

# Interférences et diffraction de la lumière

## Objectifs

1. Étude du phénomène de diffraction de la lumière ; mesure de la longueur d'onde d'une source monochromatique.
2. Étude du phénomène d'interférence entre deux ondes lumineuses (dans le cadre de l'expérience de Young) ; mesure de la distance séparant deux fentes rectangulaires.
3. Étude du principe de Babinet. Mesure de l'épaisseur d'un cheveu humain.

## Théorie

Dans l'histoire de la physique, la nature de la lumière a longtemps été un sujet de débats et controverses. Est-elle un flux de particules comme le pensaient *Descartes* et *Newton* au XVII<sup>e</sup> siècle, ou plutôt une perturbation d'un milieu qui se propage (*i.e.* une onde), comme le soutenait *Huygens*? Au XIX<sup>e</sup> siècle, le scientifique anglais *Thomas Young* a conçu une expérience sur la lumière mettant en évidence une caractéristique typique des ondes : le phénomène d'interférence. Cette expérience a dès lors constitué un argument fort en faveur de la nature ondulatoire de la lumière.

## Interférences

Lorsque plusieurs ondes de même nature (*i.e.* toutes mécaniques, ou toutes électromagnétiques) se chevauchent dans une région donnée (telles des vagues à la surface de l'eau provenant de deux sources différentes), on dit qu'elles se *superposent*. De cette superposition résulte une fonction d'onde  $y_{\text{tot}}$  qui est la somme de toutes les fonctions d'onde  $y_1, y_2, \dots, y_N$  des  $N$  ondes qui se chevauchent. Dans le cas où les  $y_k$  sont toutes selon un même axe (c'est-à-dire selon une même direction), on dit que les ondes *interfèrent* entre elles (ou aussi qu'il y a *interférence* entre les ondes).

- Deux ondes, qui se chevauchent en un point, produisent une *interférence constructive* en ce point si leur fonction d'onde  $y_1$  et  $y_2$  sont selon une même direction et ont le même signe.
- Deux ondes, qui se chevauchent en un point, produisent une *interférence destructive* en ce point si leur fonction d'onde  $y_1$  et  $y_2$  sont selon une même direction, mais ont des signes opposés.

Persuadé du fait que la lumière était de nature ondulatoire, Young est parvenu à le montrer par le biais d'interférences lumineuses. Le dispositif de l'expérience qu'il a conçu est essentiellement composé d'un masque muni de deux fentes rectangulaires  $S_1$  et  $S_2$ , parallèles et séparées par une distance  $d$ , ainsi que d'un écran parallèle au masque et placé à une distance  $L$  des fentes. Lorsque des rayons provenant d'une source lumineuse cohérente (produisant des ondes périodiques de mêmes longueurs d'onde, de mêmes fréquences et mêmes phases) frappent les

fentes du masque, chacune d'elle devient, selon le *principe de Huygens*, une source secondaire d'ondes. Dans un plan perpendiculaire au masque (et à l'écran) et contenant les le centre de chacune des fentes (*i.e.* dans le plan de la feuille dans le schéma ci-dessous), les sources secondaires émettent dans toutes les directions vers l'avant.

- En tout point  $P$  de l'écran pour lequel la différence de distance  $\delta = \overline{S_2P} - \overline{S_1P}$  (appelée différence de marche) correspond à un nombre entier de longueurs d'ondes  $\lambda$  des ondes émises, il y a interférence constructive entre l'onde provenant de  $S_1$  et celle issue de  $S_2$  (du fait que les crêtes arrivent en même temps, les creux aussi), et on y observe donc une frange lumineuse.
- En tout point  $P$  de l'écran pour lequel la différence de distance  $\delta = \overline{S_2P} - \overline{S_1P}$  correspond à un nombre entier et une demie de longueurs d'ondes  $\lambda$  des ondes émises, il y a interférence destructive entre l'onde provenant de  $S_1$  et celle issue de  $S_2$  (du fait que les creux de l'une arrive en même temps que les crêtes de l'autre, et *vice versa*), et on y observe donc une frange sombre.

En conséquence, on relève sur l'écran une alternance de franges claires et sombres. Leur position  $y$  par rapport au centre  $C$  de l'écran peut être reliée de façon simple à la différence de marche  $\delta$  pour autant que certaines conditions soient satisfaites. Si la distance  $d$  entre les fentes  $S_1$  et  $S_2$  est beaucoup plus petite que la distance  $L$  entre les fentes et l'écran (*i.e.* si  $d \ll L$ ), alors les rayons provenant de  $S_1$  et  $S_2$  et arrivant en  $P$  peuvent être considérés comme parallèles. De fait, en considérant l'angle  $\theta$  comme indiqué sur la figure (appelé angle de déviation), la différence de marche s'écrit :

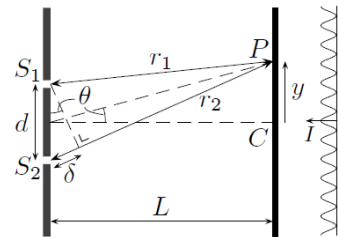
$$\delta = d \sin \theta .$$

Selon ce qui a été évoqué précédemment,  $\delta$  doit valoir un nombre entier de longueurs d'onde dans le cas d'une frange brillante. La position  $y$  d'une telle frange doit donc obéir aux équations suivantes :

$$\delta = d \sin \theta = m \lambda \quad \text{et} \quad \tan \theta = \frac{y}{L} ,$$

où  $m$  est un nombre entier pouvant servir à indexer les franges brillantes ( $m = 0$  correspond à la frange brillante centrale,  $m = 1$  à la première frange brillante depuis la frange centrale, ...). Si  $d \ll L$ , comme supposé ici, l'angle  $\theta$  est très petit, si bien que  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ . Ainsi :

$$d \frac{y}{L} \cong m \lambda \quad \Rightarrow \quad \boxed{y \cong \frac{\lambda L}{d} m} . \quad (1)$$



## Diffraction

Indépendamment des travaux de Young, le scientifique français *Augustin Fresnel* a réalisé une série d'expériences sur la lumière et élaboré une théorie mathématique sur les interférences et la diffraction. Ses travaux ont notamment permis d'expliquer pourquoi, lorsque dans le dispositif de l'expérience de Young, on remplace le masque à deux fentes par un masque à une seule fente, de largeur  $a$ , on observe également sur l'écran une alternance de franges

claires et sombres. Un tel phénomène peut être compris en appliquant le principe de Huygens à la fente : chacun de ses points peut être considéré comme une source d'ondes sphériques qui interfèrent entre elles ; dans les directions  $\theta$  (dans le plan perpendiculaire à la fente et passant par son centre) obéissant à l'équation

$$a \sin \theta = m \lambda, \quad \text{où } m \in \mathbb{Z}^*,$$

il y a interférence destructive (les ondes sphériques s'annulent deux à deux), ce qui se traduit par la présence de franges sombres aux positions  $y = L \tan \theta$  sur un écran placé à une distance  $L$  de la fente. Dans l'approximation des petits angles, la position  $y$  de la  $m^{\text{ème}}$  frange sombre (par rapport au centre  $C$  de l'écran) satisfait donc la relation :

$$\boxed{y = L \tan \theta \cong \frac{\lambda L}{a} m} . \quad (2)$$

Cette expression est très similaire à celle de l'expérience de Young mais les valeurs de  $y$  correspondent aux positions de franges **sombres** et non lumineuses ! Il est également important de relever que le centre de l'écran est occupé par une frange brillante (maximum central) et non une frange sombre (l'interférence étant constructive en  $C$ ), ce qui justifie le fait que  $m \in \mathbb{Z}^*$  et en particulier que  $m = 0$  n'est pas possible.

## Principe de Babinet

L'expérience montre que la figure de diffraction obtenue sur un écran lorsqu'un faisceau de lumière monochromatique tombe sur une fente de largeur  $a$  est la même que celle obtenue lorsque le même type de faisceau frappe un obstacle de taille  $a$ . Un tel résultat, connu sous le nom de *principe de Babinet* (et dû au scientifique français *Jacques Babinet*), peut être déduit du principe de Huygens :

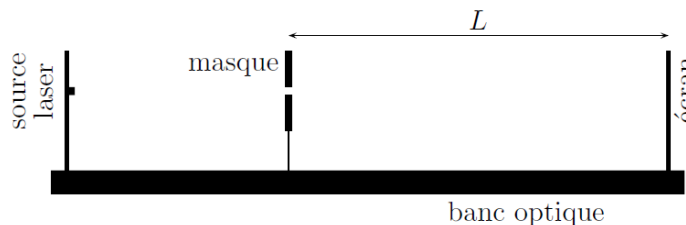
- dans la première situation, c'est chaque point de la fente qui devient source d'ondes sphériques secondaires ;
- dans la seconde situation, c'est chaque point de part et d'autre de l'obstacle qui devient source d'ondes sphériques secondaires.

Dans les deux cas, les ondes sphériques secondaires interfèrent entre elles et produisent une image de diffraction sur un écran. En outre, une étude plus approfondie révèle que l'espace entre les franges sombres est le même dans les deux situations. L'équation 2 s'applique donc également dans le cas d'un obstacle d'épaisseur  $a$  (comme par exemple un cheveu humain).

# Manipulations et mesures

## Matériel

- 1 banc optique gradué
- 1 source laser
- 1 écran
- 1 règle
- 1 set de masques à fentes simples avec support
- 1 set de masques à fentes doubles avec support



## Mode opératoire

Placer la source laser et l'écran à chacune des deux extrémités du banc optique. Placer le masque entre la source et l'écran, de sorte que la distance  $L$  soit suffisamment grand. Relever la valeur de  $L$  ; afin de ne pas multiplier les mesures, on veillera à ce que la valeur de  $L$  reste la même tout au long de l'expérience.

### I. Diffraction par une fente simple :

1. Placer le masque à fentes simples entre la source et l'écran, de sorte que la distance jusqu'à l'écran vaille  $L$ . Sélectionner une fente rectangulaire de largeur  $a = 0,16$  mm.
2. À l'aide d'une règle, relever la position des huit premières franges **sombres**, par rapport à la frange brillante centrale ( $m \in \{1; 2; \dots; 8\}$ ) et reporter les valeurs (avec les incertitudes correspondantes) dans un tableau.
3. Introduire les huit couples  $(m; y)$  dans le logiciel *LoggerPro* et les représenter (avec les incertitudes correspondantes) sur un graphique. Vérifier que les points sont plus ou moins alignés selon une droite. Tracer la droite de régression linéaire et donner la valeur de la pente (avec son incertitude statistique). En déduire la longueur d'onde  $\lambda$  de la source (en prenant la valeur de  $a$  indiquée par le fabricant). La longueur d'onde obtenue correspond-elle, aux incertitudes près, à celle donnée par le fabricant ? Commenter.
4. Sélectionner la fente d'épaisseur variable. Observer que plus  $a$  est grand (respectivement petit), plus la distance entre les franges sombres est petite (respectivement grande).

### II. Diffraction par une fente double (expérience de Young) :

1. Placer le masque à fentes doubles entre la source et l'écran, de sorte que la distance jusqu'à l'écran vaille  $L$ . Sélectionner une fente double dont la distance entre les ouvertures vaut  $d = 0,25$  mm.

2. À l'aide d'une règle, relever la position des huit premières franges **brillantes**, par rapport à la frange brillante centrale, sans la compter ( $m \in \{1; 2; \dots; 8\}$ ), et reporter les valeurs (avec les incertitudes correspondantes) dans un tableau.
3. Introduire les huit couples  $(m; y)$  dans le logiciel *LoggerPro* et les représenter (avec les incertitudes correspondantes) sur un graphique. Vérifier que les points sont plus ou moins alignés selon une droite. Tracer la droite de régression linéaire et donner la valeur de la pente (avec son incertitude statistique). En déduire la distance  $d$  entre les deux ouvertures (en prenant la valeur de  $\lambda$  obtenue à l'expérience précédente). La distance obtenue correspond-elle, aux incertitudes près, à celle donnée par le fabricant ? Commenter.
4. Sélectionner la double fente dont la distance  $d$  entre les deux ouvertures est variable. Observer que plus  $d$  est grand (respectivement petit), plus la distance entre les franges brillantes est petite (respectivement grande).

### III. Diffraction par un cheveu :

1. Placer entre la source et l'écran un statif sur lequel a été fixé au préalable un cheveu (issu de l'arsenal personnel), de sorte que la distance jusqu'à l'écran vaille toujours  $L$ .
2. À l'aide d'une règle, relever la position des cinq premières franges **sombres**, par rapport la frange brillante centrale ( $m \in \{1; 2; \dots; 5\}$ ), et reporter les valeurs (avec les incertitudes correspondantes) dans un tableau.
3. Introduire les cinq couples  $(m; y)$  dans le logiciel *LoggerPro* et les représenter (avec les incertitudes correspondantes) sur un graphique. Vérifier que les points sont plus ou moins alignés selon une droite. Tracer la droite de régression linéaire et donner la valeur de la pente (avec son incertitude statistique). En déduire l'épaisseur  $a$  du cheveu utilisé (en prenant la valeur de  $\lambda$  obtenue à l'expérience précédente). On admet que l'épaisseur des cheveux humains est comprise entre 0,04 mm et 0,1 mm. Le cheveu utilisé dans l'expérience est-il plutôt fin ou épais ? Commenter.

### Remarques :

1. Les mesures et résultats doivent être présentés de manière appropriée (tableaux, graphiques, ...).
2. Le choix des incertitudes sur les mesures doit être justifié.
3. Les résultats doivent être discutés ; la conclusion en dépend.
4. Ne pas oublier d'arrondir correctement la valeur de chaque résultat et d'y associer l'unité appropriée.

## À rendre

Compte rendu rédigé dans le cahier de laboratoire.