

Caractéristiques des ondes

1 - Ondes progressives

1.1 - Définitions

Une perturbation peut se propager le long d'une corde. Après le passage de cette perturbation, la corde retrouve son état initial.

Ce phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu est appelé **onde progressive**. Certaines ondes ont besoin d'un milieu matériel pour se propager : ce sont les ondes **mécaniques**. Les ondes sonores et les ondes sismiques sont des exemples d'ondes mécaniques.

D'autres ondes se propagent également dans le vide : ce sont les ondes **électromagnétiques**. Les infrarouges, les ultraviolets, les ondes radio et les rayons X sont des exemples d'ondes électromagnétiques.

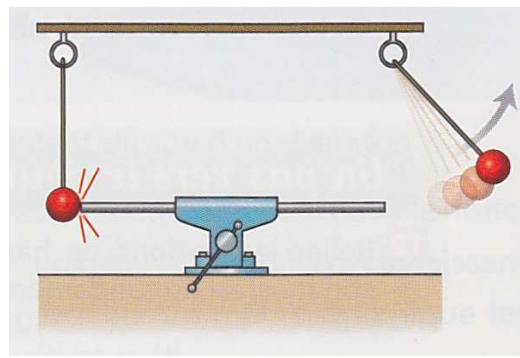
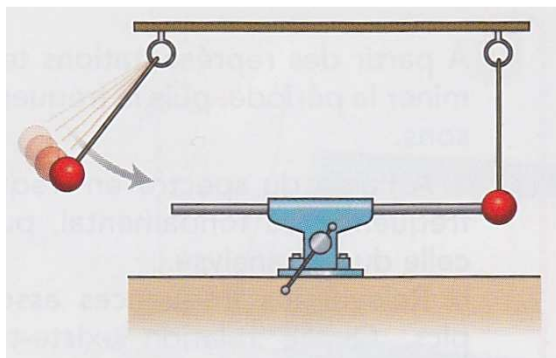
La propagation d'une onde peut avoir lieu dans plusieurs directions.

- Le long d'une corde, une seule direction de propagation est possible. Il s'agit de la direction matérialisée par la corde. On parle d'une propagation à *une dimension*. C'est le cas d'une onde de compression le long d'une tige ou encore des ondes sonores sur un rail.
- Les vagues à la surface de l'eau peuvent se propager dans un plan : celui de la surface de l'eau. C'est une propagation à *deux dimensions*.
- Dans l'air, le son se propage dans les *trois dimensions* de l'espace.

Selon la direction de la perturbation par rapport à la direction de propagation, on parle d'ondes *longitudinales* (mêmes direction) ou *transversales* (directions perpendiculaires).

Au cours de sa propagation, une onde transporte de l'énergie.

Dans l'expérience suivante, une onde de compression (longitudinale) se propage le long de la tige métallique. L'énergie de la boule de gauche est transférée à la boule de droite qui est alors mise en mouvement.



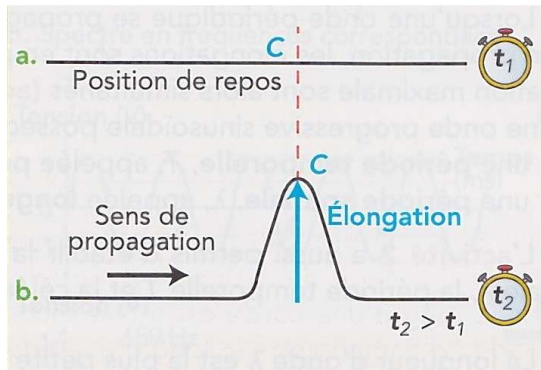
L'énergie nucléaire du Soleil est transférée dans l'espace sous la forme d'ondes électromagnétiques. Des panneaux photovoltaïques permettent de produire de l'électricité à partir de cette énergie.

1.2 - Vitesse de propagation et retard d'une onde

La valeur de la vitesse de propagation v ou célérité d'une onde est le rapport de la distance d qu'elle parcourt par la durée Δt mise par l'onde pour parcourir cette distance,

$$v = \frac{d}{\Delta t}$$

Elle s'exprime généralement en mètres par seconde (m.s⁻¹).

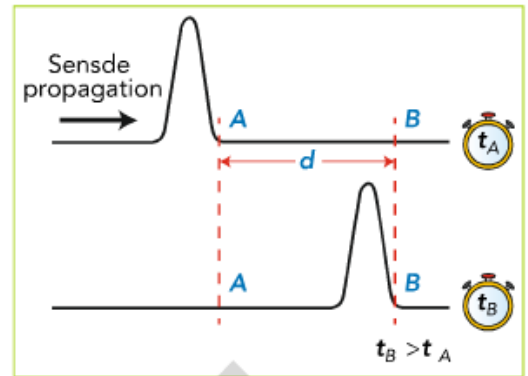


Regardons l'aspect d'une corde lors de la propagation d'une perturbation à la célérité v , à deux dates différentes.

A chaque point de la corde peut être associée une élongation, c'est-à-dire une mesure de la position par rapport à la position au repos.

Les points de la corde sont affectés à des instants différents par la perturbation, qui atteint d'abord le point A à la date t_A , puis le point B à la date $t_B = t_A + \tau$. La grandeur τ désigne le retard du passage de la perturbation au point B par rapport au point A. Elle est liée à la distance AB et à la célérité v par la relation

$$\tau = \frac{AB}{v}$$

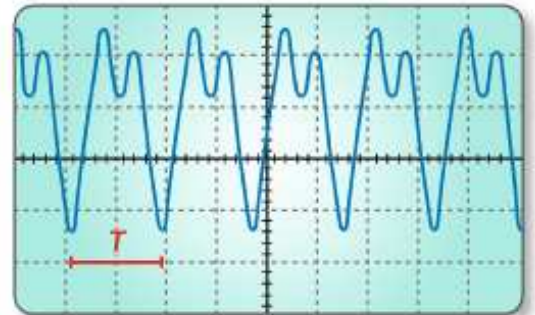


2 - Ondes progressives et périodiques

2.1 - Définition

Onde progressive périodique

L'onde sonore reçue par un capteur (microphone) est convertie en une information électrique visualisée sur l'oscillogramme. Cette information a les mêmes caractéristiques que l'onde dont elle est issue. Sur cet exemple, elle se reproduit à intervalles de temps égaux. Une onde progressive est périodique lorsque la perturbation se reproduit identique à elle-même à intervalles de temps égaux, appelés période temporelle T .



La fréquence f de l'onde est le nombre de répétitions de la perturbation par seconde.

Fréquence et période sont liées par la relation

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

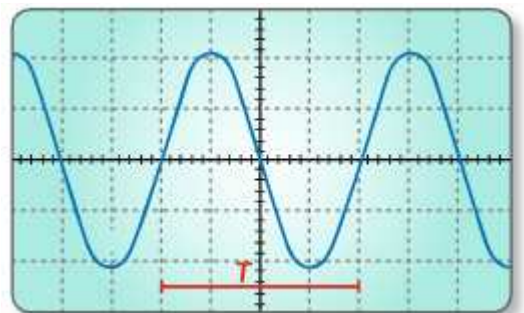
où la fréquence est exprimée en hertz (Hz) si la période est en secondes (s).

Onde progressive sinusoïdale

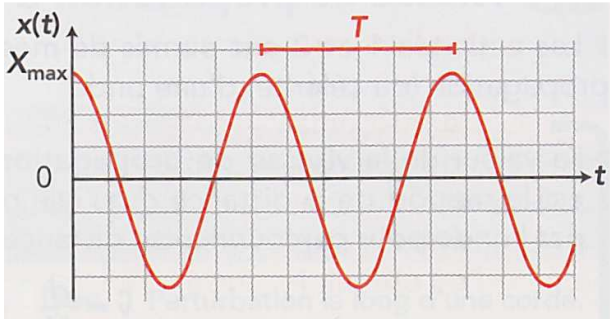
L'oscillogramme correspond à une fonction sinusoïdale. Il a été obtenu à partir d'une émission d'ondes sonores par un diapason.

Dans le cas d'une onde mécanique sinusoïdale, l'évolution de l'élongation au cours du temps est donnée généralement par une fonction de la forme

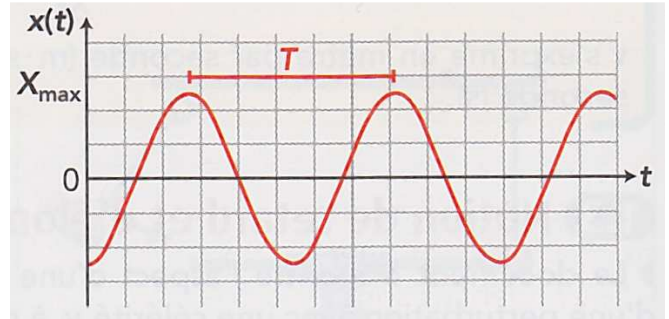
$$x(t) = X_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi\right)$$



X_m est l'amplitude, T la période et φ la phase à l'origine, positive par définition et donnée par les conditions initiales. Par exemple, si l'élongation est initialement $x(0) = X_m$, alors $\varphi = 0$.



Cas où la phase à l'origine est nulle



Cas où la phase à l'origine est non nulle

2.2 - Double périodicité

Lorsqu'une onde périodique se propage, en certains points du milieu, les élongations sont en phase : les passages par l'élongation maximale sont alors simultanés.

Une onde progressive sinusoïdale possède une double périodicité,

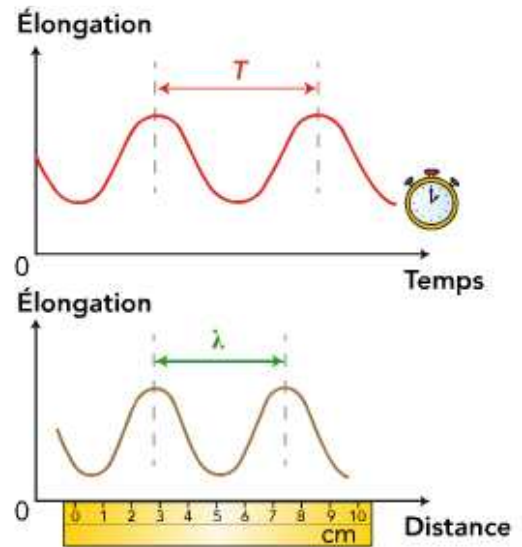
- une période temporelle T , appelée couramment période, exprimée en secondes
- une période spatiale λ , appelée longueur d'onde, exprimée en mètres

La longueur d'onde est la plus petite distance séparant deux positions pour lesquelles les élongations sont en phase. C'est aussi la distance parcourue par l'onde pendant la période temporelle T ,

$$\lambda = v \times T$$

soit, en faisant intervenir la fréquence, $\lambda = \frac{v}{f}$.

La fréquence d'une onde est caractéristique de cette onde : elle ne change pas quand l'onde change de milieu de propagation (elle est fixée par la perturbation initiale). Ce n'est pas le cas de la longueur d'onde, qui change quand la célérité change (et traduit la réponse du milieu à la perturbation).



3 - Caractéristiques des ondes sonores et ultrasonores

3.1 - Perception des ondes sonores

L'oreille humaine perçoit des ondes sonores dont les fréquences sont comprises entre 20 Hz et 20 kHz. Les ondes sonores de fréquences inférieures à 20 Hz sont appelées infrasons ; celles de fréquences supérieures à 20 kHz sont appelées ultrasons.



Certains animaux utilisent les ultrasons : les chauves-souris, les dauphins émettent et perçoivent des ultrasons dont la fréquence peut être supérieure à 100 kHz pour explorer leur environnement ; les éléphants et les baleines émettent et perçoivent des infrasons pour communiquer.

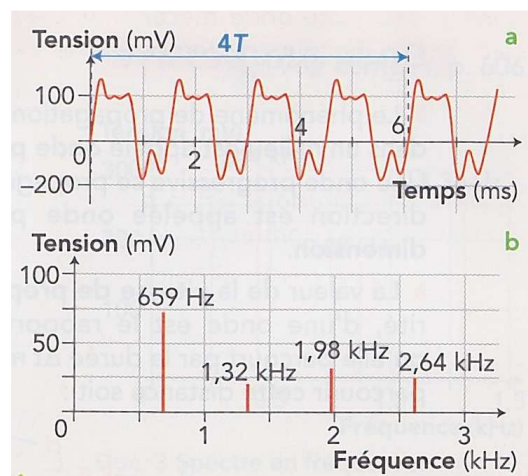
3.2 – Spectre d'un son

Le son produit par un instrument de musique comme une guitare est périodique, mais pas sinusoïdal.

En 1822, le mathématicien français Joseph FOURIER a montré que tout signal périodique de fréquence f_s peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences f_n multiples d'une fréquence f_1 dite fondamentale. Ces signaux sinusoïdaux sont appelés harmoniques. L'analyse spectrale d'un son permet d'en obtenir le spectre en fréquences, une représentation graphique de l'amplitude de ses composantes sinusoïdales en fonction de la fréquence.

Le spectre en fréquences du son (mi₄) d'une guitare montre plusieurs pics de fréquences : à 659 Hz, à 1,32 kHz, à 198 kHz et à 2,64 kHz. Ces fréquences sont celles des **harmoniques**, la fréquence la plus faible, f_1 , étant celle du **fondamental** - c'est aussi la fréquence (ou **hauteur**) du son. Toutes les fréquences f_n du spectre sont des multiples de la fréquence du fondamental,

$$f_n = n \times f_1 \quad (n \in \mathbb{N}^*)$$



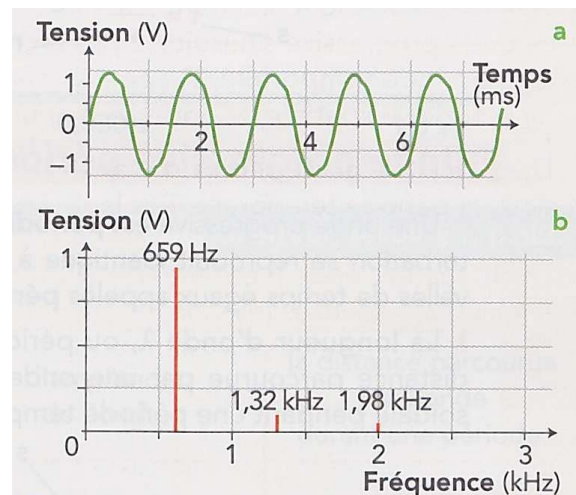
Sur l'oscillogramme, on vérifie que $4T = 6,1 \text{ ms}$ donc que $T = 1,5 \text{ ms}$ et que $f \sim 660 \text{ Hz}$.

La hauteur et le timbre sont deux caractéristiques importantes d'un son musical.

- Plus la fréquence d'un son est faible, plus le son est grave (ou bas) ; plus elle est élevée, plus le son est aigu (ou haut). Si les fréquences de deux sons musicaux sont différentes, alors ils sont perçus à des hauteurs différentes.

- Deux sons de même hauteur émis par deux instruments différents ne sont pas perçus de la même manière, car les harmoniques sont différentes. On dit que ces sons ont des timbres différents. Le timbre d'un son est lié au nombre et à l'amplitude des harmoniques.

Ci-contre, le mi₄ d'une flûte.



3.3 – Niveau d'intensité sonore

Nous percevons les sons de manière plus ou moins intense.

L'intensité sonore I caractérise l'intensité du signal reçu par l'oreille. Elle s'exprime en $W.m^{-2}$.

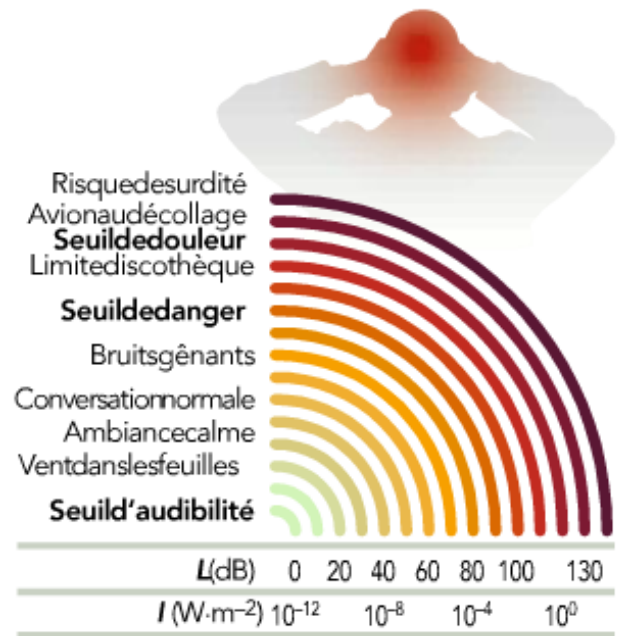
L'oreille humaine perçoit des signaux sonores dont l'intensité est comprise entre une valeur minimale $I_0 = 1,0.10^{-12} W.m^{-2}$ (seuil d'audibilité) et une valeur maximale égale à $25 W.m^{-2}$ (seuil de douleur).

On a créé une autre grandeur, le niveau d'intensité sonore, plus aisée à exploiter que l'intensité sonore. Il est noté L (comme *level*, « niveau » en anglais) :

$$L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

où I_0 est l'intensité au seuil d'audibilité. L s'exprime en décibels (dB). Son échelle est graduée de 0 à 140 dB environ, alors que l'intensité sonore est graduée de 10^{-12} à $10^2 W.m^{-2}$.

Lorsque plusieurs instruments de musique jouent ensemble, lors d'un concert par exemple, les intensités sonores dues à chaque instrument s'ajoutent, mais pas les niveaux d'intensité sonore.



Une illustration...

- Mesurer au sonomètre l'intensité résultant d'un haut-parleur sur GBF. Ajouter un deuxième haut-parleur sur le même GBF, avec les mêmes réglages.
- Conclure sur le bruit généré par les deux lave-vaisselle ci-dessous...

Une ouverture : la différence entre dB et dB(A), les décibels *acoustiques* (la perception de l'oreille n'est pas linéaire en fréquence...).

