THÈME 4
ONDES ET SIGNAUX

Pierre-André LABOLLE

Lycée International des Pontonniers de Strasbourg

Septembre 2023

CHAPITRE 4.2 : DIFFRACTION ET INTERFÉRENCES

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 $(\boldsymbol{a \gg \lambda})$ 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 $(\boldsymbol{a \lesssim \lambda})$ 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 $(\boldsymbol{a} \lesssim \boldsymbol{\lambda})$.

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 : $\boxed{\theta = \dfrac{\lambda}{a}}$

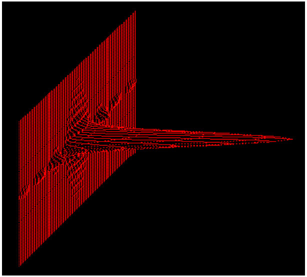
- Dans le cas d'un obstacle ou d'une ouverture circulaire (trou ou point par exemple), l'écart angulaire est tel que : $\boxed{\theta = 1,22 \cdot \dfrac{\lambda}{a}}$

- 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

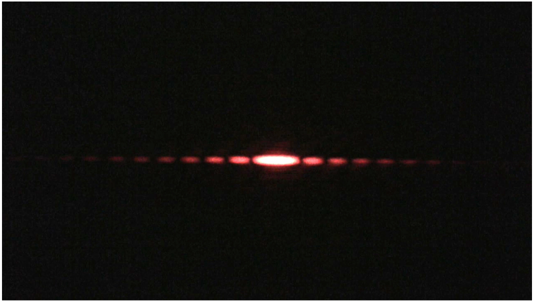
Répartition de l'intensité lumineuse dans une
figure de diffraction par une fente éclairée en un point



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

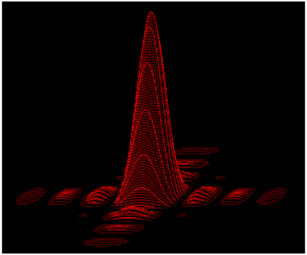
Figure de diffraction par une fente éclairée en un point



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

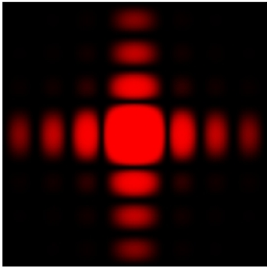
Répartition de l'intensité lumineuse dans une figure de diffraction par une ouverture carrée



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

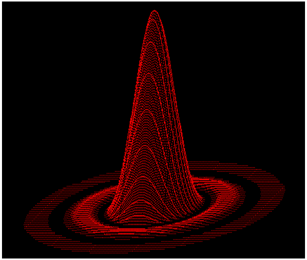
Figure de diffraction par une ouverture carrée



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

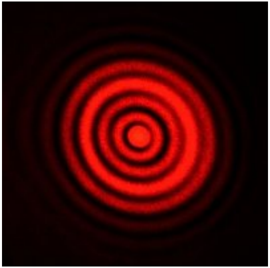
Répartition de l'intensité lumineuse dans une figure de diffraction par une ouverture circulaire



I. Diffraction des ondes

2. Diffraction des ondes lumineuses

Figure de diffraction par une ouverture circulaire



I. Diffraction des ondes

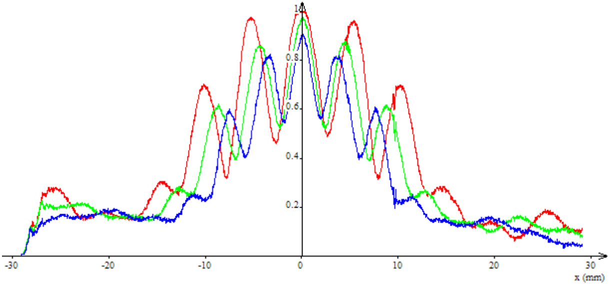
2. Diffraction des ondes lumineuses

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 chercher 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 $d_1 = S_1M$ et $d_2 = S_2M$ (distances séparant le point M de chacune des sources). Autrement dit : $\boxed{\delta = d_2 - d_1}$
- 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** : $\Delta t = \tau_2 - \tau_1 = k \cdot T = k \cdot \dfrac{\lambda}{v}$, 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 $\boxed{\delta = k \cdot \lambda}$

II. Interférences

4. Différence de marche

- **Cas des interférences destructives** :

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

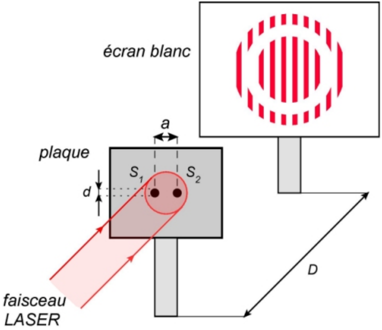
$v \cdot (\tau_2 - \tau_1) = (2k+1) \cdot \dfrac{\lambda}{2}$ ou encore $v \cdot \tau_2 - v \cdot \tau_1 = (2k+1) \cdot \dfrac{\lambda}{2}$ soit

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

III. Interférences d'ondes lumineuses

1. Trous d'Young et champ d'interférences

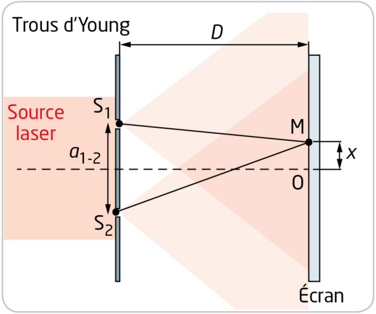
- Dispositif des trous d'Young :



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 $\delta = (2k+1) \times \dfrac{\lambda}{2}$.
- 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 $\lambda = \dfrac{\lambda_0}{n}$

III. Interférences d'ondes lumineuses

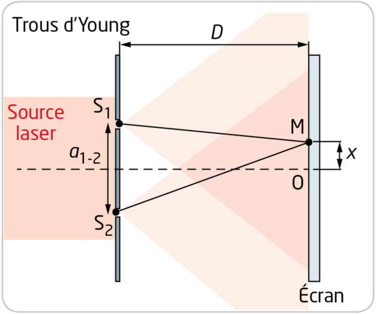
2. Différence de chemin optique

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

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 $\delta_0 = \dfrac{n \times a_{1-2} \times x}{D}$.



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 $\dfrac{n \times a_{1-2} \times x_k}{D} = k \times \lambda_0$. Cela donne une frange brillante située sur l'écran à une distance $x_k = k \times \dfrac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}}$
- La frange brillante suivante se trouve à une distance x_{k+1} telle que $\dfrac{n \times a_{1-2} \times x_{k+1}}{D} = (k+1) \times \lambda_0$ soit $x_{k+1} = (k+1) \times \dfrac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}}$.

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, $i = (k+1) \times \dfrac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}} - k \times \dfrac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}} = \dfrac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}}$
- Pour résumer, $i = \dfrac{\lambda_0 \times D}{n \times a_{1-2}} = \dfrac{\lambda \times D}{a_{1-2}}$

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

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P84 n°17

a. Dans le cas d'une fente, l'écart angulaire de diffraction est donné par la relation : $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$. Ici, $a = k \cdot \lambda$ donc $\theta = \dfrac{\lambda}{k \cdot \lambda} = \dfrac{1}{k}$ d'où les valeurs de θ en raidans : $\theta_1 = 1 \text{ rad}$, $\theta_2 = 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ rad}$ et $\theta_3 = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$

b. Plus la fente est fine, plus le phénomène de diffraction est marqué donc c'est pour $k = 1$ que le phénomène est le plus marqué.

c. Si $a = 0,5 \text{ cm}$, alors $\theta = \dfrac{\lambda}{a} = \dfrac{633 \cdot 10^{-9}}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 10^{-4} \text{ rad}$ tandis que si $a = 50 \text{ µm}$, alors $\theta = \dfrac{\lambda}{a} = \dfrac{633 \cdot 10^{-9}}{50 \cdot 10^{-6}} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$. Le phénomène de diffraction existe bien dans les deux cas mais sera imperceptible avec la fente la plus large.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P85 n°19

a. Les lignes 2 et 3 du tableau montrent que lorsque a diminue, L augmente. La première expression est donc à rejeter. En outre, les lignes 2 et 4 du tableau montrent que lorsque D diminue, L diminue également donc la deuxième expression est aussi à rejeter. La seule expression valable est donc $L = \dfrac{2\lambda D}{a}$.

b. Analyse dimensionnelle de cette relation :

D'une part, $[L] = L$ et d'autre part, $\left[\dfrac{2\lambda D}{a}\right] = \dfrac{L \times L}{L} = L$. Ainsi, la relation retenue est bien homogène aux dimensions.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P85 n°19 (suite)

c. Dans l'expérience 1, on a : $L_1 = \dfrac{2\lambda_1 D_1}{a_1} = \dfrac{2\lambda_1 D}{a}$ d'où $\dfrac{2D}{a} = \dfrac{L_1}{\lambda_1}$ et dans l'expérience 2 : $L_2 = \dfrac{2\lambda_2 D_2}{a_2} = \dfrac{2\lambda_2 D}{a}$ d'où $\dfrac{2D}{a} = \dfrac{L_2}{\lambda_2}$. On en déduit que $\dfrac{L_1}{\lambda_1} = \dfrac{L_2}{\lambda_2}$

d. De la relation précédente, on déduit que $\lambda_1 = \dfrac{L_1 \cdot \lambda_2}{L_2} = \dfrac{3,4 \times 405}{2,1} = 660 \text{ nm}$

e. Écart relatif entre cette valeur et celle donnée par le fabriquant : $\epsilon = \left| \dfrac{\lambda_{1,fab} - \lambda_{1,exp}}{\lambda_{1,fab}} \right| = \left| \dfrac{658 - 660}{658} \right| = 3,0 \cdot 10^{-3} = 0,30\%$. La valeur expérimentale est donc en très bon accord avec la valeur du fabriquant.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P104 n°18

a. Le point O est tel que $S_1O = S_2O$ donc la différence de marche en ce point vaut $\delta = S_2O - S_1O = 0$ ce qui correspond à une différence de marche nulle. Ainsi, les interférences seront constructives au point O ($\delta = k \cdot \lambda$ avec $k = 0$) et la frange centrale est donc brillante.

b. Une frange sombre correspond à un point de l'espace où les interférences sont destructives donc un point tel que $\delta = (2k+1) \cdot \dfrac{\lambda}{2}$. La première frange sombre correspond à $k = 0$ donc à $\delta = \dfrac{\lambda}{2}$ d'où $\dfrac{a_{1-2} \cdot x}{D} = \dfrac{\lambda}{2}$.

On en déduit que $x = \dfrac{\lambda \cdot D}{2 \cdot a_{1-2}} = \dfrac{680 \cdot 10^{-9} \times 1,20}{2 \times 0,20 \cdot 10^{-3}} = 2,0 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}$ soit $x = 2,0\ \mathrm{mm}$

L'interfrange correspond au double de cette valeur (distance entre deux franges sombres par exemple) d'où $i = 2 \cdot x = 4,0\ \mathrm{mm}$.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P105 n°22

a. Les sources S_1 et S_2 émettent en phase car elles sont situées à la même distance de la source S. Ainsi, le retard par rapport à S est le même pour S_1 et S_2.

b. Le point O étant équidistant de S_1 et S_2, la différence de marche entre les ondes émises par S_1 et S_2 est nulle ($\delta = k \cdot \lambda$ avec $k = 0$) et par conséquent, les interférences sont constructives : on observe une frange brillante.

c. On utilise la relation donnée au début des exercices :
$$i = \frac{\lambda \cdot D}{a_{1-2}} = \frac{650 \cdot 10^{-9} \times 2,0}{0,20 \cdot 10^{-3}} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 6,5 \text{ mm}$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P105 n°22 (suite)

d. Le point M est placé de telle façon que $x = 2 \cdot i$. Il est donc situé à exactement deux interfranges du point O et se situe par conséquent au centre d'une frange brillante.

e. Cette fois, le retard de S_1 par rapport à S est inférieur à celui de S_2 donc les deux sources S_1 et S_2 n'émettent plus en phase.

f. C'est la source S_2 qui est en retard par rapport à la source S_1 car l'onde émise par S doit couvrir une distance plus grande pour parvenir à S_2, ce qui lui prend plus de temps.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P105 n°22 (suite)

g. Le point O est toujours à égale distance des deux sources secondaires mais ces dernières émettent à présent des ondes en opposition de phase (décalées dans le temps d'une demi-période). Par conséquent, les interférences au point O seront à présent destructives.

h. La relation permettant de calculer l'interfrange est toujours $i = \dfrac{\lambda \cdot D}{a_{1-2}}$ où le déphasage éventuel des sources n'intervient pas. La longueur d'onde est restée la même, ainsi que la distance D et l'espacement des fentes a_{1-2}. L'interfrange i n'est donc pas modifié.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P105 n°22 (suite)

Si la source est étendue, chaque point de la source va produire une figure d'interférences qui lui est propre, avec le même interfrange, mais décalée dans la direction de l'axe (Ox). Ainsi, les figures d'interférences vont se superposer et l'éclairement de l'écran sera uniforme.

On peut ajouter en outre que, dans le cas d'une source étendue, les différents points de la source constistuent des sources incohérentes, ce qui n'est pas non plus propice à l'observation du phénomène d'interférences.