

## *Les fentes d'Young*

### **Introduction :**

Thomas Young, né en 1773 et mort en 1829, est renommé pour ses contributions en optique, notamment grâce à l'expérience d'interférences dite des « fentes d'Young » qu'il réalise en 1801.

Cette expérience consiste à faire passer un faisceau lumineux issu d'une source unique à travers deux fines fentes, percées dans un plan opaque.

La répartition de l'intensité lumineuse, obtenue sur un écran situé au-delà des deux fentes met clairement en évidence le caractère ondulatoire de la lumière.

L'expérience des fentes d'Young a été revisitée au 20<sup>ème</sup> siècle et a joué un rôle important dans les discussions sur les fondements de la mécanique quantique. C'est ainsi que la dualité onde – corpuscule a pu être mise en évidence par des expériences réalisées avec des photons arrivant un par un sur le dispositif interférentiel mais aussi par l'obtention d'interférences à partir de faisceaux de particules de matière, comme des électrons et même du fullerène C<sub>60</sub>.

Nous allons, dans cette vidéo de la collection « la physique animée » consacrée aux interférences lumineuses, présenter, d'un point de vue théorique et expérimental, l'expérience des fentes d'Young qui sera réalisée en lumière monochromatique et en lumière blanche.

### ***Présentation de l'expérience :***

Imaginons l'expérience des fentes d'Young réalisée, non pas avec une source lumineuse, mais avec une bombe de peinture : mis à part quelques impacts aléatoires dus aux bords des fentes, on obtient une répartition des gouttelettes de peinture sur l'écran dans la ligne droite des deux fentes.

Cette répartition correspond à celle qu'on aurait eu en ajoutant les répartitions obtenues en ne gardant à chaque fois qu'une seule fente ouverte.

En est-il de même pour la lumière ?

Remplaçons la bombe de peinture par un laser rouge et commençons par faire passer la lumière à travers une seule fente. On observe une tâche de diffraction semblable à la tâche de peinture précédente.

Ouvrons les deux fentes :

on observe une succession de bandes claires et sombres pratiquement assimilables à des droites : la lumière ne se comporte vraiment pas comme des gouttelettes de peinture !

La diffraction au niveau des fentes transforme l'onde incidente en deux ondes synchrones qui vont se superposer sur l'écran et conduire à une figure d'interférences. Le phénomène est le même que celui que nous avons observé dans la vidéo de la collection « La physique animée » consacrée aux interférences acoustiques.

Les temps mis par la lumière pour aller de  $S_1$  à M et de  $S_2$  à M sont différents. Si les ondes arrivent en phase au point M, on observera un maximum de lumière.

Par contre, si les ondes arrivent en opposition de phase, on observera sur l'écran de l'obscurité : de la lumière ajoutée à de la lumière conduira à de l'obscurité !

On peut ainsi dire que l'expérience des fentes d'Young met en évidence le caractère ondulatoire de la lumière, même si l'on sait, depuis l'avènement de la mécanique quantique, que la lumière admet aussi un caractère corpusculaire.

### Théorie :

Mais pourquoi obtient-on à l'écran une figure statique, qui ne varie pas dans le temps mais uniquement dans l'espace, alors que les champs électrique et magnétique associés au laser rouge évoluent à la période  $T \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ s}$ .

Les récepteurs optiques (comme l'œil, une photodiode, une photorésistance, ...) ont des temps de réponse bien trop grands par rapport à cette période : ils ne seront sensibles qu'à la valeur moyenne de la puissance lumineuse qu'ils reçoivent et, en un point donné, l'éclairement sera donc constant mais dépendra du point où l'on se place.

Le calcul du déphasage  $\varphi$  entre les deux rayons qui interfèrent au point M est semblable à celui effectué dans la vidéo de la collection « La physique animée » consacrée aux interférences acoustiques.

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{ax}{D}$$

a est de l'ordre de la centaine de micromètres, x de quelques millimètres et D dépasse le mètre.

Les franges lumineuses sont obtenues quand les deux rayons sont en phase, soit un déphasage multiple de  $2\pi$  :

$$\varphi = 2\pi p$$

où p, entier relatif, est l'ordre d'interférences.

Les franges sont des droites d'équation :

$$x_p = p \frac{\lambda_0 D}{a}$$

parallèles à l'axe (Oy).

En  $x = 0$ , la différence de marche est nulle : on obtient l'ordre zéro, correspondant à la frange centrale (qui est lumineuse).

L'interfrange représente la distance entre deux franges lumineuses successives.

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

C'est également la distance entre deux franges sombres successives.

L'interfrange augmente avec la longueur d'onde : il est plus faible pour le vert que pour le rouge et diminue quand la distance entre les fentes augmente.

Une onde lumineuse est composée d'un vecteur champ électrique et d'un vecteur champ magnétique se propageant à la vitesse  $c \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$  dans le vide.

Pour une onde plane dans le vide, ces deux vecteurs sont perpendiculaires entre eux tout en étant perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde, que l'on peut prendre par exemple selon l'axe (Oz).

Pour une lumière non polarisée, les coordonnées du champ électrique selon les axes (Ox) et (Oy), perpendiculaires à la direction de propagation (Oz), sont équivalentes.

On appelle vibration lumineuse  $s(M,t)$  l'une de ces coordonnées.

Dans le cas très fréquent d'ondes non polarisées dont les directions de propagation sont voisines, l'intensité lumineuse, due à la superposition de plusieurs ondes, sera déterminée au moyen de ce modèle scalaire de la lumière, où le champ électrique est associé cette grandeur scalaire  $s(M,t)$ .

On se ramène ainsi à un formalisme identique à celui déjà utilisé pour les ondes acoustiques, pour lesquelles nous avons déjà évoqué les mêmes phénomènes d'interférences et de diffraction dans la vidéo de la collection « La physique animée » consacrée aux interférences acoustiques.

On va évaluer l'intensité lumineuse en un point M de l'écran.

Les amplitudes des ondes lumineuses arrivant au point M s'écrivent :

$$s_1(M,t) = A_0 \cos(\omega t) \quad ; \quad s_2(M,t) = A_0 \cos(\omega t - \varphi(M))$$

En supposant que les 2 ondes diffractées, de pulsation  $\omega$ , ont la même amplitude  $A_0$  et où  $\varphi(M)$  désigne le déphasage du rayon (2) par rapport au rayon (1).

L'onde résultante au point M est la somme des deux amplitudes :

$$s(M, t) = s_1(M, t) + s_2(M, t) = A_0 \cos(\omega t) + A_0 \cos(\omega t - \varphi(M))$$

L'intensité lumineuse, liée au vecteur de Poynting de l'onde, est donnée par la valeur moyenne du carré de l'amplitude lumineuse :

$$I(M) = \langle s(M, t)^2 \rangle_t = \langle A_0 \cos(\omega t) + A_0 \cos(\omega t - \varphi(M)) \rangle^2$$

En notant :

$$\frac{1}{2} k A_0^2$$

L'intensité  $I_0$  correspondant à une seule onde, on obtient la formule de Fresnel :

$$I(M) = 2I_0 (1 + \cos(\varphi(M)))$$

qui donne l'intensité au point M en fonction du déphasage des deux rayons.

La diffraction apparaît comme une limite à l'observation des franges d'interférences.

En effet, une fente fine de largeur  $b$  diffracte la lumière selon une ouverture angulaire  $\theta \approx \frac{\lambda_0}{b}$ , formant, sur l'écran, une tâche lumineuse de taille limitée, de largeur  $l \approx 2\theta D \approx 2 \frac{\lambda_0 D}{b}$ .

On observe seulement les franges comprises dans la tache centrale de diffraction.

Le nombre de franges observées dans cette tache centrale peut être évaluée :

$$N = \frac{\text{Largeur de la tâche centrale de diffraction}}{\text{interfrange}} = \frac{2l}{i} = \frac{2 \frac{\lambda_0 D}{b}}{\frac{\lambda_0 D}{a}} = 2 \frac{a}{b}$$

Typiquement, pour le vert, si  $a = 0,5$  mm et  $b = 0,07$  mm, 14 franges d'interférences sont visibles à l'intérieur de la tache centrale de diffraction.

Remplaçons le laser par une source de lumière blanche et introduisons, dans le montage, une fente source verticale qui permet de limiter l'extension spatiale de cette source.

Pour une meilleure visualisation, on projète la figure d'interférences sur un capteur CCD couleur en guise d'écran.

On observe une frange blanche au centre de l'écran et, en s'éloignant du centre, les couleurs commencent à se séparer : on obtient des irisations appelées teintes de Newton.

La lumière blanche possède un spectre continu, contenant toutes les longueurs d'onde du visible, du violet au rouge.

Comme il n'y a pas d'interférences entre des sources de fréquences différentes, on obtient sur l'écran la superposition des intensités lumineuses correspondant aux différentes longueurs d'onde.

Au centre de la figure d'interférences, toutes les longueurs d'onde se superposent en phase et reconstituent la lumière blanche de la source.

Une autre limitation expérimentale concerne la largeur de la fente source : plus celle-ci est grande et plus le contraste des franges (c'est-à-dire la différence d'intensité entre les franges claires et les franges sombres) est faible.

Des figures de moirés résultent d'interférences spatiales entre des réseaux de points périodiques. La vidéo de la collection « La physique animée » consacrée aux moirés en propose de nombreux exemples.

La figure d'interférences spatiales obtenue notamment avec deux peignes inclinés est comparable à celle observée dans l'expérience des fentes d'Young.