Chapitre 10

Interférences et diffraction

I. Superpositions de 2 ondes

1. Principe de superposition
2. Superposition de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence

II. Interférences de deux ondes cohérentes synchrones

1. Définition
2. Mise en évidence et description du phénomène
3. Etude du phénomène

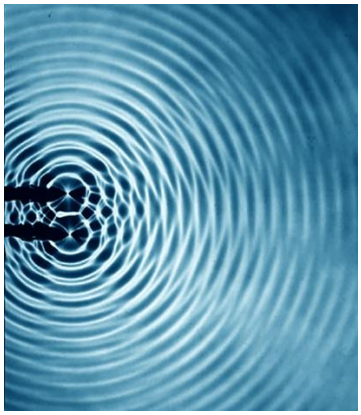
3.1 Fréquence et amplitude du signal résultant

3.2 Cas particuliers : interférences constructives et destructives

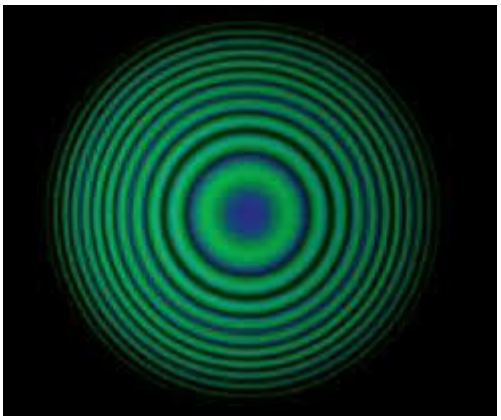
3.3 Déphasage et différence de marche

III. Diffraction

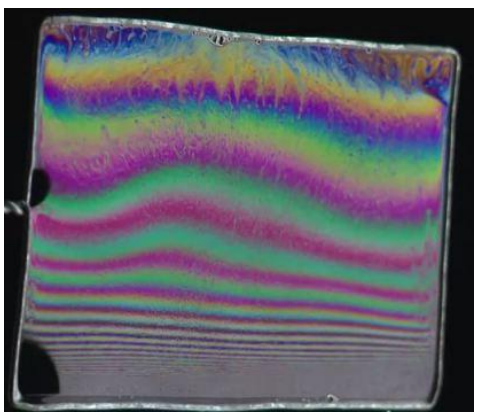
1. Mise en évidence
2. Echelle angulaire du phénomène de diffraction



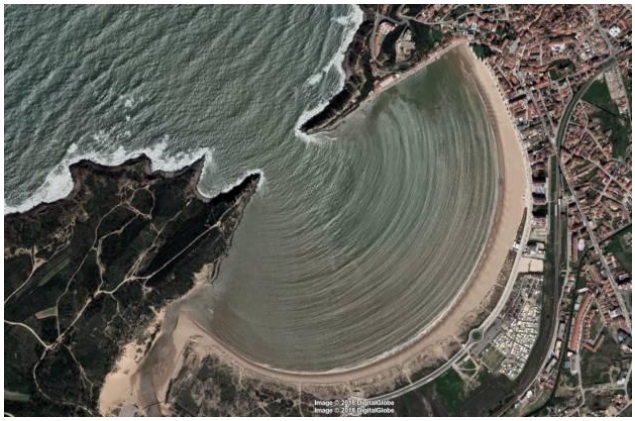
Interférences dans une cuve à ondes



Interférences lumineuses



Interférences lumineuses sur une lame de savon



Diffraction dans la baie de Sao Martinho do Porto

Le casque actif antibruit

Un **casque antibruit** est un casque dont le but est de réduire l'intensité du bruit perçu.

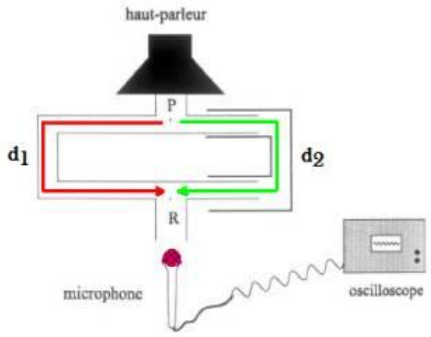
Pour agir « activement » contre les sons de fréquence graves constituant nombre de bruits associés aux travaux avec machines, **Paul Lueg** a proposé (1933) d'ajouter au bruit exactement le même son, mais en opposition de phase.

Principe

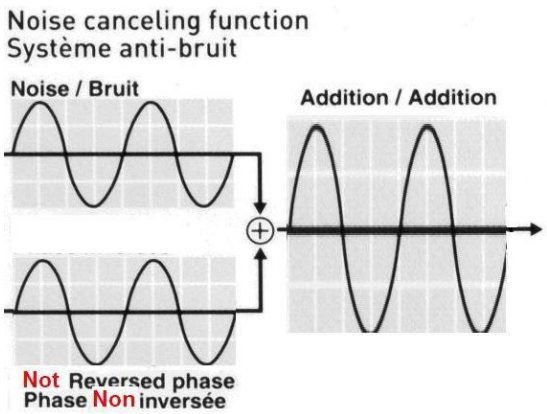
On crée une onde sonore de même fréquence, en opposition de phase et de même amplitude. Si on fait interférer les deux ondes sonores (le bruit de départ et le bruit créé) on obtient du silence ! Pour ce faire, dans le casque actif, on ajoute au bruit entrant un second signal symétrique de ce bruit de telle sorte que la surpression de l'air due au bruit coïncide avec la dépression due au son ajouté et réciproquement !

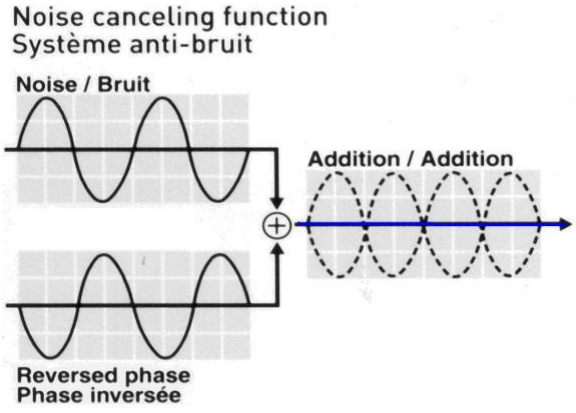
Imaginons un « trombone », un haut-parleur et un microphone relié à un oscilloscope permettant alors respectivement de produire et recevoir du son.

Le son émis par le haut-parleur se divise en deux parties au point P. A partir de ce point, une partie de l'onde sonore se propage vers la gauche et l'autre partie vers la droite. Ces ondes parcourent ainsi deux chemins différents de longueurs d_1 et d_2 puis se rejoignent et interférent au point R, où se trouve le microphone relié à l'oscilloscope. On peut modifier la distance d_2 grâce à la partie mobile du tube de droite coulissant comme la coulisse d'un trombone.



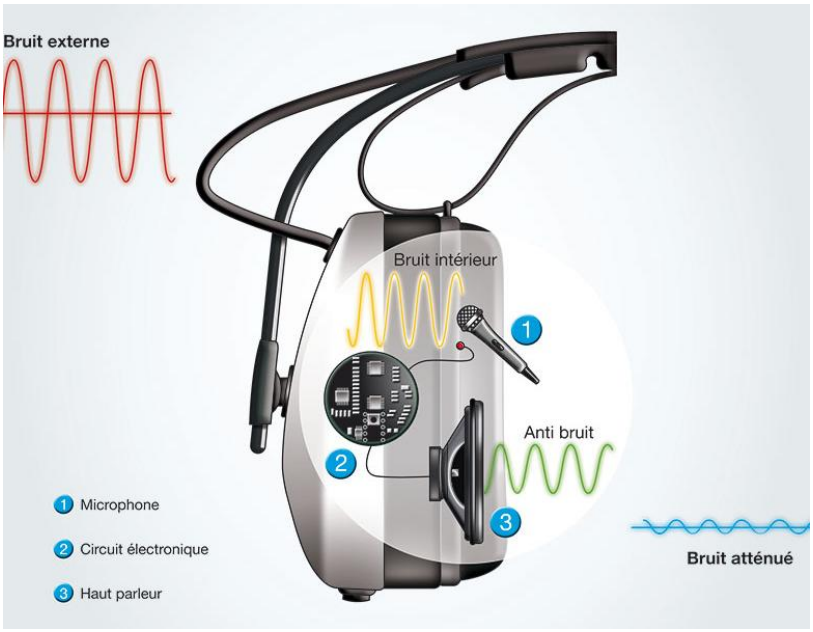
Si la différence de chemin parcouru est nulle, ou égale à un multiple entier de longueur d'onde, $|d_2 - d_1| = p\lambda$, les deux ondes arrivent en phase au niveau du récepteur et produisent une interférence constructive : le microphone perçoit un maximum d'intensité sonore.





Par contre, si on déplace la partie amovible du tube de sorte que la différence parcourue équivaut à un multiple impair de demi-longueur d'onde, $|d_2-d_1| = (2p+1)\lambda/2$, les deux ondes arrivant au niveau du récepteur sont en opposition de phase et donnent lieu à une **interférence destructive** : le microphone ne détecte dès lors aucun son.

Réalisation



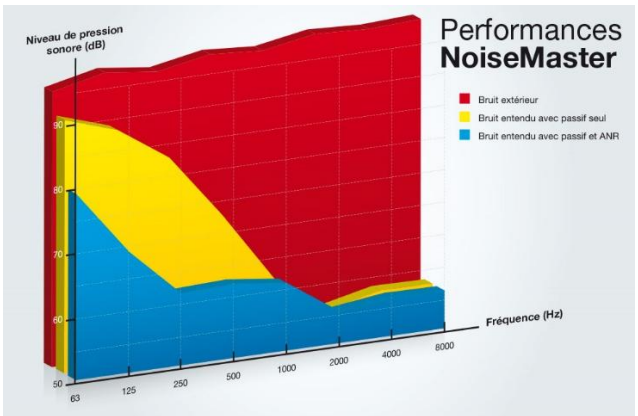
La société TechnoFirst® a développé la gamme de casques NoiseMaster® équipés de la technologie ANR® (Active Noise Reduction). Cette technologie repose sur un système électronique miniaturisé (2) placé à l'intérieur de la coquille du casque. Ce système est connecté d'une part à un petit microphone (1) qui capte le bruit ambiant et d'autre part à un petit haut-parleur (3) qui génère le « contre bruit » à proximité de l'oreille de façon à atténuer considérablement le bruit qui arrive au tympan.

Si notre oreille reçoit la musique, le bruit parasite et le signal correcteur, elle ne perçoit finalement que la musique… en théorie. En effet, des limitations telles que le temps de calcul nécessaire pour créer l'onde antibruit et sa transduction nous limitent en pratique. Il en résulte que les appareils actuellement disponibles peuvent réduire considérablement le bruit ambiant mais non le supprimer parfaitement.

Décalage de 10% sur la phase **Erreur de 10% sur l´amplitude**



En raison de ces limitations, les systèmes anti-bruits sont surtout efficaces dans les basses fréquences. On peut ainsi obtenir une atténuation de 30 à 45 dB selon le bruit ambiant.



Sources :

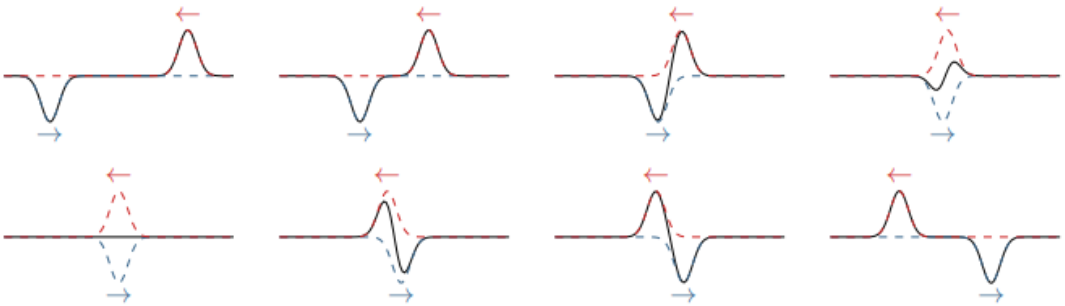
http://auriol.free.fr/psychosonique/ClefDesSons/casque-anti-bruit.htm
http://www.technofirst.com/fr/noisemaster/

Nous avons vu dans le chapitre précédent, qu'une onde est associée à un mouvement vibratoire d'une source provoquant ainsi une perturbation dans le milieu dans lequel elle se trouve, avec possibilité de se propager de proche en proche. Dans ce chapitre, nous allons étudier ce qu'il se passe lorsqu'un milieu est le siège de deux ondes de même nature ou lorsqu'une onde rencontre un obstacle.

I. Superpositions de 2 ondes

1. Principe de superposition

Etudions la rencontre de deux ondes quelconques de même nature se propageant en sens inverses.

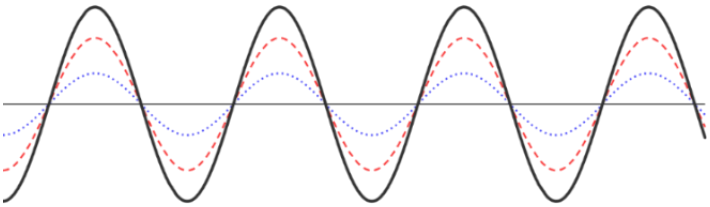


Dans le cas de petites perturbations, la perturbation résultante est **la somme des deux perturbations : les deux ondes se superposent** simplement**. Une fois passé le temps de la rencontre, les deux ondes continuent à se propager indépendamment l'une de l'autre**.

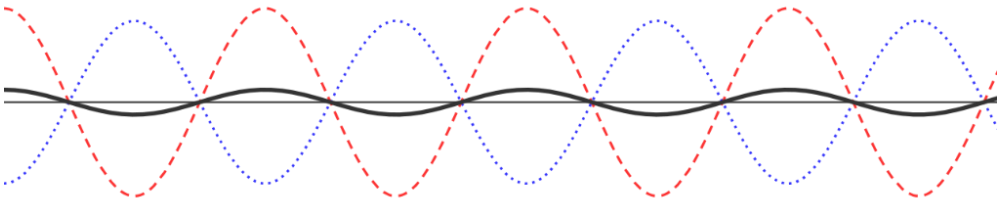
2. Superposition de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence

Si on superpose en un point deux signaux sinusoïdaux de même fréquence, le signal résultant de leur superposition (ou somme) est toujours sinusoïdal mais son amplitude dépend du déphasage entre les 2 signaux. Selon ce déphasage, l'amplitude varie entre une valeur maximale et une valeur minimale.

- Si les deux signaux sinusoïdaux sont en phase, l'amplitude résultante est la somme des amplitudes individuelles, c'est la valeur maximale.



- Si les deux signaux sinusoïdaux sont en opposition de phase, l'amplitude résultante est la différence des amplitudes individuelles, c'est la valeur minimale.



II. Interférences de deux ondes cohérentes synchrones

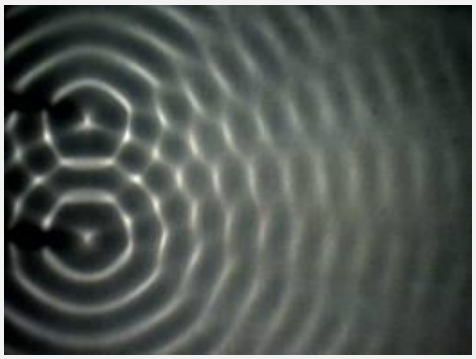
1. Définition

On appelle interférences le phénomène que l'on peut observer lors de la superposition de plusieurs ondes de même nature et de même fréquence et lors duquel l'amplitude de l'onde résultante en un point est différente de la somme des amplitudes individuelles en ce point.

2. Mise en évidence et description du phénomène

Expériences :

- On peut observer ce phénomène à l'aide du dispositif de la cuve à ondes comme le montre la figure ci-contre :



L'amplitude dépend du point considéré et on observe notamment une alternance entre des zones où l'onde semble « détruite » (amplitude des vagues minimale) et des zones où l'onde semble être « renforcée » (amplitude des vagues maximale).

- On peut également observer ce phénomène à l'aide de deux haut-parleurs alimentés par une même source. En se déplaçant dans la pièce, on repère des endroits où le son est maximal et d'autres où le son est minimal.

- **L'amplitude du phénomène varie selon le point étudié.**
- **Si l'amplitude résultante est maximale en un point, on parle d'interférence constructive.**
- **Si elle est minimale en un point, on parle d'interférence destructive.**

3. Etude du phénomène

On étudie le phénomène d'interférence entre **deux ondes de même fréquence** émises en 2 points sources différents S_1 et S_2 .

On appelle $s_1(M,t)$ le signal en un point M en provenance de la source S_1 , $s_2(M,t)$ le signal au point M en provenance de la source S_2 .

$s_1(M,t) = S_{1m}\, cos\, (\omega t + \varphi_1)$ avec $\varphi_1 = -\, k\, S_1M + \varphi_{01}$
$s_2(M,t) = S_{2m}\, cos\, (\omega t + \varphi_2)$ avec $\varphi_2 = -\, k\, S_2M + \varphi_{02}$.

Le déphasage du signal 2 par rapport au signal 1 en un point M est : $\Delta\varphi_{2/1}(M) = \varphi_2 - \varphi_1 = -\, k\, (S_2M - S_1M) + \varphi_{02} - \varphi_{01}$.

Le signal résultant en M est selon le principe de superposition $s(M,t) = s_1(M,t) + s_2(M,t)$.

3.1 Fréquence et amplitude du signal résultant

Pour étudier cette somme, on peut passer en complexe.

$$\underline{s}(M,t) = \underline{s_1}(M,t) + \underline{s_2}(M,t) = S_{1m}e^{j(\omega t+\varphi_1)} + S_{2m}e^{j(\omega t+\varphi_2)} = e^{j\omega t}\left(S_{1m}\, e^{j\varphi_1} + S_{2m}\, e^{j\varphi_2}\right)$$

$S_{1m}\, e^{j\varphi_1} + S_{2m}\, e^{j\varphi_2}$ est un terme indépendant du temps, on pose $S_m e^{j\theta} = S_{1m}\, e^{j\varphi_1} + S_{2m}\, e^{j\varphi_2}$

$$\underline{s}(M,t) = S_m\, e^{j(\omega t+\theta)} \Rightarrow s(M,t) = S_m\, cos(\omega t + \theta)$$

Le signal résultant de la superposition de deux ondes sinusoïdales synchrones est une onde sinusoïdale de même fréquence.

Etudions l'amplitude du signal résultant de la superposition :

$$S_m = \left|S_{1m}\, e^{j\varphi_1} + S_{2m}\, e^{j\varphi_2}\right| = |(S_{1m}\, cos\varphi_1 + S_{2m}\, cos\varphi_2) + j(S_{1m}\, sin\varphi_1 + S_{2m}\, sin\varphi_2)|$$

$$S_m = \sqrt{(S_{1m}\, cos\varphi_1 + S_{2m}\, cos\varphi_2)^2 + (S_{1m}\, sin\varphi_1 + S_{2m}\, sin\varphi_2)^2}$$

$$S_m = \sqrt{{S_{1m}}^2 + {S_{2m}}^2 + 2\, S_{1m}\, S_{2m}(cos\varphi_1\, cos\varphi_2 + sin\varphi_1\, sin\varphi_2)}$$

$$cos\varphi_1\, cos\varphi_2 + sin\varphi_1\, sin\varphi_2 = cos(\varphi_2 - \varphi_1) = cos\, \Delta\varphi_{2/1}(M)$$

Remarque : On aurait pu tout aussi bien écrire $cos(\varphi_1 - \varphi_2) = cos\, \Delta\varphi_{1/2}(M)$, le signe n'ayant pas d'important avec un cosinus.

L'amplitude du signal résultant au point *M* est $S_m = \sqrt{{S_{1m}}^2 + {S_{2m}}^2 + 2\, S_{1m}\, S_{2m}\, cos\, \Delta\varphi_{2/1}(M)}$.
Elle dépend du déphasage entre les ondes au point *M*.
Le terme $2\, S_{1m}\, S_{2m}\, cos\, \Delta\varphi_{2/1}(M)$ est appelé terme d'interférence.

Pour observer des interférences, l'amplitude des oscillations en un point ne doit pas dépendre du temps. En effet, si l'amplitude change au cours du temps, les lieux d'interférences constructives et destructives vont défiler à toute vitesse, et on ne percevra qu'une moyenne uniforme : la figure d'interférences n'est pas stable et « disparaît », on parle de brouillage**. Avoir la même fréquence est évidemment une première condition indispensable mais il faut également que le déphasage $\Delta\varphi$ soit indépendant du temps**. Les sources étant fixes, le terme $-\,k\,(S_2M - S_1M)$ n'est fonction que de la position de M mais le terme $\varphi_{02} - \varphi_{01}$ peut quant à lui dépendre du temps.

Pour observer des interférences, les sources doivent être cohérentes. Elles doivent avoir :
- **La même fréquence**
- **Un déphasage constant au cours du temps $\Delta\varphi_0 = \varphi_{02} - \varphi_{01} = cte$.**

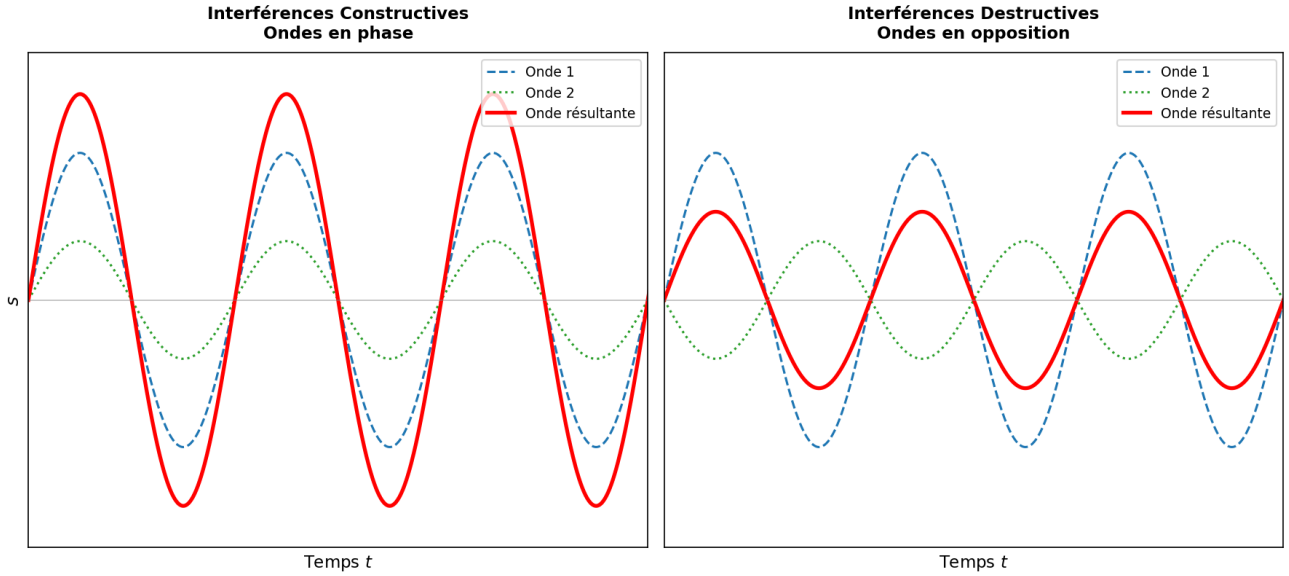
Remarque : Dans le cas d'ondes lumineuses, les capteurs sont sensibles à l'intensité, grandeur proportionnelle au carré de l'amplitude : $I_1 \propto {S_{1m}}^2$ et $I_2 \propto {S_{2m}}^2$. En élevant au carré, on obtient la **formule de Fresnel** : $\mathbf{I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\, cos\, \Delta\varphi}$**.** Si les sources lumineuses ne sont pas cohérentes,

on n'observe pas d'interférences et l'intensité résultante est simplement la somme des intensités : $I = I_1 + I_2$. (cf. spé)

3.2 Cas particuliers : interférences constructives et destructives

L'amplitude résultante en M est maximale si les ondes se rencontrent en phase en M, les interférences sont constructives : $\Delta\varphi = 2p\pi$, $p \in \mathbb{Z}$ et $S_m = S_{1m} + S_{2m}$

L'amplitude résultante en M est minimale si les ondes se rencontrent en opposition de phase en M, les interférences sont destructives : $\Delta\varphi = (2p+1)\pi$, $p \in \mathbb{Z}$ et $S_m = |S_{1m} - S_{2m}|$



$s_1(M,t), s_2(M,t), s(M,t) = s_1(M,t) + s_2(M,t)$

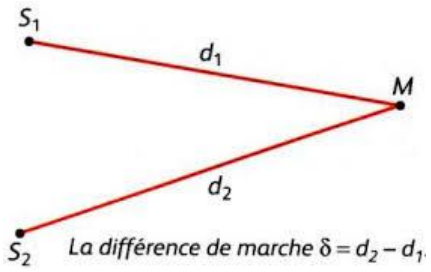
3.3 Déphasage et différence de marche

Le déphasage en M du signal $s_2(M,t)$par rapport au signal $s_1(M,t)$ est :

$\Delta\varphi_{2/1}(M) = \varphi_2 - \varphi_1 = -k\,(S_2M - S_1M) + \varphi_{02} - \varphi_{01}$

$\Delta\varphi_{p,2/1}(M) = -\frac{2\pi}{\lambda}(S_2M - S_1M)$ est le déphasage lié à la propagation.

On appelle **différence de marche en M, $\delta(M)$**, la différence entre les distances parcourues par les ondes issues de chaque source jusqu'au point M :



Si $\delta(M) = S_2M - S_1M$, le déphasage lié à la propagation est tel que : $\Delta\varphi_{p,2/1}(M) = -\frac{2\pi}{\lambda}\delta(M)$

Le déphasage total est alors $\Delta\varphi_{2/1}(M) = -\frac{2\pi}{\lambda}\delta(M) + \varphi_{02} - \varphi_{01}$

Cas particulier de 2 ondes émises en phase : $\Delta\varphi_{2/1}(M) = \Delta\varphi_{p,2/1}(M)$

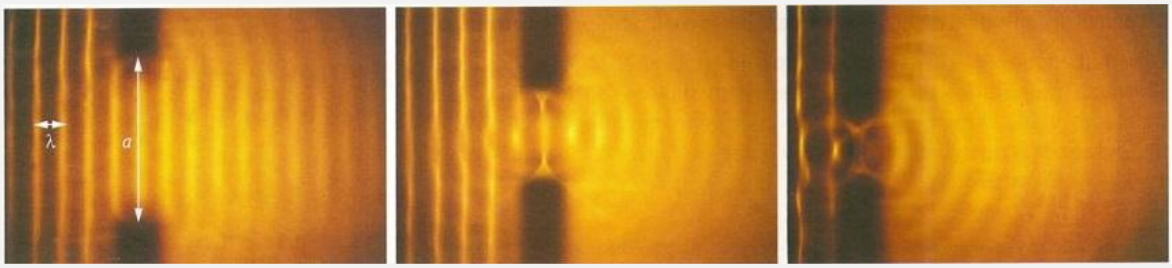
- **Interférence constructive en M si $\delta(M) = p\lambda$, p $\in \mathbb{Z}$ (δ est un multiple entier de la longueur d'onde).**
- **Interférence destructive en M si $\delta(M) = \left(p + \frac{1}{2}\right)\lambda$, p $\in \mathbb{Z}$ (δ est un « demi entier » de longueurs d'onde).**

III. Diffraction

1. Mise en évidence

Expérience :

On peut créer à la surface de l'eau de la cuve à onde une onde plane périodique. On interpose une fente de largeur réglage.



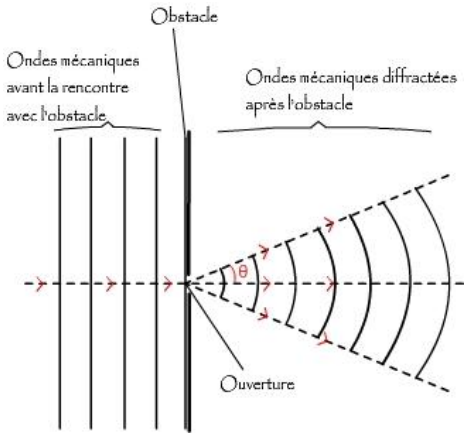
On observe une modification de la propagation d'autant plus importante que la fente est étroite. L'onde est dite diffractée.

La longueur d'onde de l'onde, quant à elle, n'est pas modifiée.

La diffraction est la modification de la propagation d'une onde lorsque celle-ci rencontre une ouverture ou un obstacle.

Ce phénomène ne modifie pas la longueur d'onde et est observable si la longueur d'onde n'est pas négligeable devant la dimension de l'obstacle.

2. Echelle angulaire du phénomène de diffraction

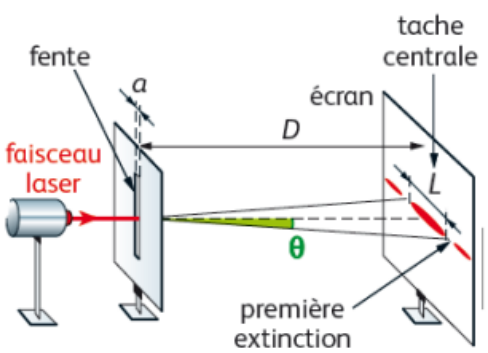


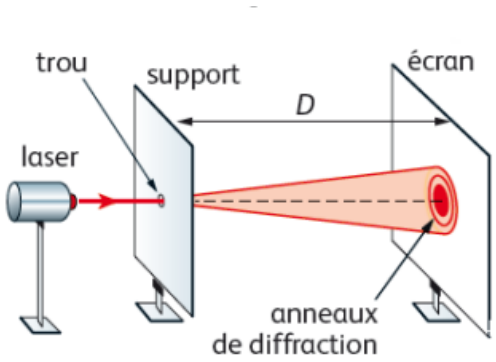
Le phénomène est d'autant plus marqué que l'obstacle est de petite dimension.

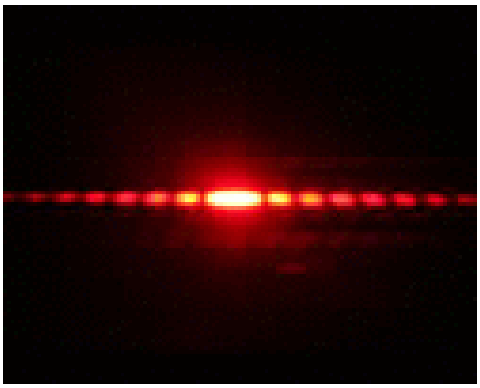
On montre que dans le cas d'une fente de largeur a, l'angle θ caractéristique du phénomène de diffraction est tel que $sin\ \theta \approx \frac{\lambda}{a}$.

Lien : http://www.sciences.univnantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/cuve_ondes/diffraction.html

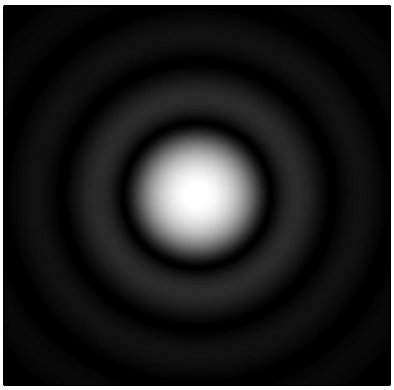
(cf. TP1)







Tâche de diffraction d'une fente verticale

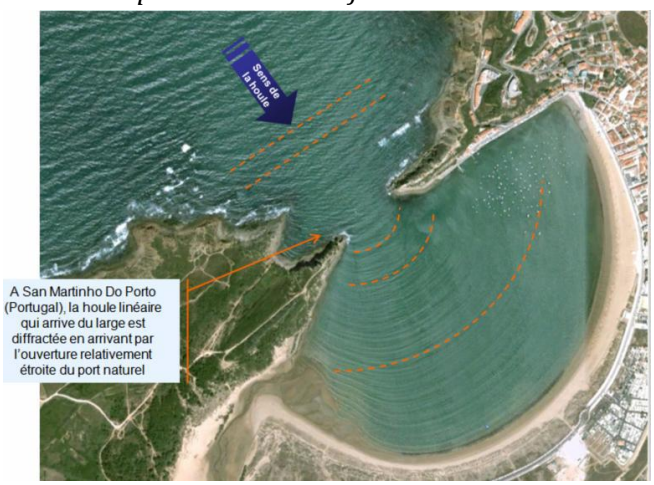


Tâche de diffraction d'une ouverture circulaire

En pratique…

La diffraction se manifeste lorsque :

- *La taille de l'obstacle ou de l'ouverture est du même ordre de grandeur de la longueur d'onde dans le cas des ondes mécanique, comme celles produites à la surface d'une cuve à ondes.*



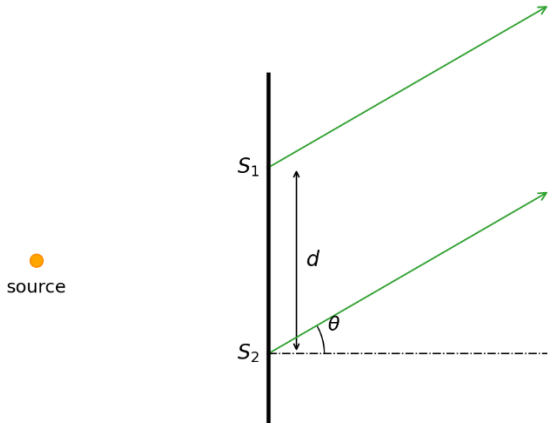
- *La taille de l'obstacle ou de l'ouverture est moins de 100 fois plus grande que la longueur d'onde dans le cas des ondes électromagnétiques (en optique en particulier).*

Application : les trous d'Young

Dans l'expérience de Young, on utilise une source lumineuse et monochromatique. On interpose une plaque percée de 2 trous espacés d'une distance d.

On observe alors, sur un écran placé derrière, des franges alternativement sombres et claires : les ondes issues de des deux trous interfèrent entre elles.
En effet, lorsque la lumière incidente passe au travers d'un trou de petite dimension (rayon r), un phénomène de diffraction a lieu. Le faisceau en sortie du trou présente alors un demi-angle d'ouverture θ tel que $sin(\theta) \sim \frac{\lambda}{2r}$. La faible valeur du rayon r des trous par rapport à λ conduit à des faisceaux de grande ouverture en sortie des trous, permettant aux ondes de se superposer dans un volume de l'espace et d'interférer.

On étudie une source équidistante des trous et on s'intéresse aux interférences à l'infini, c'est-à-dire les interférences entre des rayons diffractés dans la même direction. Dans la pratique, cela s'obtient en plaçant l'écran à plusieurs mètres des trous, ou bien en plaçant l'écran au foyer image d'une lentille convergente.



1) Exprimer la différence de marche δ entre deux rayons interférant entre eux.
2) On étudie le phénomène d'interférence à une distance D>>d. Exprimer, dans l'hypothèse des petits angles, les valeurs de l'angle θ correspondant aux franges brillantes.

