

Leçons de physique

Agrégation 2019-2020

Table des matières

1	LP17 Interférences à deux ondes en optique	2
1.1	Introduction	2
1.2	Superposition de deux ondes	2
1.2.1	Éclairement	2
1.2.2	Conditions d'interférence	3
1.3	Une dispositif à division du front d'onde : les fentes d'Young	3
1.3.1	Dispositif expérimental	3
1.3.2	Calcul de la différence de marche	3
1.3.3	Figure d'interférence	4
1.4	Cohérence de la source	4
1.4.1	Évolution du contraste	4
1.4.2	Source étendue	4
1.4.3	Cohérence temporelle	5
1.5	Conclusion	5

1 LP17 Interférences à deux ondes en optique

Bibliographie :

- [FR99]
- [Pér17]
- [BFR86b]

Niveau : CPGE

Pré-requis :

- Ondes électromagnétiques dans le vide

1.1 Introduction

Le phénomène d'interférence est fondamentalement associé aux ondes. Elles sont facilement observées dans d'autres domaines de la physique (ex : acoustique pour différencier deux notes proches, accordage d'une guitare).

EXP : battement entre deux diapasons légèrement désaccordés.

Pourtant, on observe rarement des interférence en optique. Il suffit de regarder la façon dont éclairée la salle pour s'en convaincre (plusieurs panneau lumineux sans battement).

Objectifs de la leçon :

- Comprendre pourquoi il est difficile d'observer des interférence en optique.
- Quelles sont les applications ?

1.2 Superposition de deux ondes

1.2.1 Éclairement

Depuis Maxwell et les expériences de Wiener, on sait que la vibration lumineuse est associée à la composante \vec{E} du champ électromagnétique :

$$\vec{E}(M, t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega t + \varphi(M, t))} \quad (1)$$

On s'intéresse à l'éclairement $I(M, t)$ défini par

$$I(M, t) = \left\langle \vec{\Pi}(M, t) \right\rangle_t = \frac{\epsilon_0 c}{2} E_0^2. \quad (2)$$

Pour la suite on oublie le terme $\epsilon_0 c$ et on définit l'éclairement

$$I(M, t) = \left\langle \vec{E}(M, t) \cdot \vec{E}^*(M, t) \right\rangle_t \quad (3)$$

Les equations de Maxwell sont linéaires, on peut sommer les champs $\vec{E}_1(M, t)$ et $\vec{E}_2(M, t)$ et calculer l'éclairement total

$$I(M, t) = \left\langle (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)(\vec{E}_1^* + \vec{E}_2^*) \right\rangle_t = I_1 + I_2 + 2\Re \left\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* \right\rangle_t \quad (4)$$

L'éclairement total peut être différent de la simple somme des éclairement dûs à chacune des sources.

1.2.2 Conditions d'interférence

On développe le terme d'interférence :

$$2\Re \left\langle \vec{E}_1 \vec{E}_2^* \right\rangle_t = \left\langle \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos [\Delta\omega t + \Delta\varphi_0(t) + \Delta\varphi_k(M)] \right\rangle_t. \quad (5)$$

Ce terme est non nul si :

- les polarisations des deux ondes ne sont pas orthogonales. Pour la suite, on suppose que les deux ondes ont la même polarisation.
- $\Delta\omega = 0$. Si $\Delta\omega \neq 0$, on s'attend à observer un battement temporel : à comparer aux détecteurs usuels ($\omega_{\text{oeil}} < 2\pi \times 50 \text{ Hz}$, $\omega_{\text{phd}} < 2\pi \times 10 \text{ GHz}$). Le doublet jaune du sodium donne $\Delta\omega_{\text{Na}} < 2\pi \times 2 \text{ THz}$. On observe pas d'interférences sauf dans des cas très particuliers (ex : battement entre deux lasers pour les asservir, détection hétérodyne, spectroscopie).
- $\Delta\varphi_0(t)$ stationnaire (indépendant du temps. Le déphasage ne doit dépendre que du chemin parcouru par chacune des deux ondes. Ceci impose une cohérence entre les deux ondes, notion sur laquelle on reviendra.

Transition : Une solution simple pour obtenir deux sources cohérentes est de créer des sources secondaires à partir d'une même source ponctuelle pour les faire interférer. Il existe des dispositifs à division du front d'onde (trous d'Young, bimiroir de Fresnel) et dispositifs à division d'amplitude (Michelson, Mach-Zender).

1.3 Une dispositif à division du front d'onde : les fentes d'Young

1.3.1 Dispositif expérimental

Schéma des fentes d'Young

EXP : fentes d'Young éclairées par un laser He-Ne vert, (fente simple pour la diffraction puis fente double pour les interférences).

L'observation de cette figure d'interférence (1801) a permis de confirmer le caractère ondulatoire de la lumière.

Slide : interférences constructives et destructives.

1.3.2 Calcul de la différence de marche

La différence de phase à l'origine est nulle car les ondes sont issues de la même source. Le calcul du déphasage se ramène à un calcul de différence de marche

$$\delta = (SS_2M) - (SS_1M). \quad (6)$$

La source est sur l'axe optique, on a donc $(SS_1) = (SS_2)$. Après les fentes on a

$$(S_1M) = \sqrt{D^2 + \left(\frac{a}{2} - x\right)^2}. \quad (7)$$

Comme $D \gg x, a$, on obtient

$$(S_1M) \approx \frac{D}{2} \left[1 + \left(\frac{a - 2x}{2D} \right)^2 \right] \quad (8)$$

et de la même façon

$$(S_2M) \approx \frac{D}{2} \left[1 + \left(\frac{a + 2x}{2D} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Ainsi,

$$\delta = (S_2M) - (S_1M) \approx \frac{ax}{D}. \quad (10)$$

1.3.3 Figure d'interférence

On obtient donc sur l'écran un éclairement modulé spatialement de la forme

$$I(x) = 2I_0 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{ax}{\lambda D} \right) \right]. \quad (11)$$

L'éclairement varie rapidement avec la différence de marche, ce qui permet d'utiliser des dispositifs interférentiels pour des mesures très précises de petits déplacements (mesures de forces faibles par déviations de nano-miroirs, optomécanique, interférométrie gravitationnelle) ou encore de variation d'indices optiques (mesure de l'indice de l'air).

On appelle interfrange i la période spatiale de la figure :

$$i = \frac{\lambda D}{a}. \quad (12)$$

EXP : mesure de l'interfrange pour remonter à l'écartement entre les fentes, à comparer à la valeur du fabricant.

Slide : autres mesures réalisées en préparation pour différents écartements des fentes.

Le contraste \mathcal{C} est défini tel que

$$\mathcal{C} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (13)$$

Ici le contraste vaut 1.

Transition : On a étudié le cas d'une source ponctuelle monochromatique, qu'il est plutôt rare de rencontrer. Que se passe-t-il pour une source réelle ?

1.4 Cohérence de la source

1.4.1 Évolution du contraste

Modification du schéma précédent avec une deuxième source de largeur.

Les sources sont incohérentes, on somme les éclairements. On observe un brouillage si les figures sont décalées d'un demi interfrange.

Slide : Évolution du contraste dans le cas de deux sources ponctuelles.

Applications : mesure de l'écart angulaire entre deux étoiles lointaines.

EXP : passage en source étendue avec une lampe Quartz-Iode et une fente réglable. On observe une variation du contraste suivant la largeur de la fente source.

1.4.2 Source étendue

On suppose que chaque point de la fente source émet la même intensité lumineuse I_l avec

$$I_0 = \int_{-b/2}^{b/2} I_l dX. \quad (14)$$

Schéma. L'éclairement dû à un élément de longueur dX de la source est donné par

$$dI = 2I_l \left[1 + \cos \left(k \frac{ax}{D} + k \frac{aX}{d} \right) \right] dX. \quad (15)$$

Les sources étant incohérentes, on peut sommer les éclairissements et on obtient après calcul en utilisant la relation $\sin p - \sin q = 2 \cos \frac{p+q}{2} \sin \frac{p-q}{2}$

$$I(x) = 2I_0 \left[1 + \cos \left(k \frac{ax}{D} \right) \sin \left(k \frac{ab}{2d} \right) \right]. \quad (16)$$

Slide : mesures réalisée en préparation avec l'évolution du contraste en fonction de la largeur de la fente source.

Plus généralement, le théorème de van Cittert-Zernike fait le lien entre l'allure spatiale de la source et le contraste de la figure d'interférence en faisant intervenir la transformée de Fourier spatiale de la source.

Application : mesure du diamètre angulaire d'une étoile.

1.4.3 Cohérence temporelle

On passe à une source non monochromatique avec une étendue spectrale $\Delta\nu$ finie. De la même façon qu'avec la cohérence spatiale, il existe une relation entre la transformée de Fourier du profil spectral de la source et l'évolution du contraste en fonction de la différence de marche (théorème de Wiener-Kintchine).

Schéma : modèle des trains d'onde avec petite et grande différence de marche.

Pour quantifier la cohérence temporelle de la source, on parle de temps de cohérence τ_c

$$\tau_c \approx \frac{1}{\Delta\nu} \quad (17)$$

et de longueur de cohérence l_c

$$l_c = c\tau_c. \quad (18)$$

1.5 Conclusion

On a vu les conditions pour observer des interférences en optique, avec des limites importantes, liées à la cohérence limitée des sources communes. Ces limites se traduisent par une évolution du contraste de la figure d'interférence avec les propriétés de la source, ce qui peut être utilisé pour étudier les propriétés de la ou des source(s). Le laser permet de palier à ces limitations avec des cohérences spatiale et temporelle importantes, ce qui en fait un outils de choix pour des mesures extrêmement précises.

Liste du matériel

Interférence avec un laser :

- laser He-Ne vert ;
- banc optique (pour le confort d'utilisation) ;
- deux montures ;
- fente simple réglable ;
- fentes doubles (200, 300 et 500 μm) ;
- écran ;
- mètre règle ou autre ;
- barrette CCD.

Variation du contraste avec une source étendue :

- lampe quartz-iode (ou led) ;
- condenseur 8 cm ;
- calles en bois ;
- filtre anti-thermique ;
- banc optique ;
- six montures ;
- diaphragme ;
- deux fentes réglables ;
- fentes doubles ;
- écran.

Références

- [BFR79] Bertin, M., Faroux, J.-P., and Renault, J. *Electromagnétisme 2*. Dunod edition (1979).
- [BFR84] Bertin, M., Faroux, J.-P., and Renault, J. *Electromagnétisme 1*. Dunod edition (1984).
- [BFR86a] Bertin, M., Faroux, J.-P., and Renault, J. *Electromagnétisme 3*. Dunod edition (1986).
- [BFR86b] Bertin, M., Faroux, J.-P., and Renault, J. *Optique et physique ondulatoire*. Dunod edition (1986).
- [Che99] Chenevez, O. *Electromagnétisme, Physique des ondes*. Prepamath edition (1999).
- [FLT⁺16] Fruchart, M., *et al.* *Physique expérimentale*. Deboeck edition (2016).
- [FR96] Faroux, J.-P. and Renault, J. *Electromagnétisme 1*. Dunod edition (1996).
- [FR98] Faroux, J.-P. and Renault, J. *Electromagnétisme 2*. Dunod edition (1998).
- [FR99] Faroux, J.-P. and Renault, J. *Optique et physique ondulatoire*. Dunod edition (1999).
- [PCF09] Pérez, J.-P., Carles, R., and Fleckinger, R. *Electromagnétisme, Fondements et applications*. Dunod edition (2009).
- [Pér17] Pérez, J.-P. *Optique, Fondements et applications*. Dunod edition (2017).