

Interférences non-localisées

1 Introduction

- La lumière est une onde électromagnétique de fréquence ν , de longueur d'onde λ_0 dans le vide avec $\lambda_0 = c/\nu$.
- L'intensité lumineuse est $I = \underline{A}\underline{A}^*$ avec \underline{A} l'amplitude complexe de l'onde lumineuse.
- La représentation complexe d'une onde au point M s'écrit $\underline{\psi}(M, t) = A_0 e^{i(\varphi(M) - \omega t)}$ avec $\omega = 2\pi\nu$ et $\varphi(M)$ est une phase dépendant de la position du point M . Cette phase ne dépend que de la position et du milieu de propagation, pas du temps.
- La représentation complexe de l'onde est $\underline{A}(M) = A_0 e^{i\varphi(M)}$.
- Si deux ou plusieurs ondes arrivent au point M , l'amplitude complexe totale en M est la somme des amplitudes complexes.

En M , on additionne les amplitudes complexes, pas les intensités des ondes. Lorsque l'intensité totale n'est pas égale à la somme des intensités, on dit qu'il y a interférence. Si l'intensité totale est plus forte que la somme des intensités, les interférences sont constructives. Si au contraire l'intensité totale est plus faible, elles sont destructives. On peut obtenir la situation a priori surprenante suivante : deux ondes se superposent en M , avec chacune une intensité non-nulle en ce point, mais la superposition des deux a une intensité nulle par interférence destructive.

2 Interférence de deux ondes

On considère deux ondes de même longueur d'onde dans le vide, d'amplitudes complexes $\underline{A}_1 = a_1 e^{i\varphi_1(M)}$ et $\underline{A}_2 = a_2 e^{i\varphi_2(M)}$. La superposition de ces deux ondes a pour amplitude complexe

$$\underline{A} = a_1 e^{i\varphi_1(M)} + a_2 e^{i\varphi_2(M)}$$

L'intensité en M est

$$I = \underline{A}\underline{A}^* \tag{1}$$

$$= (a_1 e^{i\varphi_1(M)} + a_2 e^{i\varphi_2(M)})(a_1 e^{-i\varphi_1(M)} + a_2 e^{-i\varphi_2(M)}) \tag{2}$$

$$= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_2(M) - \varphi_1(M)) \tag{3}$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2(M) - \varphi_1(M)) \tag{4}$$

La dernière égalité est un résultat important, à retenir. On voit que I est la somme de trois termes : la somme des intensités des deux ondes et un dernier terme qui représente les interférences.

En fonction du point M , $\varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ varie, et l'intensité varie sinusoidalement entre deux valeurs $I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ pour le cosinus égal à -1 et $I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ pour le cosinus égal à +1. Il y a donc des zones plus lumineuses que d'autres.

Le contraste des interférences est donné par

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$$

Il est maximal lorsque $I_1 = I_2 = I_0$ et vaut alors 1. On a dans ce cas $I_{min} = 0$ et $I_{max} = 4I_0$, et $I = 2I_0[1 + \cos(\varphi_2(M) - \varphi_1(M))]$.

3 Interférences entre les ondes émises par deux sources ponctuelles

3.1 Conditions d'interférences

Si on place deux ampoules allumées l'une à côté de l'autre, on n'observe pas d'interférences. Il faut donc respecter certaines conditions pour en obtenir :

- les deux ondes émises doivent avoir la même fréquence ou longueur d'onde
- la différence de phase entre les ondes émises par les deux sources ne doit pas varier dans le temps.

Si deux sources vérifient ces conditions, on dit qu'elles sont cohérentes entre elles. Des interférences sont alors observables.

Si deux sources sont incohérentes, on n'observe pas d'interférences.

On verra dans la suite comment obtenir deux sources cohérentes entre elles.

3.2 Amplitudes complexes des ondes

On suppose que les ondes émises par les deux sources ont la même intensité I_0 et qu'elles sont en phase lors de leur émission.

La phase $\varphi_1(M)$ de l'onde 1 en M est $\varphi_1(M) = kS_1M = \frac{2\pi}{\lambda}S_1M = \frac{2\pi}{\lambda_0}nS_1M = \frac{2\pi}{\lambda_0}[S_1M]$ où $[S_1M] = nS_1M$ est le chemin optique de la source S_1 à M .

De même, $\varphi_2(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0}[S_2M]$.

3.3 Interférence des deux ondes

L'intensité en M est

$$I = 2I_0(1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda_0}([S_2M] - [S_1M])))$$

$\delta = [S_2M] - [S_1M]$ est appelée différence de marche entre les deux ondes en M .

$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\delta$ est la différence de phase entre les ondes en M .

Les surfaces d'égale intensité sont celles vérifiant $\delta = \text{constante}$, soit $S_1M - S_2M = \text{constante}$. Il s'agit d'hyperboloïdes de révolution d'axe S_1S_2 . Voir la figure ci-dessous.

Pour $\delta = p\lambda_0$, p entier, on a des franges brillantes. Pour $\delta = \lambda_0/2 + p\lambda_0$, on a des franges sombres.

3.4 Principe du calcul des interférences

1. Identifier la position des sources S_1 et S_2 .
2. Identifier le point M où on fait l'observation.
3. Calculer les chemins optiques $[S_1M]$ et $[S_2M]$. En déduire la différence de marche $\delta = [S_2M] - [S_1M]$ et la différence de phase $\varphi = 2\pi\delta/\lambda_0$.
4. On en déduit $I = 2I_0(1 + \cos \varphi)$

Définition utile : on appelle ordre d'interférence la quantité $p = \varphi/(2\pi) = \delta/\lambda_0$.

Exemple : calcul de δ pour M le long d'un axe parallèle à S_1S_2 et éloigné des sources. Puis calcul de I . Montrer pour quelles valeurs de la position I est maximale, pour lesquelles elle est minimale. Notion d'interfrange :

$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

où λ est la longueur d'onde, D la distance du plan des sources au plan d'observation et a la distance entre les sources. Cette formule est à connaître et à savoir appliquer.

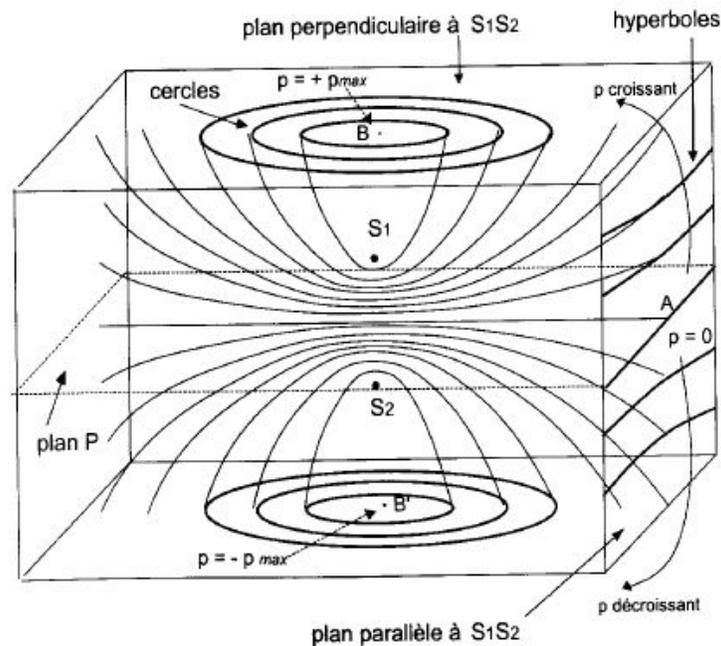


Figure 1: Les franges d'interférences entre deux sources ponctuelles sont présentes dans tout l'espace. Elles ne sont pas localisées. Elles ont la forme d'hyperboloïdes de révolution autour de l'axe formé par les deux sources. Si on les observe dans un plan perpendiculaire à cet axe, on observe des anneaux. Si on les observe dans un plan parallèle à cet axe, on voit des arcs d'hyperboles, qui sont presque rectilignes.

4 Dispositifs pour créer deux sources ponctuelles cohérentes entre elles

4.1 Nécessité d'une source primaire unique

Rappel : deux sources sont cohérentes entre elles si elles émettent des ondes de même fréquence et dont la différence de phase ne varie pas dans le temps.

Si on prend deux lasers identiques, la condition sur la fréquence est à peu près vérifiée, mais pas celle sur la différence de phase. En effet, chaque laser émet ses propres trains d'onde qui ont une certaine durée et dont la phase varie aléatoirement d'un train d'onde au suivant. La différence de phase entre les deux lasers varie donc aléatoirement au cours du temps.

Pour avoir deux sources cohérentes, il faut donc partir d'une seule source de lumière (source primaire), et former deux sources secondaires à partir de cette source primaire. Pour cela, on utilise un dispositif qui crée deux images géométriques de la source primaire. Ces deux images sont les sources secondaires.

On distingue deux familles de dispositifs : à division du front d'onde et à division d'amplitude.

4.2 Dispositifs à division du front d'onde

Dans ces dispositifs, deux faisceaux lumineux émis en même temps par la source primaire donnent naissance à deux faisceaux qui peuvent interférer. Il y a de très nombreux dispositifs à division du front d'onde, qui n'ont pour la plupart qu'un intérêt historique ou pédagogique. Nous allons en voir trois.

4.2.1 Trous d'Young

Pour expliquer le fonctionnement de ce dispositif, il faut faire appel au phénomène de diffraction : si on essaie de restreindre les dimensions latérales d'un faisceau lumineux, en le faisant passer par un trou par exemple, ce faisceau s'étale dans la direction où on essaye de le restreindre. En passant par un trou circulaire, la lumière s'étale dans toutes les directions et

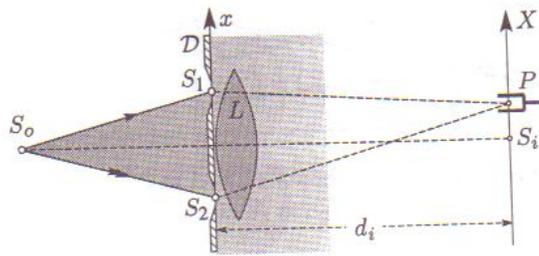


Figure 2: Trous d'Young : Deux trous sont éclairés par une source primaire ponctuelle. Chacun de ces trous se comporte comme une source secondaire. On utilise éventuellement une lentille de projection.

le trou se comporte comme une source ponctuelle.

L'interfrange à pour expression $i = \lambda d_i / a$.

Ce dispositif est toujours utilisé de nos jours (astronomie) et aussi pour des ondes autres que lumineuses.

Une variante du montage consiste à observer les franges, puis à placer un milieu d'indice n et d'épaisseur e derrière un des trous. Il se crée alors une différence de marche supplémentaire entre les rayons $\delta = (n - 1)e$ et cela fait défiler les franges. En comptant le nombre N de franges qui défilent, on compte la différence de marche en nombre de fois la longueur d'onde, et on a $N\lambda = (n - 1)e$. Si on connaît e , on peut en déduire l'indice n .

4.2.2 Miroirs de Fresnel

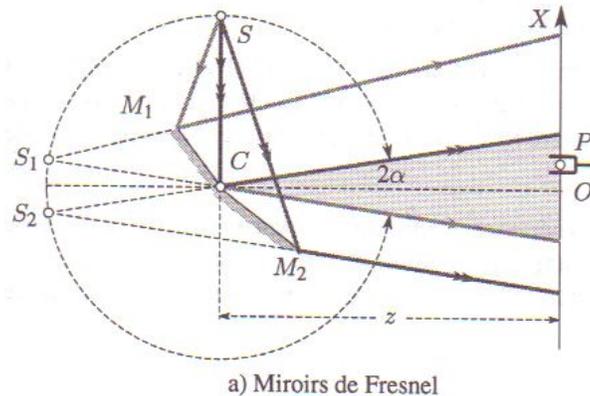


Figure 3: Deux miroirs plans faisant entre eux un angle α sont éclairés par une source ponctuelle S. Les images de S par chacun des deux miroirs forment les deux sources secondaires (ces images sont les symétriques de S par rapport au plan du miroir correspondant).

La source primaire S, ainsi que les sources secondaires S_1 et S_2 , se trouvent sur un cercle de centre le point d'intersection des deux miroirs. Si on appelle d la distance entre S et ce point d'intersection, la distance $a = S_1 S_2$ vaut $a = 2\alpha d$, car si on tourne un miroir de α , l'image par ce miroir tourne de 2α et donc l'angle entre S_1 et S_2 par rapport au point d'intersection des miroirs est 2α . Si on observe les franges à une distance D du point d'intersection, la distance entre les sources et le point d'observation est $d + D$. L'interfrange est $i = \lambda(D + d)/(2\alpha d)$ et le champ d'interférences (largeur de la zone où il y a des franges) est $L = 2\alpha D$. On voit que plus α est petit et plus l'interfrange est grand, mais plus la zone d'interférence est étroite. Donc si α est petit, on voit des franges larges, mais peu nombreuses. En augmentant l'angle entre les miroirs, on diminue l'interfranges mais on augmente le nombre de franges et la taille de la zone où elles se trouvent.

Ce montage présente un intérêt historique car il a permis à Fresnel de mesurer l'ordre de

grandeur d'une longueur d'onde optique. Il a également un intérêt pédagogique car il permet d'obtenir facilement des franges d'interférences.

4.2.3 Biprisme de Fresnel

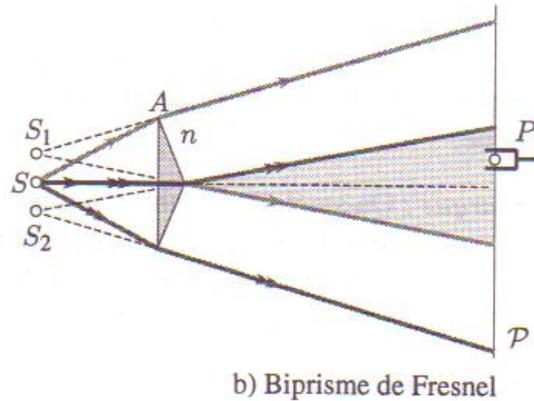


Figure 4: La source primaire S se trouve à hauteur de l'arête du biprisme. Les sources secondaires S_1 et S_2 se trouvent dans un plan parallèle à la face d'entrée du biprisme et passant par S . On trouve leur position en déterminant les deux rayons sortant du biprisme à partir d'un rayon issu de S passant par l'arête du biprisme. Ce rayon subit deux réfractions dans deux directions différentes, une fois par la face de sortie supérieure, et une fois par la face de sortie inférieure. Les points d'intersection de ces rayons avec la parallèle à la face d'entrée passant par S sont les sources secondaires.

Un prisme de petit angle au sommet A et d'indice n dévie le rayon incident d'un angle $\alpha = (n - 1)A$. Si d est la distance entre S et le biprisme, la distance entre S et une source secondaire est $d\alpha$. On en déduit la distance entre les deux sources secondaires $a = 2d\alpha = 2d(n - 1)A$. Si on observe les franges à une distance D du biprisme, la distance entre les sources et le point d'observation est $D + d$. L'interfrange est $i = \lambda(D + d)/(2d(n - 1)A)$.

4.3 Dispositifs à division d'amplitude

Dans ces dispositifs, on obtient deux faisceaux lumineux qui interfèrent à partir d'un seul faisceau issu de la source primaire, en utilisant une lame séparatrice.

Ces dispositifs sont très utilisés dans la pratique et ont une grande importance tant en recherche fondamentale que dans les applications industrielles (exemple : le microscope interférentiel).

Le principe de ces dispositifs est illustré par deux montages importants : l'interféromètre de Michelson et l'interféromètre de Mach-Zehnder.

4.3.1 Interféromètre de Michelson

Lorsque les miroirs sont perpendiculaires, on observe des anneaux.

Cet interféromètre est souvent utilisé avec une source non pas ponctuelle, mais étendue, ce qui permet d'observer des franges contrastées avec un bon confort lumineux. Ceci n'est pas possible avec un dispositif à division du front d'onde.

Les applications de cet interféromètre sont diverses, de la vélocimétrie Doppler à la détection d'ondes gravitationnelles en passant par les mesures de longueurs d'onde ou de faibles épaisseurs.

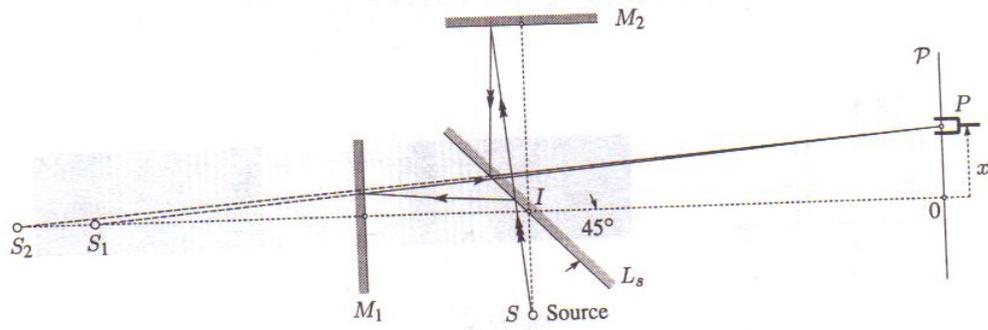


Figure 5: Interféromètre de Michelson

L'onde véhiculée par le rayon SI tombe sur une lame séparatrice L_s , semi argentée et inclinée à 45° , qui la sépare en deux bras perpendiculaires (Fig. 22.9). Son amplitude est divisée en deux : une partie de l'onde se réfléchit successivement sur L_s et sur le miroir M_1 puis traverse L_s ; l'autre traverse d'abord L_s puis se réfléchit successivement sur le miroir M_2 et sur L_s . Dans un plan \mathcal{P} perpendiculaire à l'axe défini par les deux images S_1 et S_2 de S , on observe des sections circulaires des hyperboloïdes de révolution.

4.3.2 Interféromètre de Mach-Zehnder

Voir TP 5 sur cet interféromètre.