LP n° 33 : Interférences à deux ondes en optique.

NIVEAU : CPGE

PRÉREQUIS :

- Ondes électromagnétiques
- Modèle scalaire de la lumière, chemin optique, modèle des trains d'onde
- Optique géométrique

PLAN :

1. Superposition de deux ondes lumineuses
2. Réalisations expérimentales
3. Effet d'un défaut de cohérence sur la figure d'interférence

BIBLIOGRAPHIE :

- [11] *Optique physique et ondulatoire*, Bertin-Faroux-Renault
- [51] *Optique physique et électronique*, D. Mauras
- [71] *Physique PC/PC**, Dunod (2014)
- [74] *Optique physique*, R. Taillet (2e édition)

IDÉES À FAIRE PASSER :

En optique, les interférences sont la preuve irréfutable du caractère ondulatoire de la lumière. Elles sont extrêmement difficiles à observer (il y a des conditions extrêmement sévères) et se dégrade rapidement lorsque les conditions ne sont plus favorables.

Introduction : Le phénomène d'interférence existe dans pleins de domaines de la physique (son, vagues, ...), lorsqu'on a des ondes, on l'observe facilement. La lumière est une onde, cependant en optique, il est difficile d'observer des interférences, il y a des conditions à vérifier. [51], p. 63 intro historique.

1 Superposition de deux ondes lumineuses

1.1 Conditions d'interférences, sources cohérentes

[71], p. 713 - Le terme d'interférence recouvre toutes les situations où est réalisée la superposition de deux ou plusieurs ondes électromagnétiques. On dit qu'il y a interférence lorsque l'intensité résultant de la superposition de plusieurs ondes EB diffère de la superposition des intensités. On envisage le cas d'une superposition de 2 ondes parfaitement monochromatiques, issues de deux sources ponctuelles S_1 et S_2. **slide** schéma. Pour moi on se place directement dans le modèle scalaire et on écrit les vibrations lumineuses dans le cas général $s_i(M,T) = a_i(M)\cos(2\pi/\lambda_i \mathscr{L}_{S_iM} - \omega_i t + \varphi_i^\circ$. Écrire l'éclairement au point M (linéarité des équations de maxwell : on somme E_1 et E_2 en fait). Passer à l'intensité en prenant la moyenne du carré. On aboutit à

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\langle\cos(\delta\varphi(M,t))\rangle_{\tau_d}$$

Remarque : La moyenne est une moyenne temporelle. Elle se fait sur un temps caractéristique τ qui dépend du détecteur utilisé !

Tout dépend du terme dans la moyenne :

- Si les sources sont non synchrones ($\omega_1 \neq \omega_2$) le cosinus varie à une fréquence trop rapide devant $1/\tau_d$ et sa moyenne est nulle.
- Si les deux sources sont synchrones mais distinctes le terme $\varphi_2^\circ - \varphi_1^\circ$ varie tous les τ_c donc bien plus rapidement que e temps du détecteur et le résultat est le même.
- On a le même phénomène si $\delta(M) > l_c$.

Dans le cas où toutes ces conditions sont vérifiées on a la formule de Fresnel (cf. [71], p. 717)

$$I(M) = I_1(M) + I_2(M) + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\delta\varphi(M)) \quad \text{et} \quad \delta\varphi(M) = \frac{2\pi}{\lambda}\delta(M) + \varphi_2^\circ - \varphi_1^\circ$$

Selon le signe de $\cos(\delta\varphi(M))$, l'éclairement résultant est supérieur ou inférieur à la somme des éclairements des ondes ; c'est le principe des interférences. Il y a donc deux cas : interférences constructives ou destructives.

Remarque : On peut retrouver rapidement cette formule en complexes à condition que les sources soient effectivement cohérente.

1.2 Description de la figure d'interférence

Expliquer que la figure d'interférence dans l'espace est un faisceau d'hyperboloïdes de révolution ([51], p. 67) et montrer le schéma sur **slide**. Expliquer qu'en mettant l'écran à un endroit ou à un autre on verra des anneaux ou des franges rectilignes.

Définir les grandeurs permettant de qualifier cette figure d'interférence : frange, interfrange, franges centrales et achromatique, contraste, ordre d'interférence ; [71] p. 719-720. Dans ce cas simple (sans considération sur le moyen d'arriver à de telles sources), les franges sont dites non localisées car on peut les observer dans toute la zone de l'espace où les deux ondes issues de S_1 et S_2 se superposent.

Transition : On vient de réaliser l'étude théorique et on a vu qu'il y avait des conditions très restrictives à l'obtention des interférences en optique. Ces conditions strictes posent immédiatement la question de la réalisation expérimentale. On veut des sources cohérentes : la façon la plus simple de le faire est de dédoubler une source primaire (utiliser un miroir ou créer des sources secondaires).

---

2 Réalisation expérimentale

2.1 Obtention de franges rectilignes

[71], p. 733 intro historique sur l'expérience. Présenter l'interféromètre des trous d'Young comme un dispositif à division du front d'onde. Calculer la différence de marche entre les rayons dans cette situation et exprimer l'interfrange comme dans [51], p. 69. NB : dans le Mauras il font le calcul en vectoriel. C'est pratique mais peut être qu'on voit mieux la physique en faisant vraiment des calculs de distance et des différence. Dans tous les cas il faut JUSTIFIER TOUS LES DL PAR DES ORDRES DE GRANDEUR SUR LA MANIP !

> Expérience : On utilise des trous (fentes ?) d'Young d'écartement connu avec précision éclairés par une fente source de largeur variable. La mesure de l'interfrange peut être faite, au choix, avec plusieurs bi-fentes pour vérifier l'influence de l'écartement, ou avec plusieurs filtres interférentiels pour vérifier la dépendance avec la longueur d'onde. cf. Polycopié de TP Montrouge *Interférences*.

On peut éventuellement avoir fait aussi le calcul de l'éclairement

2.2 Obtention des anneaux

Présenter l'interféromètre de Michelson comme un dispositif à division d'amplitude. Expliquer rapidement comment ce dispositif permet d'obtenir deux sources alignées. On ne fait pas de calcul (on étudiera cet interféromètre en détail plus tard, par exemple dans la leçon sur l'interférométrie à division d'amplitude) mais lier l'écartement entre les deux sources à la distance entre les miroirs que l'on peut faire varier en charriotant.

> Expérience : On dispose d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air de sorte qu'on observe à l'écran les anneaux de la raie verte du Mercure.

Transition : si on écarte trop la source ou que l'on va trop loin, on perd en contraste, pourquoi ? Notion de cohérence.

---

3 Effet d'un défaut de cohérence sur la figure d'interférence

3.1 Effet d'une perte de cohérence spatiale

[71], p. 744 - Visibilité des franges produites par deux sources ponctuelles. Revenir sur la formule du début pour montrer quel terme engendre la perte de cohérence. Diminution uniforme lorsque les sources s'éloignent. **slide** On somme les éclairements des deux sources incohérentes, on trouve la visibilité. $V = 0$ quand $|\Delta p| = 1/2$. Critère semi quantitatif de brouillage. Condition de visibilité des franges $a < l_s$.

> Expérience : On peut écarter progressivement la fente source sur le dispositif des fentes d'Young pour voir le contraste s'annuler puis s'inverser. L'inversion est difficile à voir nettement, peut être qu'une caméra CCD pourra aider mais ça me semble difficile à mettre en place en leçon (jongler avec l'écran etc...). On peut la garder sous le coude et la mentionner pendant l'oral.

Problème de la perte de cohérence spatiale : ça limite violemment l'intensité qu'on peut envoyer sur l'écran. D'où l'intérêt des dispositifs à division d'amplitude qui permettent de s'affranchir de ce problème de cohérence.

3.2 Effet d'une perte de cohérence temporelle

[71], p. 752 - On a vu que des ondes de pulsations différentes ne peuvent pas interférer, que se passe-t-il si on prend un doublet de longueurs d'onde ? On somme les éclairements : **slide**. Remonter à un critère sur la différence de marche et la longueur de cohérence de la source : expliquer la longueur de cohérence temporelle avec le modèle des trains d'ondes ([71] p. 698) (Le critère semi-quantitatif est aussi utilisé pour la cohérence temporelle, il sort du chapeau, mais le programme l'indique)

Expérience : Charrioter les miroir pour écarter les sources et voir peu à peu la perte de contraste.

Remarque : je vois trois méthodes pour traiter la cohérence temporelle à choisir en fonction du temps disponible :

- De manière graphique en superposant les figures d'interférence associé à chaque longueur d'onde pour montrer qu'au bout d'un moment ça fout le bazar
- De la même manière que le traitement de la cohérence spatiale, avec des Δp.
- En faisant le calcul, comme dans [51], p. 120.

Il faut enfin faire remarque que certes on n'a plus de problème de cohérence spatial, en revanche les franges sont localisées !

Conclusion : Les interférences à deux ondes sont utiles, elles nous ont permis de discuter des notions de cohérence temporelle et spatiale. Le dispositif étudié ici de division de front d'onde, permet de remonter à la longueur de cohérence spatiale de la source. On aurait pu discuter d'un autre dispositif : division d'amplitude avec le Michelson par exemple, qui permet de s'affranchir de la cohérence spatiale, au prix d'une localisation des interférences.

BONUS :

- On aurait envie de faire l'interféromètre de Michelson dans les dispositifs mais le jury insiste sur l'importance de la cohérence dans cette leçon.
- Réfléchir au moyennage du détecteur [74], p. 54.
- Temps de réponse des détecteurs usuels : thermopile $> 0,1\ s$, photodiode 1µs, œil $1/20$ s.
- Voir absolument le lien rigoureux entre champs électrique, intensité et éclairement dans [51], p. 36.