Rapport oral 11/01/2021

LP 33 : Interférences à deux ondes en optique

Binôme 05 : Aurélien Ricard, Rémy Lienard

Correcteur : Pierre Jamonneau

Niveau : L2
Prérequis : Propagation de la lumière dans le vide (vectoriel), Optique géométrique, notions de diffraction, lumière polarisée

J'ai essayé de mettre en vert les diapos auxquelles je me réfère, en bleu les remarques orales/-transitions. Les calculs sont moins détaillés que ce que j'ai fait au tableau (mais aussi avec moins d'erreurs :D). J'ai aussi apporté des corrections qui ont été demandées en remarques, le texte est différent de ce que j'ai présenté à l'oral mais je n'ai pas trouvé pertinent de mettre des bêtises dans le rapport. Bonne lecture, n'hésitez pas à me contacter pour d'éventuelles questions, ou pour discuter des questions existentielles qui restent ouvertes après les remarques.

Un débat règne au XVIIe siècle concernant la nature corpusculaire ou ondulatoire de la lumière. En 1801, Thomas Young réalise une expérience qui permet de démontrer le caractère ondulatoire de la lumière. voir diapo pour le schémas

Expérience fentes de Young (avec capteur CCD mieux)

On voit ici que la superposition de lumière donne des zones d'obscurité, alors que si on prenait deux lasers différents on aurait un éclairement différent. C'est un phnomène d'interférences, que l'on va essayer d'expliquer au cours de cette leçon.

1 Observation des interférences

1.1 Grandeur accessible : éclairement

On veut étudier des interférences, mais à quoi a-t-on accès lors de ces expériences?

En optique, on utilise des capteurs qui sont sensibles à l'intensité, donc une grandeur énergétique. C'est une grosse différence avec des domaines comme l'accoustique où les capteurs sont sensibles à la pression (amplitude des champs donc).

La grandeur intéressante ici est l'éclairement, qui pour une onde plane s'écrit $\mathcal{E} = A < \|\overrightarrow{E}\|^2 >_\tau$ où τ est le temps de réponse du capteur. Pour l'oeil (capteur utilisé quand on regarde directement l'écran), $\tau = 10^{-2}s$, tandis que pour une photodiode on a plutôt $\tau = 10^{-6}s$.

Or en optique, les fréquence sont de l'ordre de $\nu = 10^{15}Hz$, en fait on a accès à des grandeurs moyennées sur des temps bien plus longs que les périodes des ondes. C'est un aspect essentiel pour comprendre les calculs qui vont être faits par la suite, et ce que l'on observe effectivement.

Maintenant que l'on s'est donné un cadre d'étude, on va étudier la superposition de deux ondes et dans ces conditions, calculer l'éclairement donné par le capteur

1.2 Superposition (avec un seul p) de deux ondes

Définition: On parle d'interférences lorsque l'éclairement total observé est différent de la somme des éclairements de chaque source prise individuellement.

Expression des ondes sur une diapo

L'éclairement total en M s'écrit :

$$\mathcal{E}(M) = A < \|\overrightarrow{E_1} + \overrightarrow{E_2}\|^2 >_\tau \tag{1}$$

On aboutit à

$$\mathcal{E}(M) = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + 2A\overrightarrow{E_{01}}.\overrightarrow{E_{02}}(< cos((\omega_1+\omega_1)t - \phi_1(M,t) - \phi_2(M,t)) >_\tau + < cos((\Delta\omega t - \phi_1(M,t) + \phi_2(M,t)) >_\tau) \tag{2}$$

On en déduit :

1. Il faut $\omega_1 = \omega_2$
2. Même source
3. Il faut des ondes non polarisées perpendiculairement.
4. Le terme en $\omega_1 + \omega_1$ saute car la somme est toujours de l'ordre de grandeur de ω

Remarque :On a utilisé la polarisation des ondes et on l'a supposé inchangée. Pour que cela soit valable tout le temps, on se place dans l'approximation de Gauss, c'est à dire que l'on n'aura pas de composante du champ selon l'axe optique (petits angles) et les polarisations rectilignes ici ne bougeront pas, c'est important pour les prochaines parties. On va d'ailleurs dès à présent poser que les polarisations sont alignées, donc $A\overrightarrow{E_{01}}.\overrightarrow{E_{02}} = AE_{01}^2 = \mathcal{E}_1$

En introduisant la différence de marche, on obtient la formule de Fresnel :

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_1(1 + cos(\frac{2\pi}{\lambda}\delta(M))) \tag{3}$$

Le terme d'interférence fait apparaitre la différence de chemin optique. De façon générale, la méthode sera d'identifier les sources secondaires, et de calculer cette différence de marche. On utilise ensuite la formule de Fresnel pour caractériser la figure d'interférences observée. C'est ce que l'on s'apprête à faire sur le dispositif de fentes d'Young

2 Obtention expérimentale d'interférences

2.1 Dispositif de fentes d'Young

Schémas sur diapo, il était au tableau car on n'avait pas la possibilité de garder le video projecteur et d'écrire. Je rappelle les notations quand même: On note $a = S_1S_2$ distance entre les deux fentes, D la distance fentes-écran, x, y les coordonnées du point d'observation, l'axe optique est selon Oz. Voir figure1

On écrit :

$$\overrightarrow{S_1M} = (x - \frac{a}{2}, y, D); \overrightarrow{S_2M} = (x + \frac{a}{2}, y, D) \tag{4}$$

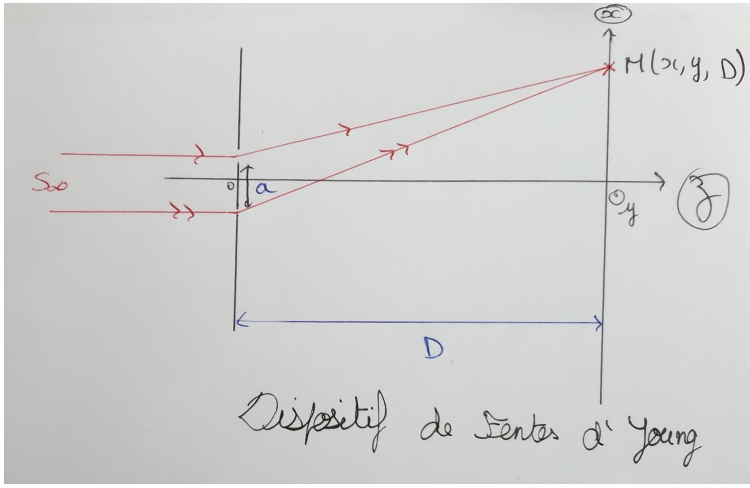

Figure 1

2.2 Calcul d'interfrange

Avec la formule de Fresnel, l'hypothèse $D >> x, y$ on trouve la différence de marche, l'éclairement et l'interfrange :

$$\delta(M) = \frac{nax}{D} \tag{5}$$

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_1(1 + cos(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{nax}{D})) \tag{6}$$

$$i = \frac{\lambda D}{na} \tag{7}$$

On peut remarquer que l'éclairement ne dépend plus de y :on a une figure d'interférences modulée uniquement selon x. On peut définir l'odre des franges $p = \frac{\delta}{\lambda}$, qui étquette chaque frange.

Depuis le début, on considère une source ponctuelle à l'infini. Mais En réalité, les sources utilisées ont une extension spatiale. On peut les considérer comme des sources ponctuelles qui émettent chacune une onde plane, et cela aura des conséquences sur la figure d'interférences.

3 Cohérence spatiale

3.1 Eclairement dû à une source étendue

Considérons deux points distincts d'une source. Pour rappel, l'expression de l'éclairement en un point M de l'écran est : $\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_1(1 + < cos(\phi_2(M,t) - \phi_1(M,t)) >_\tau)$. La dépendance en temps des déphasages est propre à chaque source, et on admet qu'ici elle varie sur une durée caractérisque courte devant τ. Donc pour deux points différents de la source, la valeur moyenne du cosinus sera nulle, et l'éclairement total sera uniquement la somme des éclairements produits par chaque source (qui eux dépendent de l'espace!). On dit que les deux sources sont **incohérentes**. Plus précisément, on parle de cohérence spatiale dans cet exemple.

On va essayer de quantifier ce phénomène : en fait, il faut d'abord connaître l'éclairement dû à une source qui n'est pas sur l'axe optique. Pour le reste de cette partie, on va considérer uniquement deux points différents pour comprendre le phénomène.

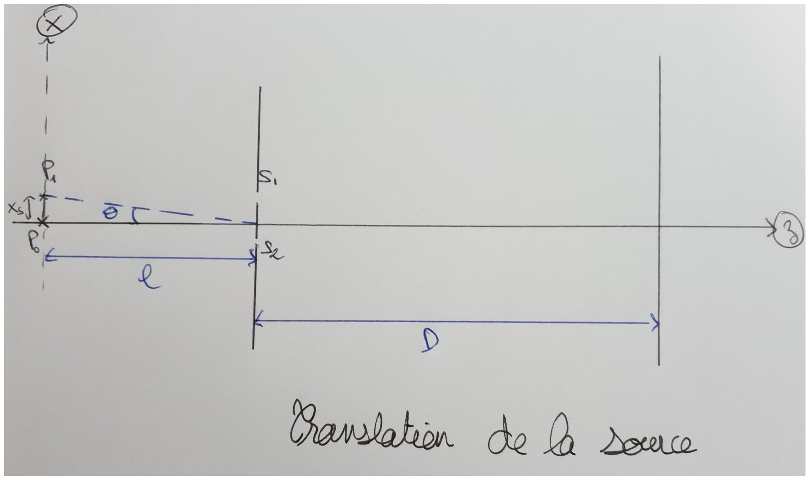

Figure 2

3.2 Translation d'une source par rapport à l'axe optique

Pareil, le schémas était au tableau, je le mets ici. On translate un point perpendiculairement à l'axe optique d'une distance X_s (voir figure 2), on obtient une différence de marche δ_0 qui s'ajoute à la différence de marche entre les deux rayons sortant des fentes, par relation de Chasles :

$$\delta(M) = (SS_2M) - (SS_1M) = (SS_2) - (SS_1) + \frac{nax}{D} \tag{8}$$

On obtient alors en notant identifiant $\delta_0 = (SS_2) - (SS_1) = \frac{naX_s}{l}$ avec l la distance entre les fentes et le plan de la source. On a en fait la même figure d'interférences translatée d'une distance $x_0 = \frac{-DX_s}{nl}$ qui est la nouvelle position de la frange centrale (définie pour une différence de marche nulle).

On a alors tous les outils : on sait qu'il faut sommer les éclairements de deux sources ponctuelles non cohérentes, et on connaît l'expression de l'éclairement dû à un point n'importe où dans le plan de la source. On va alors appliquer cela à l'étude d'un système binaire.

3.3 Somme incohérente des éclairements

figure 2

Considérons un système d'étoiles binaires proches l'une de l'autre : une sur l'axe optique notée P_0(que l'on vise) située à la distance l de la Terre, l'autre perpendiculaire à l'axe optique notée P_1, distante de X_s de P_0. On utilise un système de fentes d'Young pour évaluer la distance qui les sépare : on vient de voir qu'il faut sommer les deux éclairements, donc on aura en supposant qu'elles émettent des ondes planes avec la même intensité

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_1(1 + cos(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{nax}{D})) + 2\mathcal{E}_1(1 + cos(\frac{2\pi}{\lambda}(\frac{nax}{D} + \frac{naX_s}{l}))) \tag{9}$$

Pour obtenir :

$$\mathcal{E}(M) = 4\mathcal{E}_1(1 + cos(\frac{\pi}{\lambda}\frac{naX_s}{l})cos(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{nax}{D} + \frac{\pi naX_s}{l\lambda})) \tag{10}$$

Ce qui est important est le terme en $cos(\frac{\pi}{\lambda}\frac{naX_s}{l})$: on qualifie ce terme de contraste. Il affecte l'amplitude de l'éclairement dans les interférences. Donc pour des valeurs particulières de a, cette amplitude sera nulle, on parle alors **d'anticoïncidences**. On observe alors à l'écran un éclairement uniforme puisque $\mathcal{E}(M) = 4\mathcal{E}_1$.

Remarque: Ce terme de contraste ne dépend pas de la coordonnée d'espace sur l'écran, c'est typique de la cohérence spatiale.

On peut ainsi, en faisant varier a et en trouvant les $a_k = \frac{\lambda l}{2naX_s} + k\frac{\lambda l}{naX_s}$, k entier, on peut remonter à l'angle $\theta \simeq \frac{X_s}{l}$ sous lequel sont vues les deux étoiles, ce qui ne serait pas possible avec un télescope au vu de sa résolution maximale.

4 Conclusion

On a fini sur la cohérence spatiale, on aurait très bien pû parler de cohérence temporelle qui a lieu lorsque le spectre de la source est élargi, qui cette fois met en défaut l'égalité des fréquences et des phases aléatoires dans les conditions d'interférences.

5 Remarques et questions

1.
2. Expliquer la tâche dans l'expérience de fentes d'Young. (Diffraction)
3. On aurait pu utiliser une barette ccd pour l'expérience et zoomer sur la tâche centrale, c'est plus visuel
4. Expliquer pourquoi en accoustique c'est différent? Même interfrange, mais en accoustique réceteurs sensibles à la surpression (amplitude) alors qu'en optique on observe l'énergie.
5. Comment montrer expérimentalement la condition de polarisation? J'ai proposé de mettre des polariseurs croisées dans les bras d'un Mach-Zender
6. Est-ce qu'un filtre devant une lampe blanche permettrait de s'affranchir de l'incohérence? Non
7. Pourquoi fentes plutôt que trous? Meilleure luminosité avec les fentes qui sont étendues, donc laissent passer plus de lumière.
8. Comment on définit les interférences en optique? (L'écrire, somme des éclairements différente de l'éclairement total)
9. Différence entre éclairement et intensité?
10. Les champs avec le terme de phase aléatoire sont-ils monochromatiques? Non, ce terme permet d'introduire une largeur spectrale et le modèle du train d'ondes
11. Condition pour la polarisation ? Approximation de Gauss, le dire dans la leçon
12. égalité stricte des fréquences nécessaire? Non, il faut que la différence en fréquences soit faible devant $\frac{1}{\tau}$, on peut avoir battements sous certaines conditions (sources accordées)

13. Dire qu'on ne s'intéresse qu'à un seul rayon lumineux dans les schémas.

14. Lechangement de contraste est-il uniquement sur l'écran? Non, interférences sur un volume. Lequel? Là où les cônes de diffraction se croisent

15. Questions sur la cohérence temporelle, modèle du train d'onde...

16. Bien dire que c'est la formule de Fresnel pour l'éclairement total

17. Parler de champ d'interférences

18. Si on ne fait pas de cohérence temporelle, ne pas parler de phase aléatoire de la source...On n'a pas trouvé comment expliquer la cohérence spatiale sans ça, peut être juste dire si ce n'est pas le même point source, on somme les éclairements...

19. Pourquoi ne pas avoir mis un point sur l'axe et pas à l'infini? C'est un peu plus clair...

Remarques personnelles, biblio: Ne pas faire les deux cohérences, déjà ici je n'ai pas eu le temps de tout faire. Il faut cependant parler de cohérence (c'est dit dans les rapports de jury). Pour la biblio, je me suis globalement appuyé sur le HPREPA d'optique.