

THÈME 4

ONDES ET SIGNAUX

Pierre-André LABOLLE

Lycée International des Pontonniers de Strasbourg

Septembre 2020

CHAPITRE 3 : DIFFRACTION ET INTERFÉRENCES

I. Diffraction des ondes

1. Onde diaphragmée, onde diffractée
2. Diffraction des ondes lumineuses
3. Conséquences concrètes

II. Interférences

1. Quand les ondes se rencontrent
2. Cas des ondes sinusoïdales
3. Conditions d'interférences
4. Différence de marche

III. Interférences d'ondes lumineuses

1. Trous d'Young et champ d'interférences
2. Différence de chemin optique et conditions d'interférences
3. Interfrange
4. Conséquences concrètes

I. Diffraction des ondes

1. Onde diaphragmée, onde diffractée

- Mise en évidence du phénomène sur la cuve à ondes (schémas).
- Soient a la dimension caractéristique d'un obstacle ou d'une ouverture et λ la longueur d'onde de l'onde considérée. Deux cas de figure se présentent.
 - Soit la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture a est grande par rapport à la longueur d'onde ($a \gg \lambda$) et l'onde est simplement diaphragmée (elle a même fréquence, même longueur d'onde et même direction de propagation avant et après l'obstacle).
 - Soit la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture a est petite par rapport à la longueur d'onde ($a \lesssim \lambda$) et l'onde est diffractée (elle a même fréquence, même longueur d'onde mais on assiste à un éparpillement des directions de propagation après l'obstacle).
- Remarque : plus la dimension a de l'obstacle ou de l'ouverture est petite, plus le phénomène de diffraction est marqué.

I. Diffraction des ondes

1. Onde diaphragmée, onde diffractée

Définition du phénomène de diffraction

La diffraction est une propriété caractéristique des ondes qui se manifeste par un étalement des directions de propagation de l'onde lorsque celle-ci rencontre un obstacle ou une ouverture de petite dimension devant la longueur d'onde ($a \lesssim \lambda$).

Plus la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture est petite, plus la diffraction est prononcée.

I. Diffraction des ondes

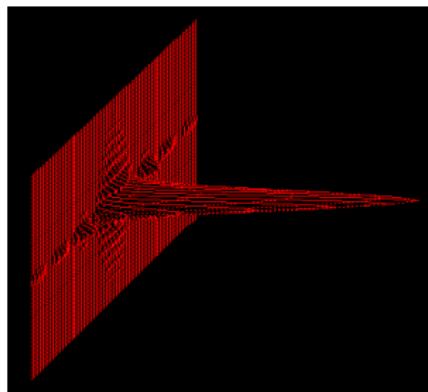
2. Diffraction des ondes lumineuses

- Dans le cas des ondes lumineuses, la diffraction peut encore être observée avec des obstacles ou des ouvertures dont la dimension peut atteindre jusqu'à 100 fois la longueur d'onde.
- On définit l'écart angulaire de diffraction θ comme l'angle sous lequel on voit, depuis l'obstacle, la demie tache centrale de diffraction (voir schéma).
- Dans le cas d'un obstacle ou d'une **ouverture rectangulaire** (fente ou fil par exemple), l'écart angulaire est tel que :
$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$
- Dans le cas d'un obstacle ou d'une ouverture circulaire (trou ou point par exemple), l'écart angulaire est tel que :
$$\theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{a}$$
- Remarque : en lumière blanche, la figure de diffraction présente une tache centrale blanche et des taches latérales de diffraction irisées.

I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

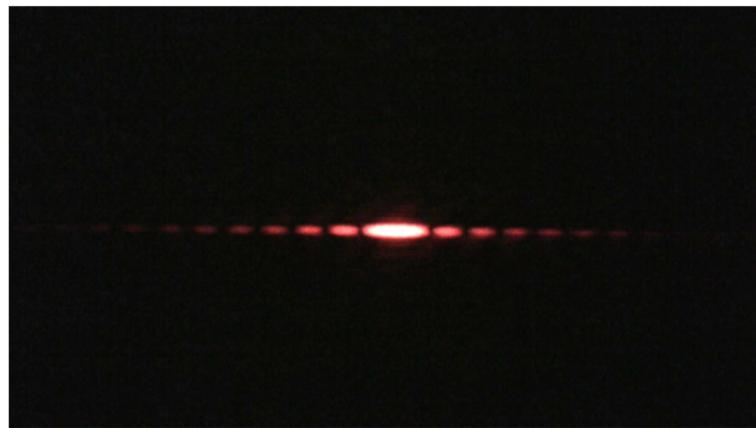
Répartition de l'intensité lumineuse dans une figure de diffraction par une fente éclairée en un point



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

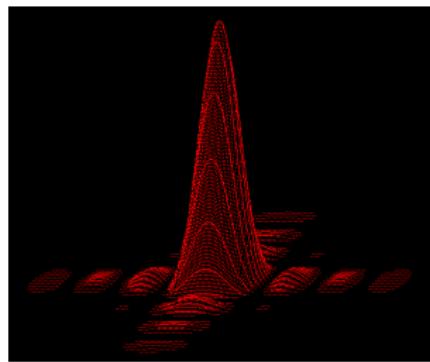
Figure de diffraction par une fente éclairée en un point



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

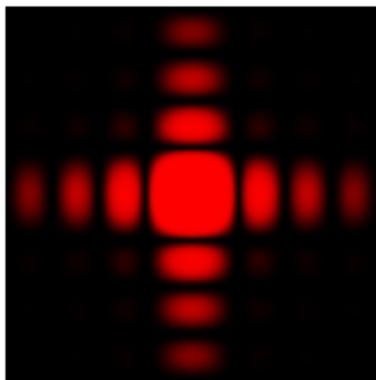
Répartition de l'intensité lumineuse dans une figure de diffraction par une ouverture carrée



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

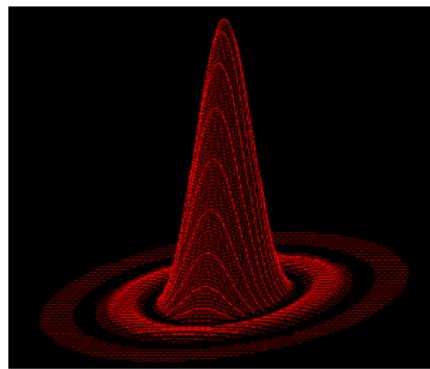
Figure de diffraction par une ouverture carrée



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

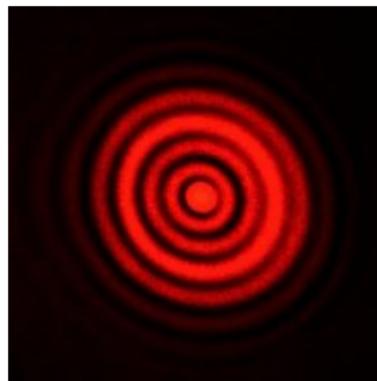
Répartition de l'intensité lumineuse dans une figure de diffraction par une ouverture circulaire



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

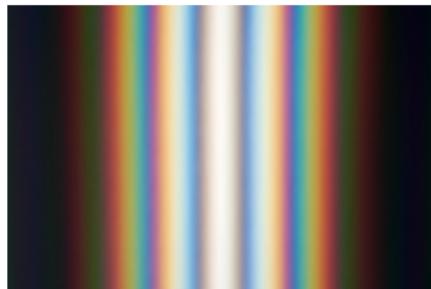
Figure de diffraction par une ouverture circulaire



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

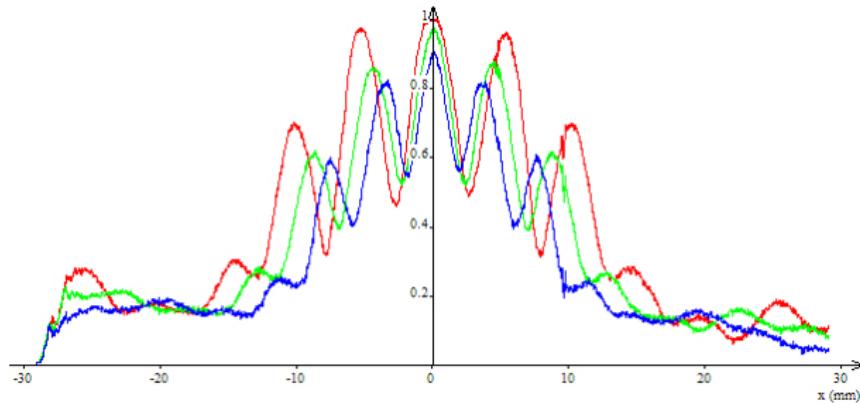
Figure de diffraction par une fente éclairée en lumière blanche



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

Répartition de l'intensité lumineuse dans une figure de diffraction par une fente éclairée en lumière blanche



I. Diffraction des ondes

3. Conséquences concrètes

- Sur les supports de stockage optique tels que le DVD ou le Blue-ray Disc, l'augmentation de la capacité de stockage nécessite de rapprocher les reliefs codant l'information et de resserrer les pistes. Or le faisceau laser servant à la lecture subit la diffraction par l'ouverture par laquelle il sort de la source laser. Cela limite la capacité de stockage en raison de la tache de diffraction sur le disque, tache qui ne doit pas recouvrir deux pistes simultanément. On cherche donc à utiliser une longueur d'onde la plus petite possible pour réduire la tache de diffraction.
- En astronomie, la monture des objectifs diffracte la lumière reçue : on cherche donc à augmenter le diamètre des lentilles et des miroirs afin de diminuer le phénomène de diffraction et d'améliorer la résolution des instruments d'observation astronomique.

II. Interférences

1. Quand les ondes se rencontrent...

- Au cours de leur propagation, il est possible qu'en un même point de l'espace, deux ondes se croisent.
- Lorsque deux ondes se rencontrent en un point de l'espace, la perturbation résultante en ce point est la somme des perturbations générées en ce point par chaque onde.
- On parle alors d'interférences au sens le plus général du terme ; l'étude sera ici limitée aux ondes monochromatiques.

II. Interférences

2. Cas des ondes sinusoïdales

- Dans le cadre de cette étude, on dira qu'il y a **interférence en un point du milieu matériel considéré si deux ondes de même fréquence se superposent en ce point**. Là aussi, la perturbation résultante est la somme des perturbations de chaque onde.
- En règle générale, deux ondes sinusoïdales présentent un déphasage (elles sont décalées dans le temps). Ce déphasage est le plus souvent aléatoire et ces conditions ne sont généralement pas très propices à l'observation des interférences.
- On utilisera donc des sources produisant des ondes monochromatiques qui présentent un déphasage constant. **On dit alors que ces deux sources sont cohérentes.**

II. Interférences

3. Conditions d'interférences

- Soient deux ondes monochromatiques, de même fréquence, produites par deux sources cohérentes S_1 et S_2 qui interfèrent (se superposent) en un point M de l'espace.
- L'onde produite par la source S_1 arrivera au point M avec un retard τ_1 constant et celle produite par la source S_2 avec un retard τ_2 constant lui aussi.
- Si les deux ondes arrivent en phase au point M (leur décalage temporel est donc un multiple entier de la période T de l'onde), alors les deux ondes vont se renforcer et l'amplitude de la perturbation résultante au point M sera maximale. **On dit qu'il y a interférences constructives.**
- Si, au contraire, les deux ondes arrivent en opposition de phase au point M (leur décalage temporel est donc un nombre entier impair de demi-périodes), alors les deux ondes vont s'annihiler et l'amplitude de la perturbation résultante au point M sera minimale. **On dit qu'il y a interférences destructives.**

II. Interférences

4. Différence de marche

- **Définition** : on appelle différence de marche, notée δ en un point M la différence entre les distances $d_1 = S_1 M$ et $d_2 = S_2 M$ (distances séparant le point M de chacune des sources). Autrement dit :

$$\delta = d_2 - d_1$$

- D'après ce qui précède, le décalage temporel entre les deux ondes au point M est donné par $\Delta t = \tau_2 - \tau_1$.
- **Cas des interférences constructives** : $\Delta t = \tau_2 - \tau_1 = k \cdot T = k \cdot \frac{\lambda}{v}$, v étant la célérité de l'onde. On a donc $v \cdot (\tau_2 - \tau_1) = k \cdot \lambda$ ou encore $v \cdot \tau_2 - v \cdot \tau_1 = k \cdot \lambda$ soit $d_2 - d_1 = k \cdot \lambda$ d'où $\delta = k \cdot \lambda$

II. Interférences

4. Différence de marche

- Cas des interférences destructives :

$$\Delta t = \tau_2 - \tau_1 = (2k + 1) \cdot \frac{T}{2} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot v}. \text{ On a donc}$$

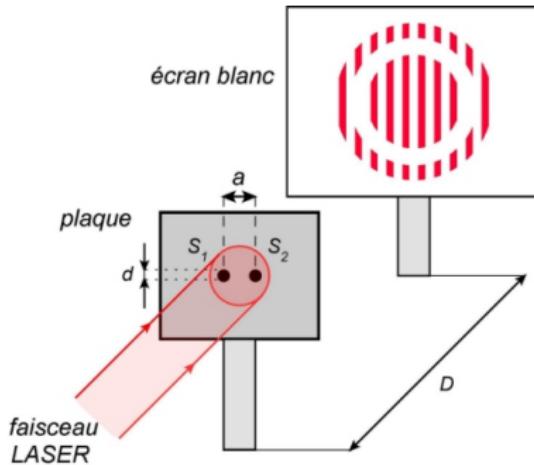
$$v \cdot (\tau_2 - \tau_1) = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ ou encore } v \cdot \tau_2 - v \cdot \tau_1 = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ soit}$$

$$d_2 - d_1 = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ d'où } \boxed{\delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}}$$

III. Interférences d'ondes lumineuses

1. Trous d'Young et champ d'interférences

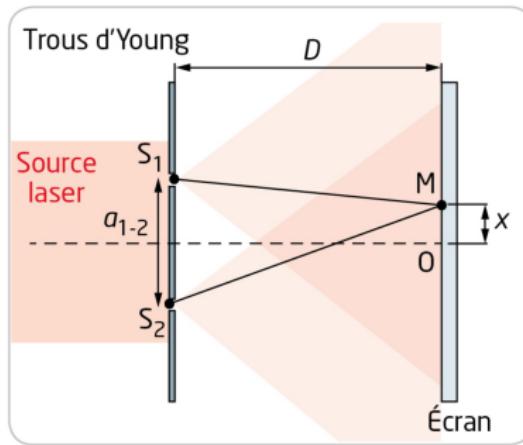
- Dispositif des trous d'Young :



III. Interférences d'ondes lumineuses

1. Trous d'Young et champ d'interférences

- Champ d'interférences : c'est l'endroit de l'espace où les ondes issues des deux sources se superposent et où l'on peut observer des interférences.
- Le champ d'interférences est donc la zone de l'espace où les deux figures de diffraction issues de chaque trou d'Young se superposent.



III. Interférences d'ondes lumineuses

2. Différence de chemin optique

- Comme dans le cas des ondes mécaniques, on retrouve les mêmes conditions d'interférences.
- On aura des interférences constructives si $\delta = k \times \lambda$ et des interférences destructives si $\delta = (2k + 1) \times \frac{\lambda}{2}$.
- Toutefois, pour la longueur d'onde des ondes lumineuses dépend de l'indice de réfraction n du milieu dans lequel elles se propagent. En effet, nous savons que $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

III. Interférences d'ondes lumineuses

2. Différence de chemin optique

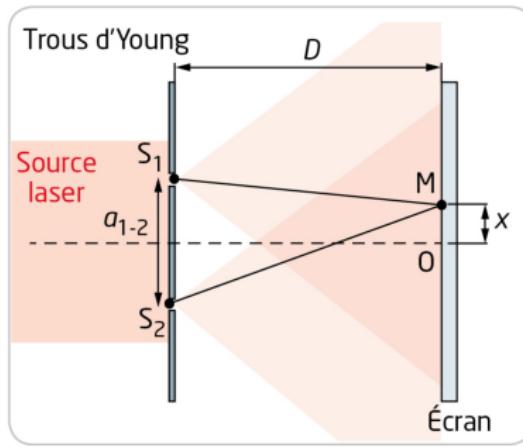
- Les conditions d'interférences deviennent $\delta = k \times \frac{\lambda_0}{n}$ pour les interférences constructives et $\delta = \frac{(2k+1)}{2} \times \frac{\lambda_0}{n}$ pour les interférences destructives.
- Ces relations peuvent aussi s'écrire $\delta = \frac{\delta_0}{n}$ où $\delta_0 = k \times \lambda_0$ pour les interférences constructives et $\delta_0 = \frac{(2k+1)}{2} \times \lambda_0$ pour les interférences destructives.
- **La différence de chemin optique est δ_0 . Elle est donc égale à la différence de marche multipliée par l'indice de réfraction du milieu :**

$$\boxed{\delta_0 = n \times \delta}$$

III. Interférences d'ondes lumineuses

3. Interfrange

- Pour une distance D entre les trous d'Young et l'écran est très grande par rapport à l'écartement a_{1-2} des trous et pour des distances x sur l'écran petites par rapport à D , on démontre que la différence de chemin optique s'exprime par la relation $\delta_0 = \frac{n \times a_{1-2} \times x}{D}$.



III. Interférences d'ondes lumineuses

3. Interfrange

- L'interfrange est la distance entre deux franges (sombres ou brillantes) sur l'écran.
- Sur l'écran, on trouve une frange brillante si $\delta_0 = k \times \lambda_0$ autrement dit, si $\frac{n \times a_{1-2} \times x_k}{D} = k \times \lambda_0$. Cela donne une frange brillante située sur l'écran à une distance $x_k = k \times \frac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}}$
- La frange brillante suivante se trouve à une distance x_{k+1} telle que $\frac{n \times a_{1-2} \times x_{k+1}}{D} = (k+1) \times \lambda_0$ soit $x_{k+1} = (k+1) \times \frac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}}$.

III. Interférences d'ondes lumineuses

3. Interfrange

- L'interfrange i étant égal à la distance entre deux franges brillantes consécutives, on a $i = x_{k+1} - x_k$
- Autrement dit, $i = (k+1) \times \frac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}} - k \times \frac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}} = \frac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}}$
- Pour résumer, $i = \frac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}} = \frac{\lambda \times D}{a_{1-2}}$

III. Interférences d'ondes lumineuses

4. Conséquences concrètes

- Les interférences lumineuses sont utilisées pour contrôler des épaisseurs dans l'industrie de pointe.
- On les utiliser également pour déterminer des indices de réfraction dans le domaine agroalimentaire notamment.
- Les interférences d'ondes électromagnétiques sont également utilisées dans les radiotélescopes afin de limiter la taille des coupoles tout en pouvant augmenter le pouvoir de résolution.
- NB : concernant les ondes sonores, on citer les casques anti-bruit comme exemple d'application des interférences.

EXERCICES CONSEILLÉS : PP427-439 n°11, 18, 20, 26

EXERCICES DIFFRACTION : PP427-439 n°36, 42

EXERCICES INTERFÉRENCES : PP427-439 n°21, 35, 39, 41