C dépend directement de la largeur de la fente source b . Lorsqu'on ferme la fente, la figure d'interférences disparaît. Les pics apparaissent progressivement lorsqu'on augmente b , puis ils disparaissent pour une largeur limite b_1 et réapparaissent inversés (les minimums deviennent des maximums). On a en effet un sinc donc le contraste peut devenir négatif.



On peut obtenir la distance entre les fentes d'Young (a) grâce à b_1 . En effet, pour un contraste nul, $a = \lambda d / b_1$.

On mesure $b_1 = 0.19 \pm 0.01$ mm. On utilise un filtre interférentiel donc on connaît λ et on mesure la distance d sur le banc. On trouve $a = 260 \pm 30$ μm au lieu de 230 μm .

Remarque : pour mesurer b_1 , il est nécessaire d'utiliser une fente source de largeur réglable + vernier avec écran.

Commentaires ALD : bien insister qu'il y a deux facteurs qui jouent sur la cohérence spatiale : la largeur de la source + l'angle sous lequel elle est vue (facteur a/d)

Transition : fentes d'Young perte de contraste si source étendue donc figure d'interférences délocalisée mais peu lumineuse ce qui limite les mesures précises. Nécessité d'utiliser un autre interféromètre : le Michelson !

II. Interféromètre de Michelson

1. Configuration lame d'air

a. Présentation du Michelson

On éclaire avec une lampe spectrale étendue un système composé de deux miroir + séparatrice/compensatrice. Lame d'air : on déplace un miroir perpendiculairement par rapport à l'autre -> introduction d'une différence de marche. On obtient des **franges d'égale inclinaison** (anneaux) localisés à l'infini. On les projette donc sur un écran grâce à une lentille de grande focale ($f=1000\text{mm}$).

Transition : si la figure d'interférences est localisée, elle est très lumineuse ce qui nous permettra d'effectuer des mesures spectroscopiques précises.

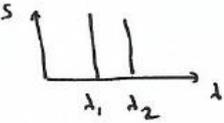
b. Mesure du doublet du sodium, [3] p 218

La lampe de sodium possède deux longueurs d'onde très proches λ_1 et λ_2 que l'on cherche à résoudre. On cherche donc $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ en connaissant la moyenne de ces longueurs d'onde $\lambda_0 = 589.3 \text{ nm}$. En configuration lame d'air, on introduit une différence de marche δ en créant une lame d'air en déplaçant un des miroirs.

Remarque : bien mettre un condenseur + diaphragme en entrée.

Pour mesurer $\Delta\lambda$, on va tirer parti du fait que la figure d'interférences est modulée par un terme de contraste qui s'annule pour certaines différences de marche δ (anticoïncidence). On peut relier ces différences de marche à la position du miroir x_p . En traçant la position du miroir donnant un contraste nul en fonction du numéro de la coïncidence, on peut obtenir $\Delta\lambda$.

$e = \text{épaisseur de la lame d'air}$


$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} = 589,3 \text{ nm} \quad \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$$
$$\xi(e) = 2 \xi_0 \left[1 + \underbrace{\cos\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} 2\pi e\right)}_C \cos\left(4\pi \frac{e}{\lambda_0}\right) \right]$$

$C = 0 \rightarrow \text{position du vernier} : x_p = \frac{\lambda_0^2}{2\Delta\lambda} p + de, \quad p \in \mathbb{N}.$

On trouve une valeur très proche de celle attendue, l'expérience marche très bien !

Transition : On souhaite déterminer l'épaisseur d'une lame de verre en l'ajoutant sur le trajet des rayons lumineux dans le Michelson.

Nécessité d'avoir la figure d'interférences localisée au niveau des miroirs : on passe en configuration coin d'air.

Nécessité d'avoir un brouillage et pas des franges pour toute différence de marche : on passe en lumière blanche !

Remarque : juste avant de passer en lumière blanche, il faut vérifier que l'on obtient bien des anneaux parfaits (ne bougent pas lorsqu'on bouge la tête de haut en bas et de gauche à droite).

2. Configuration coin d'air en lumière blanche

a. Changement de configuration

- On se place au contact optique (le noter) avec la lampe au sodium en faisant rentrer les anneaux.
- Passer en lumière blanche : en charriotant on voit défiler les teintes de Newton.

Remarque : il faut enlever tout condenseur (même celui de la lampe quartz-iode) et mettre un filtre anticalorique.

- Incliner un des miroirs une fois qu'on est au contact optique, apparition de franges
- Interfrange dépend de la longueur d'onde donc on a donc en chariotant une frange centrale noire puis des franges colorées et enfin un blanc d'ordre supérieur correspondant au brouillage des différents λ .
- Ces franges sont localisées au niveau des miroirs, il faut les projeter. On utilise une lentille de projection de focale plus faible ($f=200\text{mm}$) et on règle la netteté en plaçant la pointe d'un papier calque sur un des miroirs.

b. Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre, [4] p 89

On ajoute une lame de verre on perd les franges. On mesure la distance dont on doit charioter le miroir pour les retrouver. $\delta = 2 \cdot (n-1)e$ ici $n=1.5$ (verre) donc $\delta=e$

Attention, on lit sur le Vernier la moitié de la différence de chemin optique (piège)

On lit $(80 \pm 5) \mu\text{m}$, ce qui correspond à une épaisseur de lame de $e=160 \pm 5 \mu\text{m}$.

Commentaires ALD :

- Il vaut mieux mesurer l'indice de la lame si on arrive à trouver une valeur tabulée
- Si on mesure l'épaisseur de la lame, il faut être conscient que c'est anecdotique car on est limité par la précision du vernier donc on ne fait pas mieux qu'avec un pied à coulisse

Conclusion : On a mis en évidence les problèmes liés à la cohérence

Interférences permet des mesures de grande précision : ondes gravitationnelles.

Aparté sur les ondes gravitationnelles :

Une onde gravitationnelle, appelée parfois onde de gravitation, est une oscillation de la courbure de l'espace-temps qui se propage à grande distance de son point de formation.

Albert Einstein a prédit l'existence des ondes gravitationnelles en 1916 : selon sa théorie de la relativité générale qu'il venait de publier, de même que les ondes électromagnétiques (lumière, ondes radio, rayons X, etc.) sont produites par les particules chargées accélérées, les ondes gravitationnelles seraient produites par des masses accélérées et se propageraient à la vitesse de la lumière dans le vide. Cependant, la réalité des ondes gravitationnelles a été longuement débattue. Depuis 2016, l'existence des ondes gravitationnelles est confirmée, grâce à une première observation faite le 14 septembre 2015.

Commentaire Matthieu :

On peut faire des interférences en polarisation au lieu de la mesure de l'épaisseur de la lame

Questions :

- Michelson : intérêt de la compensatrice ? savoir faire le dessin explicatif
- La position de la CCD doit-elle être à la focale de la deuxième lentille ? oui, meilleur contraste
- Pourquoi utiliser les doublets ? pour ne pas avoir d'aberrations
- Pourquoi ne pas faire avec un moteur ? Pb : moteur à vitesse pas constante, il faudrait étalonner le moteur.
+ le miroir peut prendre un angle d'inclinaison