

Propagation d'un signal : notion d'onde

1. Du signal à l'onde.....	1
2. Description d'une onde.....	2
2.1. Hypothèses simplificatrices.....	2
2.2. Représentation des ondes.....	2
2.3. Célérité.....	2
2.4. Expression mathématique générale.....	3
2.5. Ondes progressives périodiques.....	3
2.6. Modèle de l'onde progressive harmonique (OPH).....	4
3. Un mot sur les milieux dispersifs.....	5
4. Interférences.....	5
4.1. Système étudié.....	5
4.2. Principe de superposition.....	5
4.3. Cohérence des sources.....	5
4.4. Phénomène d'interférences.....	6
4.5. Conditions d'interférences.....	6
4.6. Interférences et ondes stationnaires.....	7
5. Diffraction.....	7
6. Le cas des ondes lumineuses : interférences optiques.....	8
6.1. Fentes d'Young : montage et observation.....	8
6.2. Différence de chemin optique.....	8
6.3. Formule de Fresnel.....	8
6.4. Variante : les trous d'Young.....	9
7. Complément : Effet Doppler.....	9

1. Du signal à l'onde

Définition : Signal

Un **signal** est une grandeur physique *mesurable* qui évolue dans le temps. Associé à une convention, un signal peut devenir porteur d'information.

Type de signal	Grandeurs physiques associées
Acoustique (son)	Pression et vitesse des molécules
Electromagnétique (lumière)	Champ électrique et champ magnétique
Electrique	Tension et courant

Définition : Perturbation

Lorsque le signal s'éloigne seulement *temporairement* et de *manière réversible* de sa valeur d'équilibre, on parle de **perturbation** (ou parfois de vibration).

Une perturbation peut engendrer de proche en proche des modifications du milieu dans lequel elle évolue : elle **se propage**. Le signal évolue alors dans le temps et dans l'espace.

Définition : Onde progressive

Une **onde progressive** est le phénomène de propagation d'une perturbation. Elle est caractérisée par un **transport d'énergie sans transport global de matière**.

Quelques caractéristiques des ondes (liste non exhaustive)

	qualificatif	signification	exemples
Direction de la propagation vs. direction de la perturbation	longitudinale	direction de la propagation parallèle à la direction de la perturbation	son onde de compression
	transversale	direction de la propagation perpendiculaire à la direction de la perturbation	houle onde de cisaillement
Propagation dans le vide ?	mécanique	nécessite un milieu <i>matériel</i> de propagation	son houle
	non mécanique	se propage dans le vide	ondes électromagnétiques ondes gravitationnelles
Dimensionnalité	1D	se propage selon une seule direction	onde le long d'une corde la lumière
	2D	se propage dans toutes les directions sur un plan	rides à la surface de l'eau
	3D	se propage dans toutes les directions de l'espace	son issu d'une enceinte

2. Description d'une onde

2.1. Hypothèses simplificatrices

- L'onde se propage dans un **milieu transparent** : l'onde se propage sans perdre d'énergie.
- L'onde se propage dans un **milieu illimité** : l'onde se propage sans rencontrer d'obstacle.
- L'onde se propage dans un **milieu non dispersif** : la vitesse de propagation du signal ne dépend pas de ses caractéristiques, en particulier de sa fréquence. Ainsi, le signal ne se déforme pas.
- La **propagation est unidimensionnelle** (1D).

2.2. Représentation des ondes

Pour décrire correctement le signal qui se propage, nous devons utiliser deux variables :

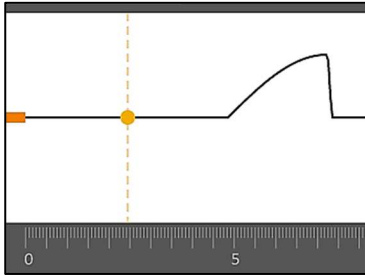
- x pour l'espace
- t pour le temps.

On introduit donc la fonction à deux variables $s(x, t)$ qui donne la valeur du signal (ici l'altitude de la corde) en fonction de x et t .

Pour représenter graphiquement une onde, deux approches sont alors possibles :

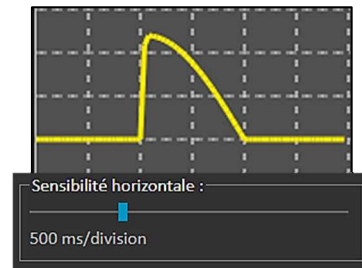
- une approche spatiale :

On photographie la corde (on fixe alors t) et on obtient alors $s(x)$ pour cet instant précis.



- une approche temporelle :

On place un capteur en un point donné de la corde (on fixe x) et on y enregistre le signal temporel pour obtenir $s(t)$ en ce point.



2.3. Célérité

Définition : Retard

Le temps mis par la perturbation pour se propager d'un point M_1 à un point M_2 est appelé le **retard** entre M_1 et M_2 .

Le retard est souvent noté τ . Il s'exprime en seconde.

Sur la figure ci-contre, le **retard** entre M_1 et M_2 vaut : $\tau = (t_2 - t_1)$.

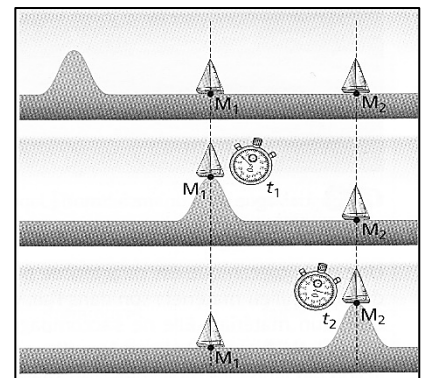
Définition : Célérité

La **vitesse de propagation** de l'onde est appelée **célérité**.

Méthode : Détermination de la célérité (version temps de vol)

La célérité v de l'onde peut se déterminer grâce au retard τ de l'onde entre 2 points M_1 et M_2 dont les positions respectives sont x_1 et x_2 :

$$v = \frac{\text{distance parcourue}}{\text{retard}} = \frac{x_2 - x_1}{\tau} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$



2.4. Expression mathématique générale

2.4.1. Description temporelle

Comme nous venons de le constater, à cause de la propagation, l'évolution temporelle du signal dépend de la position choisie.

- Pour la **description temporelle** de l'onde en un point x , on retrouve la même évolution que celle observée au point x_0 mais avec un décalage qui correspond au retard de l'onde entre x et x_0 . Ce retard vaut $\tau = \frac{x-x_0}{v}$.
- Le signal s peut donc être décrit comme une fonction F_t d'une variable unique combinant x , t et la célérité de l'onde v . La fonction F_t correspond à l'évolution de la hauteur du point de coordonnée $x_0 = 0$.

Propagation dans le sens des x <u>croissants</u>	Propagation dans le sens des x <u>décroissants</u>
$s^\oplus(x, t) = F_t(t - \tau) = F_t\left(t - \frac{x}{v}\right)$	$s^\ominus(x, t) = F_t\left(t + \frac{x}{v}\right)$

2.4.2. Description spatiale

De la même manière, le profil de la corde dépend de l'instant choisi.

- Pour la **description spatiale** à un instant t , on retrouve le même profil que celui observé à l'instant de référence t_0 mais avec un décalage qui correspond à la distance parcourue par l'onde durant l'intervalle de temps $\tau = t - t_0$. Ce décalage spatial vaut $\Delta x = x - x_0 = v \cdot (t - t_0)$.
- Le signal s peut être décrit comme une fonction F_s d'une variable unique combinant x , t et la célérité de l'onde v . La fonction F_s correspond au profil de la corde à l'instant initial ($t_0 = 0$).

Propagation dans le sens des x <u>croissants</u>	Propagation dans le sens des x <u>décroissants</u>
$s^\oplus(x, t) = F_s(x - \Delta x) = F_s(x - v \cdot t)$	$s^\ominus(x, t) = F_s(x + v \cdot t)$

2.5. Ondes progressives périodiques

Définition : Onde progressive périodique

Une **onde progressive** est **périodique** lorsque la perturbation se **reproduit identique à elle-même** à **intervalles de temps égaux** appelés **période**.

Propriété : La source impose la période et la fréquence

La valeur de la **période** (et donc la valeur de la fréquence) est **imposée par la source** de l'onde et ne dépend pas du milieu de propagation.

Définitions : Caractéristiques d'un signal périodique

- La **période** T d'un signal périodique correspond à la durée du motif qui se répète. Elle s'exprime en seconde (s).
- La **fréquence** f d'un signal périodique correspond au nombre de motifs en une seconde.
- La fréquence et la période d'un signal périodique sont liées par la relation :

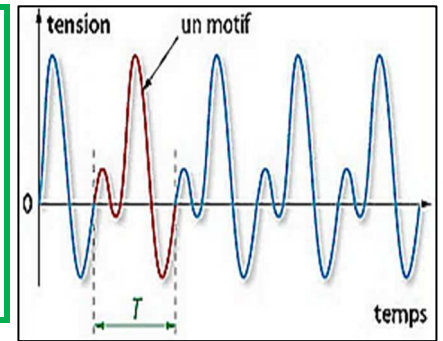
$$f = \frac{1}{T}$$

avec f en hertz (Hz) et T en seconde (s).

Méthode : Déterminer la fréquence d'un signal

1. Identifier le **motif** qui se répète sur la courbe.
2. En utilisant l'axe des abscisses, déterminer la durée de ce motif en seconde. Cette durée correspond à la **période** T du signal.
Pour augmenter la précision de la mesure d'une période, il faut faire la moyenne sur le plus grand nombre possible de motifs représentés.
3. La **fréquence** f (en Hz) s'obtient en utilisant la relation :

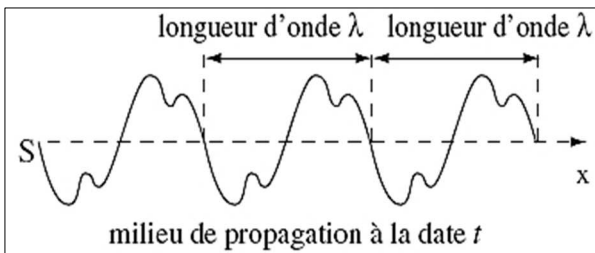
$$f = \frac{1}{T}$$

**Définition : Longueur d'onde (période spatiale)**

La **longueur d'onde**, notée λ (en m), est la plus courte distance séparant deux points de l'onde strictement identiques (même vitesse, même position...).

Propriété : Signaux en phase et longueur d'onde

Deux points séparés d'une longueur d'onde sont toujours **en phase** (évolution identique).

**Propriété : Double périodicité**

La **longueur d'onde** λ (exprimée en mètre) et la **fréquence** (exprimée en hertz) d'une onde lumineuse sont reliées par la relation suivante :

$$\lambda \cdot f = v_{\text{onde}}$$

où v_{onde} est la célérité de l'onde (sa vitesse de propagation) exprimée en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

2.6. Modèle de l'onde progressive harmonique (OPH)

Une **onde progressive harmonique** est une onde décrite par une fonction sinusoïdale.

En prenant en compte le retard en un point d'abscisse x par rapport au point d'abscisse

$$x_0 = 0, \text{ on a donc : } s(x, t) = S_0 \cdot \sin\left(\omega \cdot \left(t \pm \frac{x}{v}\right) + \varphi_0\right)$$

où

- S_0 est l'amplitude de l'onde ;
- $\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$ est la pulsation de l'onde ;
- φ_0 est la phase à l'origine (phase pour $t = 0$ et $x = 0$).

Définition : Vecteur d'onde

On définit le **vecteur d'onde** k (« pulsation spatiale ») par la relation suivante : $k = \frac{\omega}{v}$

Propriété : Sens physique du vecteur d'onde

En utilisant la double périodicité, on peut réécrire le module du vecteur d'onde ainsi :

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi \cdot f}{v} = \frac{2\pi}{v \cdot T} \Rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Le vecteur d'onde k a la dimension de l'inverse d'une longueur (unité en m^{-1}). Il traduit la périodicité dans l'espace comme la pulsation traduit la périodicité dans le temps.

Propriété : Expression générale pour une onde progressive harmonique 1D

On obtient l'expression générale suivante pour l'**onde progressive harmonique unidimensionnelle** :

$$s(x, t) = S_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t \pm k \cdot x + \varphi_0)$$

Rappel : on utilise le $-$ pour une onde se propageant vers les x croissants ;
on utilise le $+$ pour une onde se propageant vers les x décroissants.

Définition : Vitesse de phase

On définit la **vitesse de phase** v à partir du vecteur d'onde k et de la pulsation ω : $v = \frac{\omega}{k}$

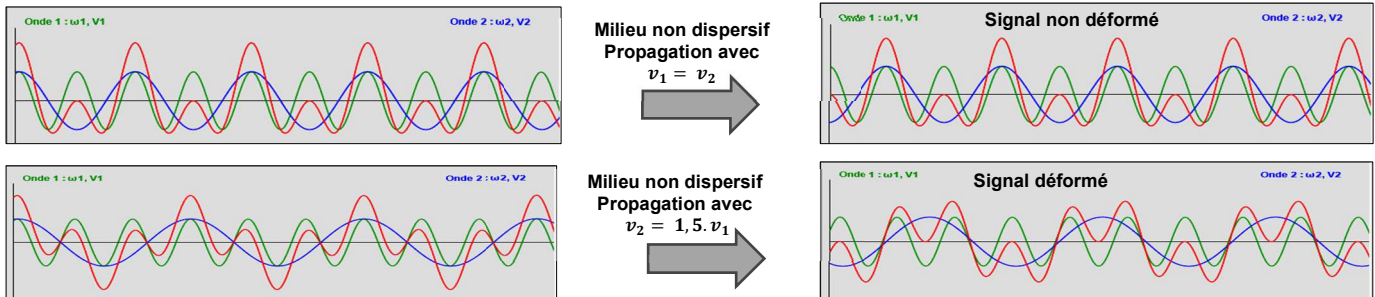
3. Un mot sur les milieux dispersifs

Définition : Milieu dispersif

Un milieu est **dispersif** lorsque la vitesse de phase des ondes **dépend de leur fréquence**.

Propriété : Milieu dispersif et profil de l'onde

Dans un milieu dispersif, un signal périodique non sinusoïdal **se déforme** puisque ses différentes composantes (décomposition de Fourier) se propagent à des vitesses différentes.

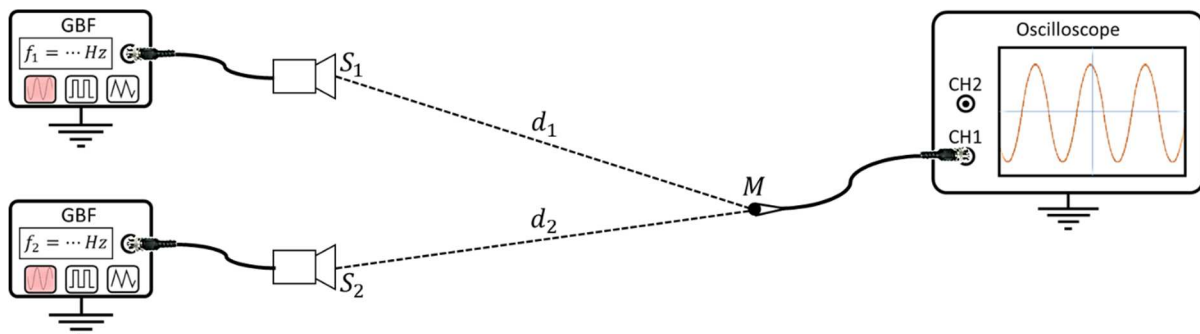


<https://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/meca/ondedisp.html>

4. Interférences

4.1. Système étudié

On étudie les interactions entre deux ondes sonores produites par deux émetteurs placés côte-à-côte. On note S_1 et S_2 les points d'où sont émises chacune des deux ondes. Le récepteur est un micro que l'on peut placer en un point M quelconque.



4.2. Principe de superposition

Loi : Principe de superposition

La perturbation résultant du croisement de 2 ondes est égale à la **somme des perturbations** de chacune des 2 ondes prises séparément.

(Hypothèse sous-jacente : linéarité du milieu de propagation)

4.3. Cohérence des sources

Définition : Ondes cohérentes

Deux ondes sont dites **cohérentes** si en un point donné le **déphasage** entre ces deux ondes reste **constant**. Il faut donc que :

- les deux ondes soient de **même fréquence/pulsation**. On dit que ces ondes sont **synchrones**.
- la différence de phase à l'origine entre les deux ondes reste constante (elle est souvent nulle mais ce n'est pas obligatoire).

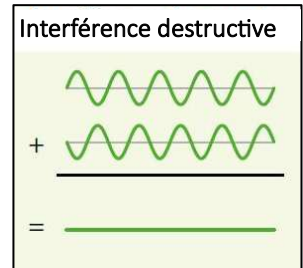
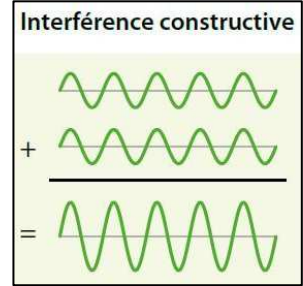
Remarque : en pratique, on utilise souvent une même source primaire que l'on divise en 2 sources secondaires.

4.4. Phénomène d'interférences

Définition : Interférences constructives/destructives

Lorsque 2 ondes émises par des **sources cohérentes** arrivent simultanément en un point, elles se superposent : on somme alors les contributions de chacune. On dit que les ondes interfèrent. On distingue deux cas extrêmes :

- Si les ondes issues de chacun des haut-parleurs sont **en phase** au point M, leur somme est d'amplitude maximale : il s'agit d'**interférences constructives**.
- Si les ondes issues de chacun des haut-parleurs sont **en opposition de phase** au point M, leur somme est d'amplitude minimale : il s'agit d'**interférences destructives**.



4.5. Conditions d'interférences

4.5.1. Conditions sur le déphasage

Propriété : Conditions d'interférences sur le déphasage

- Interférences **constructives** si $\Delta\varphi_p = p \cdot 2\pi$ avec p entier relatif.
- Interférences **destructives** si $\Delta\varphi_p = (p + 1/2) \cdot 2\pi$ avec p entier relatif.

Remarques : Le nombre p est appelé l'ordre d'interférence.

Il existe bien sûr des situations intermédiaires entre ces deux cas extrêmes.

4.5.2. Conditions sur le retard

Les deux signaux sont en phase au moment de leur émission. Si la différence de retard $\Delta\tau$ vaut une période T , les signaux seront de nouveau en phase au point de mesure. Cela reste vrai pour tout nombre entier de périodes.

Propriété : Conditions d'interférences sur le déphasage

- Interférences **constructives** si $\Delta\tau = p \cdot T$ avec p entier relatif.
- Interférences **destructives** si $\Delta\tau = (p + 1/2) \cdot T$ avec p entier relatif.

4.5.3. Conditions sur les distances

D'un point de vue pratique, la grandeur à laquelle on a immédiatement accès sur le montage est la distance.

Définition : Différence de marche

La différence de chemin parcourue par chacune des ondes est appelée la **différence de marche** δ . Elle vaut :

$$\delta = S_1M - S_2M$$

En exprimant la condition sur le retard à l'aide de la double périodicité ($\delta = \Delta\tau \cdot v$ et $\lambda = T \cdot v$), on obtient les conditions d'interférences qu'on utilisera en pratique :

Propriété : Conditions d'interférences sur la différence de marche

- Interférences **constructives** si $\delta = p \cdot \lambda$ avec p entier relatif.
- Interférences **destructives** si $\delta = (p + 1/2) \cdot \lambda$ avec p entier relatif.

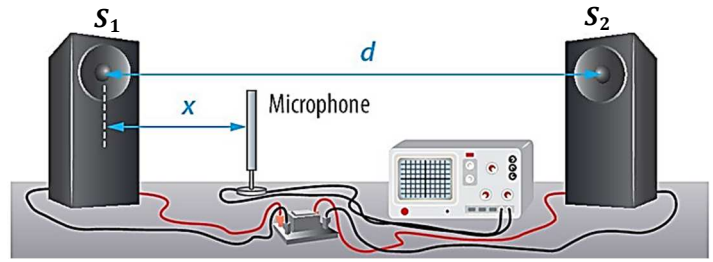
Méthode : Déterminer le type d'interférence

1. Déterminer la **différence de marche** au point considéré (considérations géométriques : trigonométrie, Pythagore...).
2. Calculer l'**ordre d'interférence** p en calculant le rapport $p = \delta/\lambda$.
3. Si l'ordre d'interférence p est **entier**, les interférences sont **constructives**.
Si l'ordre d'interférence p est **demi-entier**, les interférences sont **destructives**.

4.6. Interférences et ondes stationnaires

On considère la situation ci-contre.
 On peut décrire les 2 ondes issues de chacun des deux haut-parleurs comme des ondes unidimensionnelles harmoniques synchrones et cohérentes (phase à l'origine identique et nulle) de même amplitude :

$$\begin{cases} s_1(M, t) = S_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x) \\ s_2(M, t) = S_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + k \cdot (d - x)) \end{cases}$$



En utilisant la relation trigo suivante : $\sin(a) + \sin(b) = 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$, on peut écrire le signal reçu au niveau du microphone sous la forme :

$$s_{tot}(M, t) = s_1(M, t) + s_2(M, t) = \underbrace{2 \cdot S_0 \cdot \cos\left(k \cdot \left(\frac{d}{2} - x\right)\right)}_{\substack{\text{amplitude de l'onde} \\ \text{résultante au point M} \\ \text{(ne dépend pas du temps)}}} \cdot \underbrace{\cos(\omega \cdot t - k \cdot d)}_{\substack{\text{terme oscillant au cours} \\ \text{du temps} \\ \text{(ne dépend pas de la position)}}$$

Définition : Onde stationnaire

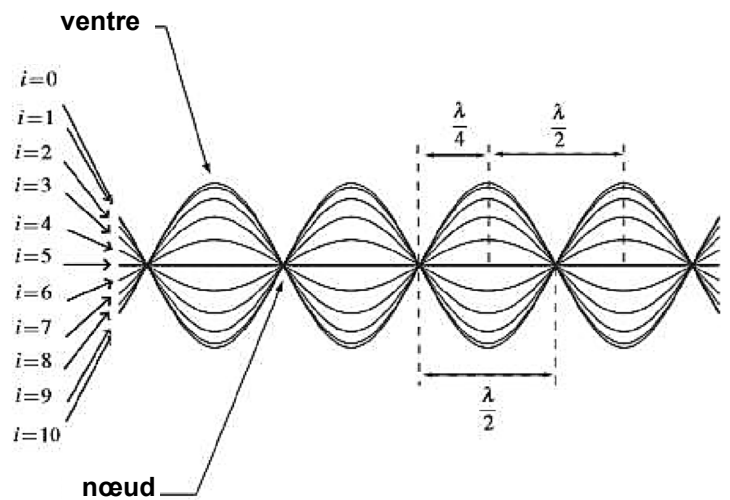
Une **onde stationnaire** est une oscillation locale dans un milieu clos, qui **ne se propage pas**.

Définition : Nœuds de vibration

On appelle **nœuds de vibration** les points de l'espace où la vibration engendrée par les ondes est **toujours nulle**.

Définition : Ventres de vibration

On appelle **ventres de vibration** les points de l'espace où la vibration engendrée par les ondes est d'**amplitude maximale**.



5. Diffraction

Définition : Diffraction

La diffraction est une **modification de la direction de propagation** d'une onde au passage d'une ouverture ou d'un obstacle dont la largeur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.

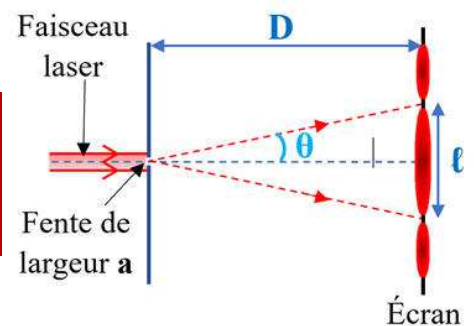
Remarque : la fréquence et la longueur d'onde ne sont pas modifiées.

Propriété : Angle de demie-ouverture

La **tache centrale** de la figure de diffraction d'une **onde harmonique** de longueur d'onde λ par une fente de largeur a est caractérisée par un **angle de demie-ouverture θ** qui vérifie la relation suivante (si l'on observe la diffraction loin de la fente) :

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$$

⚠ L'angle θ s'exprime en radian !



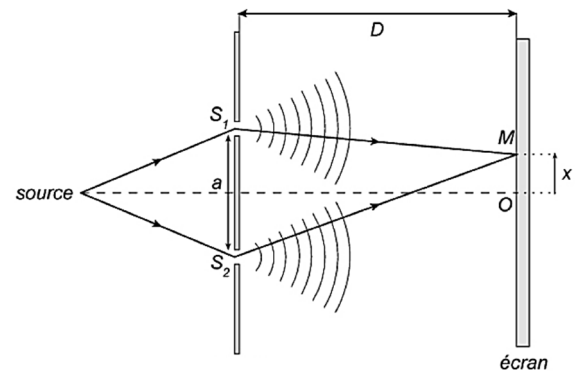
Remarque : Le phénomène de diffraction peut être interprété comme un phénomène d'interférences en considérant des sources cohérentes minuscules réparties le long de la fente (principe de Huygens). On observe un maximum local d'amplitude là où les ondes interfèrent constructivement et une amplitude nulle là où les ondes interfèrent de manière destructive.

6. Le cas des ondes lumineuses : interférences optiques

6.1. Fentes d'Young : montage et observation

Les *fentes de Young* désignent en physique une expérience qui consiste à faire interférer deux faisceaux de lumière issus d'une même source, en les faisant passer par **deux petites fentes percées** dans un plan opaque. Sur un écran disposé en face des fentes, on observe un motif de diffraction (**dû à l'étroitesse des fentes**) où s'alternent des franges sombres et **des franges brillantes** (dues au phénomène d'interférence).

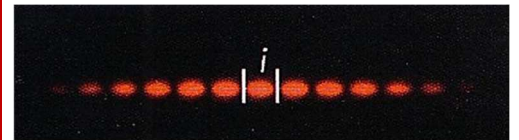
Cette expérience, réalisée pour la première fois par Thomas Young en 1801, permet de mettre en évidence la **nature ondulatoire** de la lumière.



Définition : Interfrange

La figure d'interférence est constituée d'une alternance de **franges brillantes** et de **franges sombres** comme sur la figure ci-contre. La distance entre chaque frange sombre s'appelle l'**interfrange** noté i . On sait montrer qu'il vaut :

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



6.2. Différence de chemin optique

Dans le cas des fentes d'Young, les deux rayons ont traversé un même milieu avant d'atteindre l'écran. Mais ce ne sera pas toujours le cas... Pour tenir compte du milieu dans lequel se propage la lumière, on raisonnera pour la lumière en termes de « chemin optique » à la place du simple chemin parcouru.

Définition : Différence de chemin optique et condition d'interférences

Dans un milieu homogène et isotrope d'indice optique n dans lequel se propage en ligne droite selon un rayon lumineux, on définit le **chemin optique** entre deux points S et M de ce milieu la quantité :

$$(SM) = n \cdot SM$$

où SM représente la longueur du segment $[SM]$.

On montre alors que **la différence de marche** δ en M peut s'exprimer comme la différence des chemins optiques : $\delta(M) = (S_1M) - (S_2M)$.

Propriété : Conditions d'interférences pour les ondes lumineuses

Les conditions d'interférences sont alors similaires à celles obtenues pour les ondes mécaniques en considérant la longueur d'onde **dans le vide** λ_0 :

→ Interférences **constructives** si $\delta(M) = p \cdot \lambda_0$ avec p entier relatif.

→ Interférences **destructives** si $\delta(M) = \left(p + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda_0$ avec p entier relatif.

6.3. Formule de Fresnel

Définition : Intensité d'une onde

On définit l'**intensité** I d'une onde, exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, en un point M comme une grandeur **proportionnelle** à la **moyenne temporelle** du **carré de l'amplitude** de l'onde :

$$I(M) = K \cdot \langle s^2(M, t) \rangle$$

où K est le coefficient de proportionnalité.

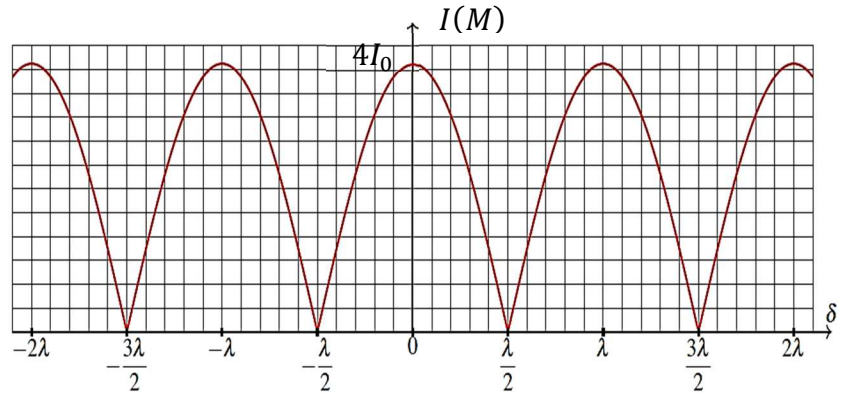
Relation : Formule de Fresnel

L'**intensité lumineuse** $I(M)$ en un point M de l'onde lumineuse résultant de la superposition de deux ondes d'intensités I_1 et I_2 est donnée par la **formule de Fresnel** :

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(2\pi \frac{\delta(M)}{\lambda}\right)$$

Si, comme dans le cas des fentes d'Young, $I_1 = I_2 = I_0$ alors la relation se simplifie en :

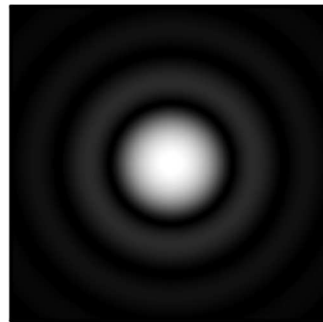
$$I(M) = 2I_0 \left(1 + \cos\left(2\pi \frac{\delta(M)}{\lambda}\right)\right)$$



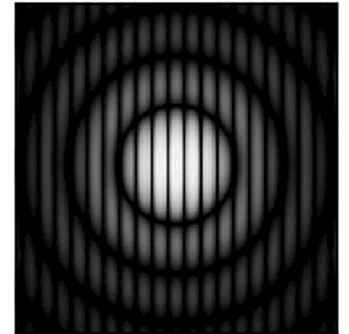
6.4. Variante : les trous d'Young

Le cas que nous venons d'étudier est un cas unidimensionnel où les phénomènes de diffraction et d'interférences n'ont lieu que dans une seule direction.

Dans le cas où les fentes sont remplacées par des trous, la diffraction a lieu dans les deux directions de l'espace (cônes de diffraction). Par contre les interférences s'observent toujours dans la direction parallèle au segment $[T_1 T_2]$ reliant les deux trous.



Un trou



Deux trous

On retiendra que l'on observe les interférences à l'intérieur de la tâche de diffraction.

7. Complément : Effet Doppler

Définition : Effet Doppler

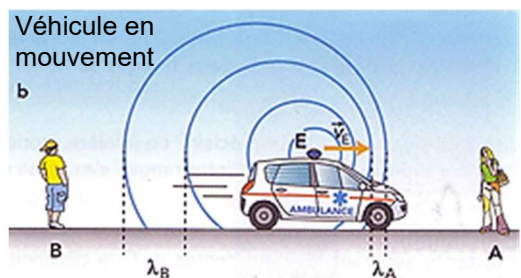
L'**effet Doppler** se manifeste par le **décalage entre la fréquence (f_R) perçue** par un observateur qui se déplace par rapport à la source de l'onde et la **fréquence à laquelle l'onde est émise (f_E)**.

Propriété : Lien entre f_R et f_E

- si la source et l'observateur **s'approchent** l'un de l'autre : $f_R > f_E$ (son perçu plus aigu).
- si la source et l'observateur **s'éloignent** l'un de l'autre : $f_R < f_E$ (son perçu plus grave)

Quelques exemples d'application :

- Astrophysique : mesure de la vitesse d'éloignement des étoiles.
- Radar sur les routes.
- Mesure de la vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux



AU PROGRAMME

Notions et contenus	Capacités exigibles	Dans les exercices
Exemples de signaux. Signal sinusoïdal.	<ul style="list-style-type: none"> Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques. 	
Propagation d'un signal dans un milieu illimité, non dispersif et transparent Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle non dispersive. Célérité, retard temporel.	<ul style="list-style-type: none"> Écrire les signaux sous la forme $f(x-ct)$ ou $f(x+ct)$. Écrire les signaux sous la forme $g(t-x/c)$ ou $g(t+x/c)$. Prévoir, dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle à position fixée et l'évolution spatiale à différents instants. 	
Modèle de l'onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle. Vitesse de phase, déphasage, double périodicité spatiale et temporelle.	<ul style="list-style-type: none"> Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique, mécanique et électromagnétique. Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de phase. Relier le déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation. Mesurer la vitesse de phase, la longueur d'onde et le déphasage dû à la propagation d'un phénomène ondulatoire. 	
Milieux dispersifs ou non dispersifs.	<ul style="list-style-type: none"> Définir un milieu dispersif. Citer des exemples de situations de propagation dispersive et non dispersive. 	
Phénomène d'interférences Interférences entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence.	<ul style="list-style-type: none"> Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives. Déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage. 	
Interférences entre deux ondes lumineuses de même fréquence. Exemple du dispositif des trous d'Young éclairé par une source monochromatique. Différence de chemin optique. Conditions d'interférences constructives ou destructives. Formule de Fresnel.	<ul style="list-style-type: none"> Relier le déphasage entre les deux ondes à la différence de chemin optique. Établir l'expression littérale de la différence de chemin optique entre les deux ondes. Exploiter la formule de Fresnel fournie pour décrire la répartition d'intensité lumineuse. Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser et caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes. 	
Phénomène de diffraction Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation. Angle caractéristique de diffraction.	<ul style="list-style-type: none"> Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture. 	
Effet Doppler Décalage Doppler.	<ul style="list-style-type: none"> Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques. 	