Optique ondulatoire - Chap. II : Conditions d'interférences

31 mars 2026

1 Intensité lumineuse

Première observation expérimentale des interférences lumineuses : **Thomas Young en 1801**. Ceci a (pour un temps) convaincu la communauté scientifique que la lumière était une onde (vs. Newton qui pensait que c'était un corpuscule). Pourquoi on a du attendre si tard ? On va voir que la réalisation expérimentale d'interférences lumineuses est complexe. **Première expérience :** on superpose la lumière de deux lampes QI : pas d'interférences.

On a vu dans le chapitre précédent qu'une onde lumineuse émise en S produit un signal au point M à l'instant t qui peut s'écrire

$$a(M,t) = A(M)\cos(\omega t - k(SM) + \phi_0). \tag{1}$$

La puissance transportée par ce signal est proportionnelle au carré du signal, $\mathcal{P} \propto a(M,t)^2$.

Les longueurs d'ondes lumineuses sont comprises entre 400 et 800 nm. Cela correspond à des fréquences comprises entre $3{,}75 \times 10^{14}$ Hz et $7{,}5 \times 10^{14}$ Hz. On retiendra que $f_{\text{visible}} \sim 1 \times 10^{14}$ Hz. Regardons maintenant le temps de réponse de quelques capteurs

Capteur	Temps de réponse (s)
Oeil	1×10^{-2}
Plaque photographique	1×10^{-3}
Photodiode	1×10^{-6}
Photomultiplicateur	1×10^{-9}

Table 1 – Temps de moyennage de différents capteurs.

La période de l'onde lumineuse est $T \sim 1 \times 10^{-14}$ s. Ainsi **tous** les détecteurs ne sont sensibles qu'à la **moyenne** ! (voir figure 1).

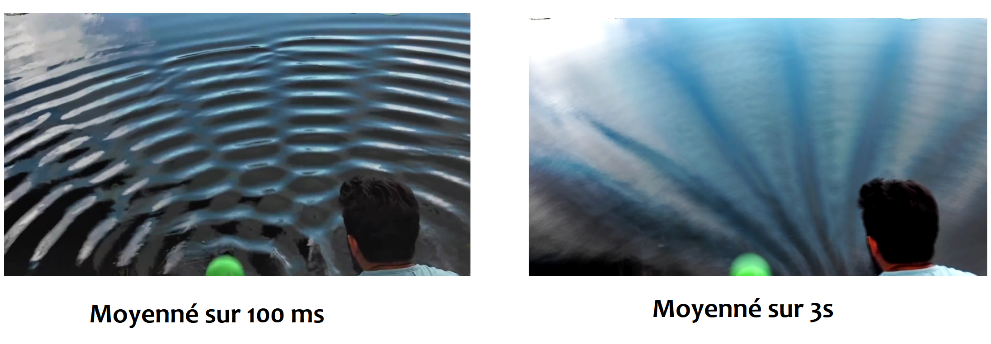

Figure 1 – Effet du moyennage

Ces deux propriétés fondent la définition de l'intensité lumineuse I

$$I(M) = \left\langle a(M,t)^2 \right\rangle . \tag{2}$$

2 Superposition de deux ondes monochromatiques

2.1 Calcul de l'intensité : Formule de Fresnel

Lorsque l'on superpose deux ondes, on peut sommer les amplitudes mais **pas les intensités** (sinon il n'y aurait jamais d'interférences). La superposition de deux ondes a_1 et a_2 au point M donne l'onde totale $a(M,t)$ suivante

$$a(M,t) = a_1(M,t) + a_2(M,t) = A_1(M)\cos(\omega_1 t + \phi_1(M)) + A_2(M)\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)) \tag{3}$$

L'intensité au point M est donc

$$I(M) = \left\langle (A_1(M)\cos(\omega_1 t + \phi_1(M)) + A_2(M)\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)))^2 \right\rangle \tag{4}$$

la moyenne de la somme étant la somme des moyennes,

$$I(M) = \left\langle (A_1(M)\cos(\omega_1 t + \phi_1(M)))^2 \right\rangle + \left\langle (A_2(M)\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)))^2 \right\rangle + 2\left\langle A_1 A_2 \cos(\omega_1 t + \phi_1(M))\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)) \right\rangle \tag{5}$$

$$I(M) = \frac{1}{2}A_1(M)^2 + \frac{1}{2}A_2(M)^2 + 2\left\langle A_1 A_2 \cos(\omega_1 t + \phi_1(M))\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)) \right\rangle \tag{6}$$

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\left\langle A_1 A_2 \cos(\omega_1 t + \phi_1(M))\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)) \right\rangle . \tag{7}$$

Le dernier terme est appelé *terme d'interférences*. Il y a des interférences si ce terme est non nul i.e. si $I \neq I_1 + I_2$. Si lorsque l'on superpose deux ondes elles donnent lieu à des interférences, alors ces ondes sont qualifiées de *cohérentes*.

Regardons en détail ce terme d'interférences :

$$* = \frac{A_1 A_2}{2}\cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1(M) + \phi_2(M)) + \frac{A_1 A_2}{2}\cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1(M) - \phi_2(M)) \tag{8}$$

La valeur moyenne du premier terme est nulle car il est forcément oscillant. La valeur moyenne du second terme est non nulle si et seulement si

$$\omega_1 = \omega_2 \tag{9}$$

première condition d'interférences !

Seconde expérience : on superpose la lumière de deux lasers monochromatiques. Toujours pas d'interférences, mystère mystère.

Dans la suite on aura donc $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ et $k_1 = k_2 = k$.

Ainsi

$$\langle A_1 A_2 \cos(\omega t + \phi_1(M))\cos(\omega t + \phi_2(M))\rangle = \frac{A_1 A_2}{2}\langle \cos(-k(S_1 M) + k(S_2 M) + \phi_{10}(t) - \phi_{20}(t))\rangle . \tag{10}$$

En effet les phases à l'origine ϕ_{10} et ϕ_{20} peuvent dépendre du temps ! C'est le modèle des trains d'ondes (figure 2).

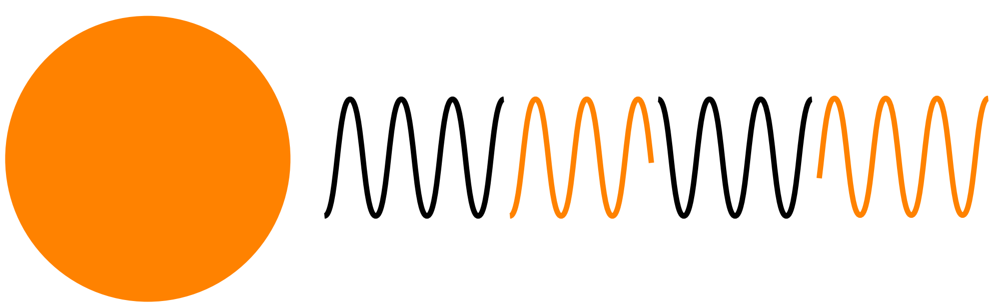

FIGURE 2 – Modèle des trains d'ondes : le signal émis est une sinusoïde par morceaux.

Ainsi si l'on prends deux sources de lumière différentes, la différence de phase à l'origine va rapidement osciller dans le temps : le terme d'interférences deviendra alors nul. La deuxième condition d'interférences est

$$\phi_{10} = \phi_{20} \implies \text{même source primaire de lumière !} \tag{11}$$

C'est pour ça qu'on observe pas d'interférences lorsqu'on superpose la lumière de deux lasers différents. Par contre, si on "coupe" la lumière du même laser en deux et qu'on recombine les faisceaux, ça devrait marcher.

Finalement on obtient pour la valeur moyenne du terme d'interférences

$$\langle * \rangle = \frac{A_1 A_2}{2} \cos(k((S_2M) - (S_1M))) = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(k\delta) = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\delta\right) \tag{12}$$

où on a introduit la *différence de marche* $\delta = (S_2M) - (S_1M)$.

Si on recombine le tout on obtient la **Formule de Fresnel**

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\delta\right) \tag{13}$$

On voit que la figure d'interférences alterne entre des zones d'intensité minimale, lieux d'interférences *destructives* et des zones d'intensité maximale, lieux d'interférences *constructives*.

Remarque : en moyenne (spatiale), $I = I_1 + I_2$: conservation de l'énergie.

Expérience en classe : trous d'Young On observe des interférences ! !

Remarque : une réflexion sur un miroir *déphase* l'onde de π ce qui revient à lui ajouter une différence de marche $\delta = \lambda/2$.

Remarque : On a dit que deux ondes étaient *cohérentes* si leur superposition donne lieu à des interférences. Ainsi, l'intensité résultant de la superposition de deux ondes *incohérentes* est simplement la somme des intensités.

2.2 Contraste

On peut réécrire la formule de Fresnel sous la forme

$$I(M) = (I_1 + I_2)\left(1 + \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\delta\right)\right) = (I_1 + I_2)\left(1 + C(I_1, I_2) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\delta\right)\right) \tag{14}$$

où on a fait apparaître $C(I_1, I_2) = 2\sqrt{I_1 I_2/(I_1 + I_2)}$ qu'on appelle *facteur de contraste*. On peut montrer que $0 \leq C(I_1, I_2) \leq 1$. Un bon contraste correspond à une différence importante entre zones sombres et zones claires de la figure d'interférences.

Le contraste est maximal et vaut 1 si $I_1 = I_2$ (figure 3).

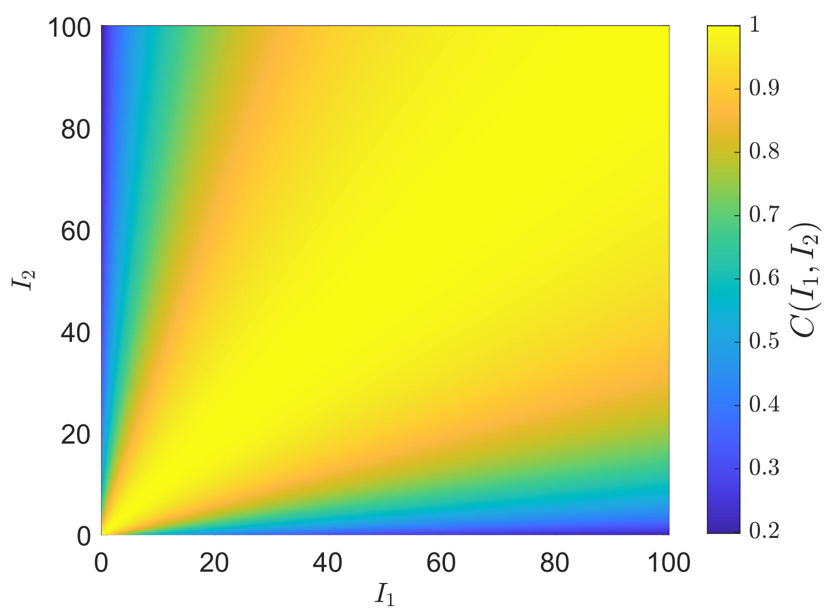

FIGURE 3 – Contraste de la figure d'interférences en fonction de I_1 et I_2.

Dans ce cas là la formule de Fresnel donne

$$I(M) = 2I_0\left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\delta\right)\right). \tag{15}$$

3 Ordre d'interférence

Si les conditions d'interférences sont respectées, l'intensité observée suit la formule de Fresnel et on observe des interférences. On cherche ici à déterminer les conditions menant à des interférences constructives (I est max) ou destructives (I est min).

- Interférences contructives :
$$\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\delta\right) = 1 \implies \frac{\delta}{\lambda} = n \tag{16}$$
avec n un entier.
- Interférences destructives :
$$\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\delta\right) = 0 \implies \frac{\delta}{\lambda} = n + 1/2 \tag{17}$$
avec n un entier.

On définit pour un point M de la figure d'interférences p *l'ordre d'interférence* comme
$$p(M) = \frac{\delta(M)}{\lambda}. \tag{18}$$
Si p est un entier les interférences sont constructives, si p est un demi-entier les interférences sont destructives.