

Optique ondulatoire

Interférences

Phénomène d'interférences

Lorsqu'en un point M , l'éclairement résultant de la superposition de deux (ou plusieurs) ondes n'est pas égal à la somme des éclairements de chacune des ondes, on dit qu'il y a un *phénomène d'interférences*, ou que ces ondes *interfèrent*.

$$\mathcal{E}(M) \neq \mathcal{E}_1(M) + \mathcal{E}_2(M)$$

- Les amplitudes des ondes s'ajoutent : $a(M, t) = a_1(M, t) + a_2(M, t)$. L'éclairement résultant est $\mathcal{E}(M) = 2\langle a^2(M, t) \rangle$.
- On peut écrire $\mathcal{E}(M) = \mathcal{E}_1(M) + \mathcal{E}_2(M) + \mathcal{E}_{12}(M)$, où $\mathcal{E}_{12}(M)$, algébrique, est le *terme d'interférences*.

Les interférences sont dites *constructives* si $\mathcal{E}(M) > \mathcal{E}_1(M) + \mathcal{E}_2(M)$, et *destructives* si $\mathcal{E}(M) < \mathcal{E}_1(M) + \mathcal{E}_2(M)$.

Conditions nécessaires à l'obtention d'interférences

Deux ondes monochromatiques ne peuvent interférer que si elles ont même longueur d'onde.

- On dit alors qu'elles sont *temporellement cohérentes*.
- Si les deux ondes sont de longueurs d'onde différentes, elles sont dites *incohérentes* entre elles. Les éclairements s'ajoutent alors : $\mathcal{E}(M) = \mathcal{E}_1(M) + \mathcal{E}_2(M)$.

Deux ondes ne peuvent interférer que si elles sont issues du même train d'onde.

- On dit alors qu'elles sont *spatialement cohérentes*.
- Deux ondes émises par deux points différents d'une source étendue ne peuvent interférer.

Si deux ondes sont spatialement et temporellement cohérentes, elles sont dites cohérentes et peuvent interférer.

Ondes cohérentes

$$a(M, t) = a_1(M, t) + a_2(M, t)$$

$$\mathcal{E}(M) \neq \mathcal{E}_1(M) + \mathcal{E}_2(M)$$

Les ondes interfèrent

Ondes incohérentes

$$\mathcal{E}(M) = \mathcal{E}_1(M) + \mathcal{E}_2(M)$$

Les ondes n'interfèrent pas

- Dans le cas d'ondes incohérentes, on a toujours $a(M, t) = a_1(M, t) + a_2(M, t)$, mais on écrira directement la relation entre les éclairements.
- Dans la pratique, l'éclairement de chacune des ondes prise isolément est uniforme dans la zone d'observation : $\mathcal{E}_1(M) = \mathcal{E}_1$ et $\mathcal{E}_2(M) = \mathcal{E}_2$. On se placera dans ce cas par la suite.

Interférences à deux ondes

Expression de l'éclairement

L'éclairement résultant de la superposition en un point M de deux ondes cohérentes émises par une source S est donné par

$$\mathcal{E}(M) = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + 2\sqrt{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2} \cos \Delta\varphi(M) = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + 2\sqrt{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2} \cos \left(\frac{2\pi\delta(M)}{\lambda_0} \right) \quad (1)$$

où

λ_0 est la longueur d'onde du rayonnement dans le vide ;

$\Delta\varphi(M)$ est le déphasage entre les deux ondes en M ;

$\delta(M)$ est la différence de marche entre les deux ondes en M . Elle est donnée par

$$\delta(M) = (SM)_2 - (SM)_1$$

- La réflexion d'un des deux rayons sur un milieu plus réfringent (réflexion air/verre par exemple) introduit une différence de marche supplémentaire $\delta_{\text{suppl}} = \lambda_0/2$.

Dans le cas de deux ondes cohérentes identiques, l'éclairement est donné par la formule des interférences à deux ondes :

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta(M)}{\lambda_0} \right) \right] \quad (2)$$

Ordre d'interférences

L'ordre d'interférences en un point M est la grandeur algébrique sans dimension

$$p(M) = \frac{\delta(M)}{\lambda_0} = \frac{\Delta\varphi(M)}{2\pi}$$

Figure d'interférences

champ d'interférences : c'est la zone de l'espace dans laquelle les ondes cohérentes se superposent.

figure d'interférences : la variation de l'éclairement observée sur un écran placé dans le champ d'interférences constitue une *figure d'interférences*.

frange d'interférences : le lieu (connexe) des points de même éclairement sur la figure d'interférences constitue une *frange d'interférences*.

Interfrange : distance entre deux franges brillantes consécutives.

Une frange d'interférence est le lieu des points M tels que $\delta(M) = \text{cte}$.

franges brillantes

Lieu d'éclairement maximal : $\mathcal{E}(M) = \mathcal{E}_{\max}$.

L'ordre d'interférences est entier : $p = m \in \mathbb{Z}$.

Les interférences sont constructives (ondes en phase).

- Entre deux franges brillantes consécutives, l'ordre d'interférences p varie de ± 1 , et la différence de marche varie de $\pm \lambda_0$.

franges sombres

Lieu d'éclairement minimal : $\mathcal{E}(M) = \mathcal{E}_{\min}$.

L'ordre d'interférences est demi-entier : $p = m + \frac{1}{2}$.

Les interférences sont destructives (ondes en opposition de phase).

Contraste

Le contraste d'une figure d'interférences est défini par

$$C = \frac{\mathcal{E}_{\max} - \mathcal{E}_{\min}}{\mathcal{E}_{\max} + \mathcal{E}_{\min}}$$

Il prend des valeurs $0 \leq C \leq 1$.

- Dans le cas de deux ondes différentes donnant l'éclairement (1), le contraste vaut $C = \frac{2\sqrt{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2}}{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}$. En posant $\mathcal{E}_0 = \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}{2}$, on peut écrire

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_0 \left[1 + C \cos\left(\frac{2\pi\delta(M)}{\lambda_0}\right) \right]$$

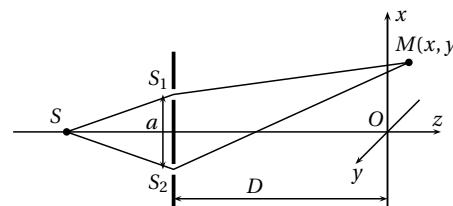
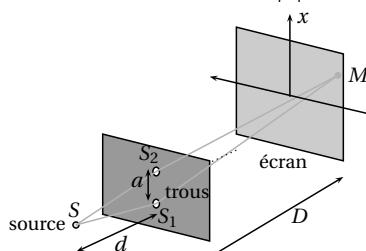
- Dans le cas (2) de deux ondes identiques, on a $C = 1$; les franges sombres sont noires : $\mathcal{E}_{\min} = 0$.
- Si $C = 0$, l'éclairement est uniforme ; la figure d'interférence est dite *brouillée*.

Interférences non localisées par division du front d'onde

Un dispositif interférométrique par division du front d'onde sépare le faisceau en deux faisceaux distincts. Après avoir parcouru des chemins différents, ces deux faisceaux se superposent donnant lieu à des interférences.

Dispositif des trous d'Young

Une source ponctuelle S éclaire deux trous de faible diamètre ($\approx 1/10^6$ de mm), séparé de a (de l'ordre du mm). Ces deux trous diffraient la lumière : ils se comportent comme deux sources ponctuelles cohérentes ; on observe l'éclairement résultant sur un écran situé à une distance D (de l'ordre du mètre) des trous. On a $a \ll D$, $|x| \ll D$ et $|y| \ll D$.



La différence de marche $\delta(M) = (SS_2M) - (SS_1M)$ entre deux rayons arrivant en M se linéarise selon

$$\delta(M) = \frac{ax}{D}$$

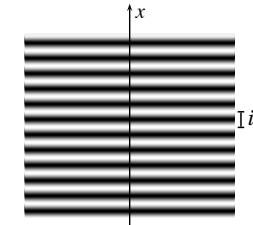
L'éclairement en $M(x, t)$ s'écrit

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi ax}{\lambda_0 D}\right) \right]$$

On observe des franges rectilignes, perpendiculaires à l'axe S_1S_2 des trous. L'éclairement étant périodique, l'interfrange est la période de $\mathcal{E}(x)$, soit

$$i = \frac{\lambda_0 D}{a}.$$

- Si les deux trous sont identiques, le contraste de la figure d'interférence vaut $C = 1$.
- En $x = 0$, l'ordre d'interférence vaut $p(0) = 0$: la **frange centrale est brillante**.



Utilisation d'une source étendue

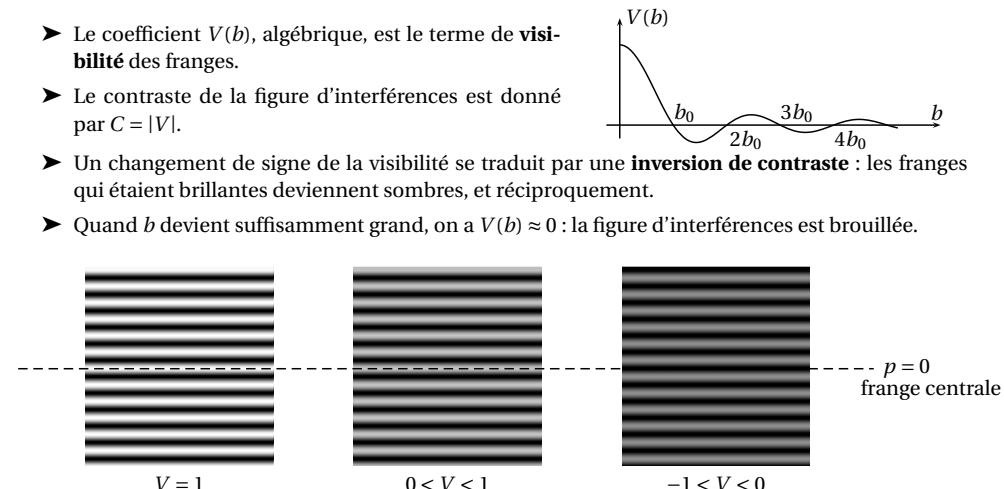
Si les trous d'Young sont éclairés par une source étendue, chaque point de la source donne sa propre figure d'interférences ; les différents points étant incohérents entre eux, les éclairements des différentes s'ajoutent.

L'éclairement résultant peut s'écrire

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_0 \left[1 + V(b) \cos\left(\frac{2\pi ax}{\lambda_0 D}\right) \right] \quad \text{avec } V(b) = \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi ab}{\lambda_0 D}\right)$$

où $\sin c = \frac{\sin x}{x}$ définit la fonction **sinus cardinal**. En particulier $\lim_{x \rightarrow \infty} \operatorname{sinc}(x) = 0$.

- Le coefficient $V(b)$, algébrique, est le terme de **visibilité** des franges.
- Le contraste de la figure d'interférences est donné par $C = |V|$.
- Un changement de signe de la visibilité se traduit par une **inversion de contraste** : les franges qui étaient brillantes deviennent sombres, et réciproquement.
- Quand b devient suffisamment grand, on a $V(b) \approx 0$: la figure d'interférences est brouillée.



Soit un dispositif interférométrique par division du front d'onde.

- Lorsqu'il est éclairé par une source ponctuelle, les interférences sont visibles partout dans le champ d'interférences avec le contraste maximal.
- Lorsqu'il est éclairé par une source étendue, la figure d'interférences est brouillée dans tout le champ d'interférences : on ne peut voir les franges nulle part.

Les interférences par division du front d'onde sont dites **non localisées**.