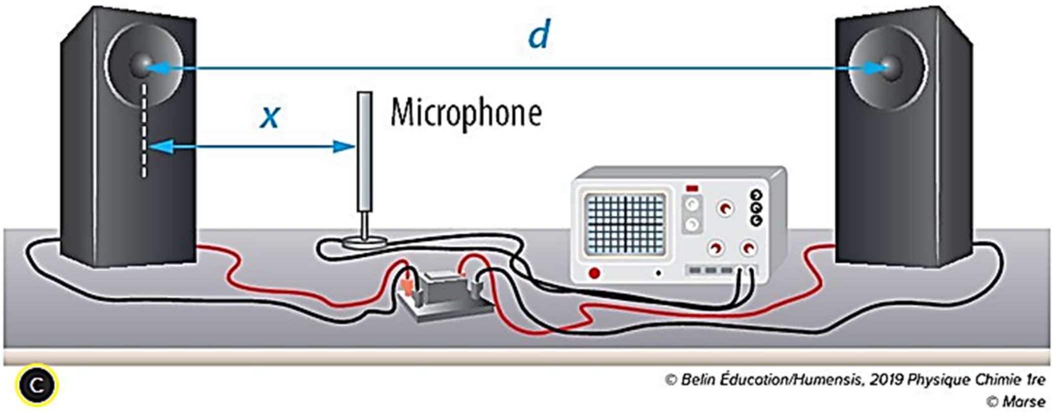
Propriétés des ondes
Cours

Plan du cours

1. Interférences

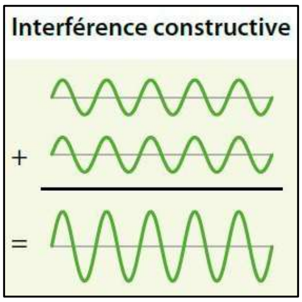
Expérience :
Deux haut-parleurs, placés l'un en face de l'autre, sont branchés sur le même générateur de signaux. Chaque source émet une onde sonore sinusoïdale.
On place entre les deux haut-parleurs un microphone relié à un système d'acquisition. Selon la position **x** du micro, on détecte alternativement des maximas d'amplitude et des minimas d'amplitude.



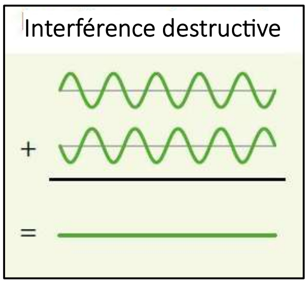
1.1. Principe de superposition et interférences

🕮 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)



- Les maximas d'amplitude observés correspondent à des ***interférences constructives*** : pour ces positions, les ondes issus de chacun des haut-parleurs sont ***en phase***. Leur somme est donc d'amplitude maximale.



- Les minimas d'amplitude observés correspondent à des ***interférences destructives*** : pour ces positions, les ondes issus de chacun des haut-parleurs sont ***en opposition de phase***. Leur somme est donc d'amplitude minimale.

Si les fréquences des deux ondes sont différentes, « l'alignement » des deux ondes émises par les sources se décale dans le temps : on entend des battements. Il est donc nécessaire d'utiliser des ***ondes de même fréquence pour obtenir des interférences***. On dit que ces ondes sont ***synchrones***.

Pour que les ondes émises restent il est également nécessaire que la différence de phase à l'origine reste constante (elle est souvent nulle mais ce n'est pas obligatoire).

> ➔ Si ces deux conditions sont réunies, on dit que ***les ondes sont cohérentes***. C'est une condition nécessaire pour obtenir des interférences.

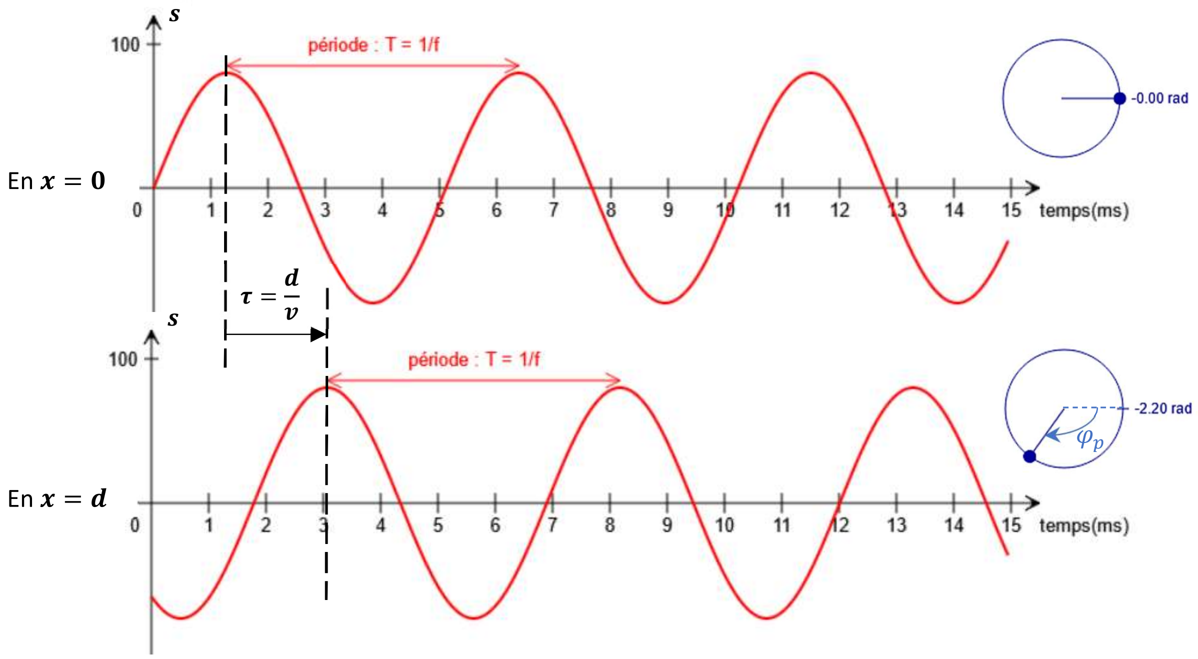
1.2. Déphasage entre 2 ondes cohérentes

Pourquoi est-il possible d'avoir un déphasage entre les deux ondes au niveau du point de mesure ?

1.2.1. Déphasage dû à la propagation

Lors de la propagation d'une onde, le signal accumule du retard par rapport au point où il a initialement été émis. Lorsque l'onde à parcourue une distance $\boldsymbol{d}$, le retard accumulé $\boldsymbol{\tau}$ vaut : $\boldsymbol{\tau} = \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{v}}$, où $\boldsymbol{v}$ est la célérité de l'onde.

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/sinus.php



Ce retard peut également se comprendre en termes de déphasage. En reprenant l'expression de l'onde progressive harmonique, $s(d,t) = S_{\max}.\sin\left(\omega.t - \underbrace{k.d}_{\varphi_p} + \varphi_0\right)$, on voit que ce déphasage φ_p dû à la propagation vaut $\varphi_p = k.d$.

1.2.2. Comparaison des 2 ondes

Pour arriver au point de mesure, les 2 ondes se sont propagées et ont donc chacune accumulé du retard. Les 2 ondes étant en phase au moment de leur émission (même générateur de signaux), pour déterminer la nature de l'interférence, il faut donc considérer la différence de retard $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ entre les deux ondes au point de mesure (τ_1 et τ_2 sont respectivement le retard de l'onde émise par la première source et le retard de l'onde émise par la deuxième source).

1.3. Différence de marche et condition d'interférences

Animation : https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/somme.php

1.3.1. Condition sur le retard

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

⇨ Interférences ***constructives*** si $\boldsymbol{\Delta\tau = p.T}$ avec $\boldsymbol{p}$ entier relatif.
Interférences ***destructives*** si $\boldsymbol{\Delta\tau = \left(p+\frac{1}{2}\right).T}$ avec $\boldsymbol{p}$ entier relatif.

1.3.2. Condition sur le déphasage

⇨ Interférences ***constructives*** si $\Delta\varphi_p = \boldsymbol{p.2\pi}$ avec $\boldsymbol{p}$ entier relatif.
Interférences ***destructives*** si $\Delta\varphi_p = \boldsymbol{(p+1/2).2\pi}$ avec $\boldsymbol{p}$ entier relatif.

1.3.3. Condition sur les distances

D'un point de vue pratique, la grandeur à laquelle on a immédiatement accès sur le montage est la distance. On note S_1 et S_2 les points d'où sont émis chacune des ondes qui interfèrent. Le signal est mesuré au point M.

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

$$\boxed{\delta = S_1M - S_2M}$$

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

⇨ Interférences ***constructives*** si $\boldsymbol{\delta = p.\lambda}$ avec $\boldsymbol{p}$ entier relatif.
Interférences ***destructives*** si $\boldsymbol{\delta = (p+1/2).\lambda}$ avec $\boldsymbol{p}$ entier relatif.

Remarques : Le nombre $\boldsymbol{p}$ est appelé l'ordre d'interférence.
Il existe bien sûr des situations intermédiaires entre ces deux cas extrêmes.

Application 1 Détermination de la position des interférences constructives et destructives.

Deux haut-parleurs $\mathrm{H_1}$ et $\mathrm{H_2}$ sont placés face à face, à une distance $\mathbf{d}$ = 1,20 m l'un de l'autre.
Ils émettent le même son, de fréquence $\mathbf{f}$ = 1 600 Hz. Dans les conditions de l'expérience, $\mathbf{c_{son}} = 336\ \mathrm{m.s^{-1}}$.

Q1. Déterminer la longueur d'onde $\boldsymbol{\lambda}$ du son émis.

Q2. Un microphone M est placé à égale distance des deux haut-parleurs. Que vaut la différence de marche $\boldsymbol{\delta} = \mathrm{H_1M - H_2M}$ en ce point ? Les interférences sont-elles constructives ou destructives ? L'amplitude du son capté par le microphone est-elle maximale ou minimale ?

Q3. Un microphone M est placé en un point du segment reliant les haut-parleurs, à la distance $\mathbf{x}$ de $\mathrm{H_1}$. Exprimer les distances $\mathrm{H_1M}$ et $\mathrm{H_2M}$ et la différence de marche $\boldsymbol{\delta}$ en fonction de $\mathbf{x}$ et de $\mathbf{d}$.

Q4. À quelle condition le son capté par le microphone a-t-il une amplitude minimale (interférences destructives) ? maximale (interférences constructives) ?

Q5. On prend $\mathbf{x}$ = 39 cm. L'amplitude du son reçu est-elle maximale, minimale ou quelconque ? Mêmes questions pour $\mathbf{x}$ = 86,25 cm, pour $\mathbf{x}$ = 63,5 cm et pour $\mathbf{x}$ = 107 cm.

1.4. Interférences et ondes stationnaires

On peut décrire les 2 ondes issues de chacun des deux haut-parleurs comme des ondes unidimensionnelles harmoniques synchrones et cohérentes (déphasage φ_0 à l'origine constant et identique) :

$$\begin{cases} s_1(M,t) = S_{\max}.\sin(\omega.t - k.d_1 + \varphi_0) \\ s_2(M,t) = S_{\max}.\sin(\omega.t - k.d_2 + \varphi_0) \end{cases}$$

En utilisant la relation trigo suivante :

$$\sin(a) + \sin(b) = 2.\cos\left(\frac{a-b}{2}\right).\sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

on peut écrire :

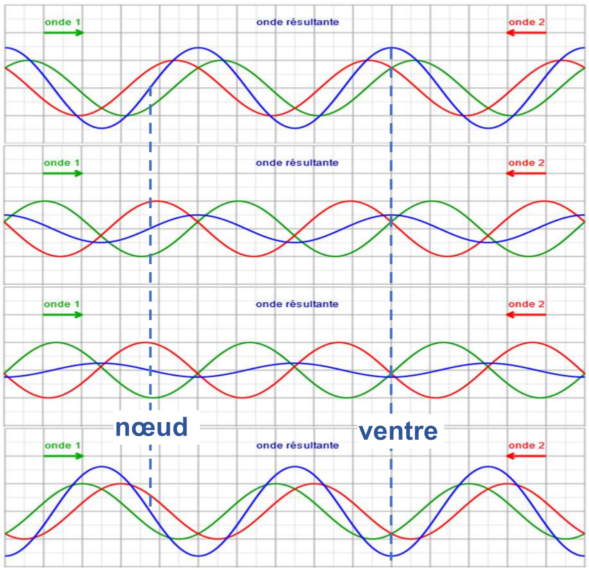
$$s_{tot}(M,t) = s_1(M,t) + s_2(M,t) = \underbrace{2.S_{\max}.\cos\left(k.\left(\frac{d_1-d_2}{2}\right)\right)}_{\substack{\text{amplitude de l'onde} \\ \text{résultante au point M} \\ \text{(ne dépend pas du temps)}}}.\underbrace{\sin(\omega.t - k.d + \varphi_0)}_{\substack{\text{terme oscillant au cours} \\ \text{du temps} \\ \text{(ne dépend pas de la position)}}}$$

L'onde résultante n'est plus une onde progressive : on parle alors d'***onde stationnaire***. Les paramètres de temps ($\boldsymbol{t}$) et d'espace ($\boldsymbol{x}$) sont découplés. Le milieu oscille sur place et seule l'amplitude de cette oscillation dépend de la position.

On observe ainsi des points du milieu pour lesquels l'amplitude reste toujours nulle : ce sont les ***nœuds*** de l'onde stationnaire.

On observe ainsi des points du milieu pour lesquels l'amplitude est maximale : ce sont les ***ventres*** de l'onde stationnaire.

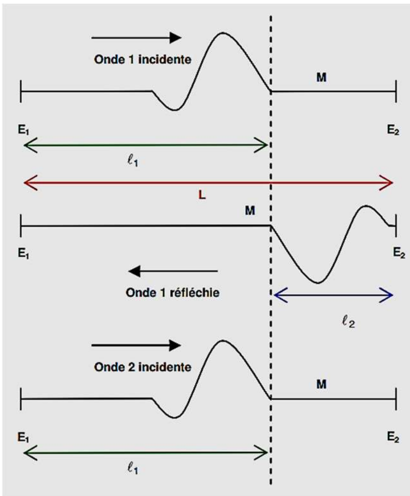
Les ondes stationnaires sont au cœur du fonctionnement des instruments de musique.



https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/ondes_stationnaires/stationnaires.php

Application 2 Condition d'obtention d'une onde stationnaire dans un instrument à corde.

https://fpassebon.pagesperso-orange.fr/animations/ondes_stationnaires.swf



On considère une corde dont les extrémités E_1 et E_2 sont fixes. On cherche la relation entre la longueur $\boldsymbol{L}$ totale de la corde et la longueur d'onde $\boldsymbol{\lambda}$ de l'onde sinusoïdale susceptible de se propager de façon stable sur la corde (pour la clarté des figures on a représenté un seul motif d'une onde non sinusoïdale). Un vibreur génère une onde de période $\boldsymbol{T}$ en E_1 qui se propage vers la droite, notée onde 1. L'onde 1 incidente commence à faire vibrer le point M de la corde à l'instant $\boldsymbol{t_1}$.

L'onde 1 incidente se réfléchie sur l'extrémité E_2 et produit l'onde 1 réfléchie qui atteint le point M à l'instant $\boldsymbol{t_2}$.

Q1. Exprimer le temps $\boldsymbol{t_2}$ en fonction de $\boldsymbol{t_1}$, $\boldsymbol{\ell_2}$ et $\boldsymbol{v}$ la célérité de l'onde.

L'onde 1 réfléchie se réfléchie sur l'extrémité E_1 et produit l'onde 2 incidente qui atteint le point M à l'instant $\boldsymbol{t_3}$.

Q2. Exprimer $\boldsymbol{t_3}$ en fonction de $\boldsymbol{t_2}$, $\boldsymbol{\ell_1}$ et $\boldsymbol{v}$, puis en fonction de $\boldsymbol{L}$ et $\boldsymbol{v}$.

A cause des réflexions successives sur les extrémités, l'amplitude de vibration au point M ne peut être non nulle que si l'onde 1 incidente et l'onde 2 incidente interfèrent constructivement en M. On fait alors apparaitre une onde stationnaire sur la corde.

Q3. Quelle relation doit donc exister entre les instants $\boldsymbol{t_1}$, $\boldsymbol{t_3}$ et $\boldsymbol{T}$ pour que l'on ait formation d'une onde stationnaire le long de la corde ?

Q4. En déduire une relation entre $\boldsymbol{L}$ et $\boldsymbol{\lambda}$ pour qu'une onde stationnaire se forme le long de la corde.

Q5. Retrouver cette relation en utilisant la condition d'interférences constructives sur la différence de marche.

2. Diffraction

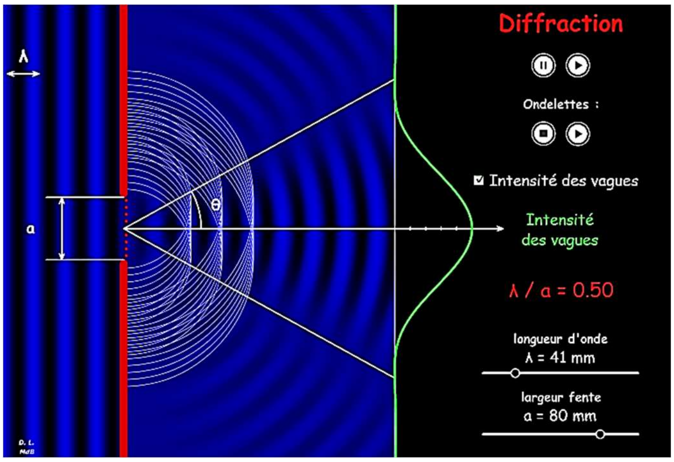
La diffraction est une ***modification de la direction de propagation*** d'une onde au passage d'une ouverture ou d'un obstacle dont la largeur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.

<u>Remarque</u> : la fréquence et la longueur d'onde ne sont pas modifiées.

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

$$\boxed{\theta \approx \frac{\lambda}{a}}$$

! L'angle $\boldsymbol{\theta}$ s'exprime en radian !



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.

Application 3 Diffraction par une porte.

Un diapason émet une onde sonore à une fréquence de 440 Hz. La vitesse du son dans les conditions de l'expérience vaut 340 m.s^{-1}. L'onde sonore franchit la porte de la salle dont l'ouverture vaut 90 cm.

Q1. Faire un schéma de la situation.

Q2. Quel est l'angle de demie-ouverture de l'onde sonore une fois qu'elle a franchi la porte ?

Q3. Même question avec un émetteur ultrasonore dont la fréquence d'émission est de 40 kHz. Commentez.

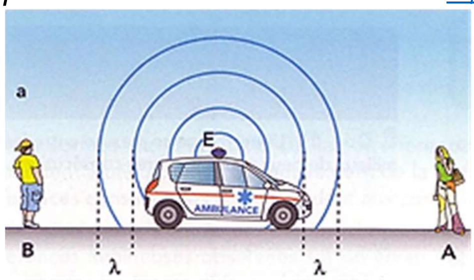
3. Effet Doppler

3.1. Définition

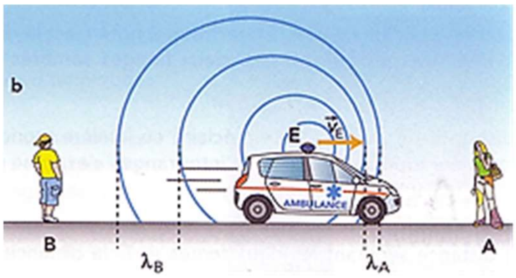
L'effet Doppler se manifeste par le décalage entre la fréquence (f_R) perçue par un observateur qui se déplace par rapport à la source de l'onde et la fréquence à laquelle l'onde est émise (f_E).

- 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).

Exemple d'une sirène d'ambulance : https://physique.ostralo.net/doppler/



Véhicule à l'arrêt.



Véhicule en mouvement.

Application 4 Décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe et d'un émetteur mobile.

La valeur de la vitesse d'un émetteur (E) s'approchant d'un observateur immobile (A) peut être calculée par effet Doppler (voir schéma ci-dessus). On se propose de retrouver la relation liant les diverses grandeurs mises en jeu :

- f_E est la fréquence du signal produit par l'émetteur ;
- f_A est la fréquence du signal reçu par l'observateur ;
- v est la valeur de la célérité de l'onde ;
- v_E est la valeur de la vitesse de l'émetteur.

Les valeurs des vitesses sont mesurées dans le référentiel terrestre et $v_E \ll v$.

Q1. A la date $t = 0$, l'émetteur E est à la distance d de l'observateur A et émet une onde. Exprimer littéralement la date t_1 au bout de laquelle le signal est perçu par l'observateur A.

Q2. Déterminer l'expression de la distance d_E parcourue par l'émetteur pendant la période T_E du signal émis.

Q3. A la date T_E, quelle est la distance $d_E{}'$ entre A et E ?

Q4. A la date T_E, l'émetteur émet de nouveau une onde. A quelle date t_2 l'observateur reçoit-il cette onde ?

Q5. Quelle est la durée T_A séparant les deux signaux consécutifs captés par l'observateur ? Que représente T_A ?

Q6. Exprimer la relation liant f_A, f_E, v et v_E dans cette situation.

Q7. Quelle est l'expression littérale de la valeur de la vitesse v_E de l'émetteur ?

Le klaxon d'une automobile à l'arrêt émet un son dont la fréquence est de 500 Hz. Lors d'un essai sur circuit, on mesure à l'aide d'un micro posé sur le bord de la piste une fréquence de 530 Hz. La célérité du son dans les conditions de l'expérience vaut 336 m.s^{-1}.

Q8. La voiture se rapproche-t-elle ou s'éloigne-t-elle ? Quelle est sa vitesse ?

3.2. 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 sanguins.