

Révisions : interférences à 2 ondes

1 Rappels sur les ondes lumineuses

Une onde lumineuse est constituée de champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} se propageant dans la direction \vec{u} et oscillant dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation.

Pour une onde plane monochromatique, on a $\vec{E}(x, t) = E_m \cos(\omega t - kx - \varphi)\vec{e}$, où E_m est l'amplitude du champ électrique, $\omega = 2\pi\nu$ la pulsation et ν la fréquence, $k = 2\pi/\lambda$ le vecteur d'onde avec λ la longueur d'onde. φ est une phase de l'onde et \vec{e} est le vecteur unitaire dans la direction du champ électrique : c'est la *polarisation* de l'onde.

La représentation complexe de \vec{E} est :

$$\underline{\vec{E}} = E_m e^{i\varphi} e^{ikx} e^{-i\omega t} \vec{e} \quad (1)$$

L'amplitude complexe de l'onde est :

$$\underline{E}_m = E_m e^{i\varphi} e^{ikx} \quad (2)$$

L'intensité de l'onde est proportionnelle à E_m^2 , c'est à dire à $|\underline{E}_m|^2$.

On peut donc décrire l'onde lumineuse uniquement à l'aide de son amplitude complexe. Nous allons voir que dans de nombreux cas, la connaissance de la polarisation n'est pas nécessaire. Cependant, elle intervient lors de la propagation dans les milieux anisotropes et sera vue en TP et en cours plus tard dans l'année.

2 Interférences à deux ondes

2.1 Cas de deux ondes de même amplitude

On considère deux ondes lumineuses de même amplitude a_0 , et de différence de phase φ . On peut écrire leurs amplitudes complexes $\underline{a}_1 = a_0$ et $\underline{a}_2 = a_0 e^{i\varphi}$. Calculons l'amplitude complexe et l'intensité résultant de la superposition de ces deux ondes :

2.2 Cas général

Pour deux ondes d'intensités différentes $I_1 = |a_1|^2$ et $I_2 = |a_2|^2$ et de différence de phase φ , on trouve une intensité résultante :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (3)$$

On voit qu'en général, l'intensité résultant des deux ondes n'est pas la somme de leurs intensités : il y a un troisième terme, appelé terme d'interférence entre les deux ondes. Il dépend des intensités des deux ondes et de leur différence de phase. *Il faut noter que ce résultat est valable lorsque les polarisations des deux ondes sont quasi-parallèles. Si les polarisations sont rigoureusement orthogonales entre-elles, il n'y a pas d'interférences.*

2.3 Cohérence mutuelle des deux ondes

Si la différence de phase φ entre les deux ondes varie rapidement dans le temps par rapport à la durée nécessaire à la détection de l'intensité lumineuse, le terme $\cos \varphi$ d'interférence varie lui aussi rapidement et est nul en moyenne.

Pour qu'il y ait interférence, la différence de phase entre les deux ondes ne doit pas varier dans le temps, ou alors beaucoup plus lentement que le temps de détection du détecteur.

Typiquement, la différence de phase varie en 10^{-8} s entre deux lasers. Le temps de détection de l'oeil est de 10^{-1} s et celui d'une photodiode de 10^{-5} s. **On ne peut donc pas faire interférer deux ondes provenant de deux sources différentes.** Une condition nécessaire pour observer des interférences est que les deux sources dépendent d'une même source primaire.

On y parvient en créant deux sources secondaires distinctes, images de la source primaire par un système optique. La différence de phase entre les deux ondes qui interfèrent ne dépend alors que la différence de chemin optique δ entre les deux chemins allant de la source primaire au point d'observation et passant par l'une ou l'autre des sources secondaires. δ est appelée aussi *différence de marche*. La relation entre la différence de phase φ et la différence de marche δ est :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta \quad (4)$$

L'ordre d'interférence est $p = \varphi/(2\pi) = \delta/\lambda$. Si il est entier, on se trouve sur une frange brillante ; si il est demi-entier, on se trouve sur une frange sombre.

3 Cohérence temporelle et cohérence spatiale

3.1 Description qualitative

Lorsque la source primaire, dont dépendent les sources secondaires, n'est pas monochromatique et / ou n'est pas ponctuelle, le contraste des interférences se dégrade : la différence d'intensité entre les franges sombres et claires diminue ; à la limite elle disparaît et on ne voit alors plus de franges.

En effet, si la lumière n'est pas monochromatique, chaque couleur va créer son propre système de franges. Ces systèmes vont se superposer, et certains seront lumineux là où d'autres seront sombres : le contraste diminue. Cependant, si la lumière est quasi-monochromatique, cet effet est faible. On dit alors que la source primaire est *temporellement cohérente*. De même, si la source est étendue, deux points de cette source vont se comporter comme deux sources ponctuelles avec des systèmes de franges décalés, qui vont se superposer et se brouiller l'un l'autre. Là encore, cet effet est négligeable si la source est faiblement étendue : on dit qu'elle est spatialement cohérente.

3.2 Cohérence temporelle

Une source de lumière n'est jamais parfaitement monochromatique. En général, la courbe représentant l'intensité émise en fonction de la fréquence est une courbe centrée sur la fréquence ν_0 et de largeur à mi-hauteur $\Delta\nu$.

On appelle durée de cohérence temporelle $\tau_C = 1/\Delta\nu$ et longueur de cohérence temporelle $L_C = c\tau_C = c/\Delta\nu$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Pour que le contraste des interférences soit bon, il faut $\delta \ll L_C$.

4 Systèmes interférentiels

4.1 Systèmes à division du front d'onde

L'intérêt de ces systèmes est principalement historique, à part pour les fentes d'Young. Voir cours de 1ère année.

4.2 Systèmes à division d'amplitude

Ils ont une grande importance pratique. Deux d'entre eux seront particulièrement étudiés : l'interféromètre de Michelson et l'interféromètre de Mach-Zehnder.

4.2.1 Interféromètre de Michelson

Voir présentation PowerPoint et la feuille distribuée en classe.

A retenir :

- Lorsque les miroirs sont parallèles, l'interféromètre se comporte comme une lame d'air. Avec une source étendue, il donne des franges circulaires localisées à l'infini ou dans le plan focal image d'une lentille de projection. La différence de marche entre les deux rayons réfléchis est $\delta = 2e \cos i$ où e est l'épaisseur de la lame d'air et i l'angle d'incidence. L'ordre d'interférence des anneaux au centre est plus élevé que celui de ceux sur la bords. Démonstration de l'expression de la différence de marche :

- Lorsque les miroirs sont parallèles et que leurs distances à la séparatrice sont égales, on se trouve au contact optique : les deux faces de la lame d'air se touchent. On observe alors une teinte plate (uniforme). Pour les interféromètres SOPRA, en lumière blanche on observe une teinte noire (grise en pratique). Dès qu'on s'éloigne du contact optique, des teintes plates colorées (teintes de Newton) apparaissent si la lumière est en incidence normale. Sinon, il y a des anneaux irisés entourés de blanc d'ordre supérieur (ça apparaît blanc, mais certaines longueurs d'onde sont absentes. Le spectre de cette lumière est cannelé car des raies noires y sont présentes.).
- Lorsque les miroirs sont au contact optique, mais non parallèles, ils forment un coin d'air. On observe des franges rectilignes, parallèles à l'arête du coin, localisées très près des miroirs.

4.2.2 Interféromètre de Mach-Zehnder

L'interféromètre de Mach-Zehnder (voir figure 1) est constitué de deux séparatrices et de deux miroirs plans. Les plans de ces quatre miroirs sont parallèles et leurs centres forment un rectangle.

La première séparatrice, (Sep_1) , divise l'onde incidente en deux. La première des ondes se réfléchit sur (Sep_1) puis sur (Mir_1) et traverse finalement (Sep_2) (qui joue en fait le rôle d'une glace mélangeuse) ; la deuxième onde traverse (Sep_1) , se réfléchit sur (Mir_2) puis sur (Sep_2) .

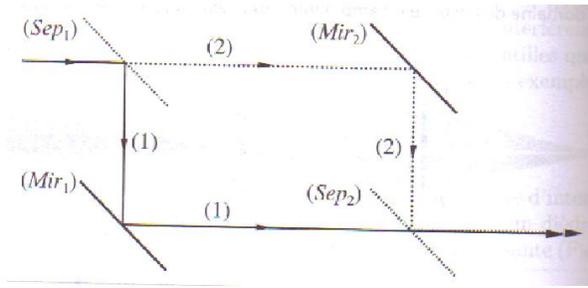


Figure 1: Interféromètre de Mach-Zehnder. Cet appareil comporte essentiellement deux miroirs totalement réfléchissants (Mir_1) et (Mir_2) et deux lames semi-réfléchissantes (Sep_1) et (Sep_2). Source : R. J. Champeau et al., *Ondes lumineuses*.

Les deux ondes sont ainsi superposées à la sortie de l'interféromètre. Il y a aussi une deuxième sortie pour laquelle l'onde (1) est réfléchié et l'onde (2) transmise par la mélangeuse.

Les deux ondes qui interfèrent sont bien séparées à l'intérieur de l'appareil, contrairement à l'interféromètre de Michelson. Ceci est utile dans certaines expériences, par exemple dans l'étude de l'écoulement de l'air autour d'un objet solide (maquette de voiture ou d'avion).