

Chapitre 1- Généralités sur le son et les ondes

I. Ondes en physique

1. Définition

Une onde est la propagation d'une perturbation d'une grandeur physique quelconque. Faire bouger avec un seul mouvement sec l'extrémité d'une corde va générer une onde mécanique sur la corde : la déformation initiale va se propager le long de la corde.

La propagation se fait dans un milieu matériel (solide, liquide, gaz, plasma) ou dans le vide (ondes électromagnétiques, ondes gravitationnelles par exemple).

La propagation d'une onde se fait sans transport de matière. Reprenons l'exemple de l'onde sur une corde. Le mouvement de la corde se propage mais les morceaux de corde ne se déplacent pas le long de la corde. Par contre, la propagation d'une onde s'accompagne d'un transport d'énergie.

2. Front d'onde

L'ensemble des points atteints en un temps donné depuis la source de l'onde est appelé le front d'onde.

3. Célérité ou vitesse de propagation

La célérité c , ou vitesse de propagation d'une onde, est la vitesse à laquelle la perturbation se déplace. Cette vitesse ne doit pas être confondue avec la vitesse d'oscillation due au passage de la perturbation. Reprenons encore l'exemple de la corde. La vitesse à laquelle la déformation de la corde se déplace le long de la corde n'est pas celle d'oscillation des points de la corde autour de la direction moyenne de la corde.

4. Quelques types d'ondes

a. Onde longitudinale

Une onde est longitudinale quand la direction du déplacement de la perturbation est parallèle à la direction d'oscillation de la grandeur perturbée. L'onde obtenue en comprimant une partie d'un ressort à spires non jointives est longitudinale : la zone

de compression se déplace le long du ressort et les points du ressort oscillent avec un mouvement parallèle au ressort comme illustré sur la figure 1.1.

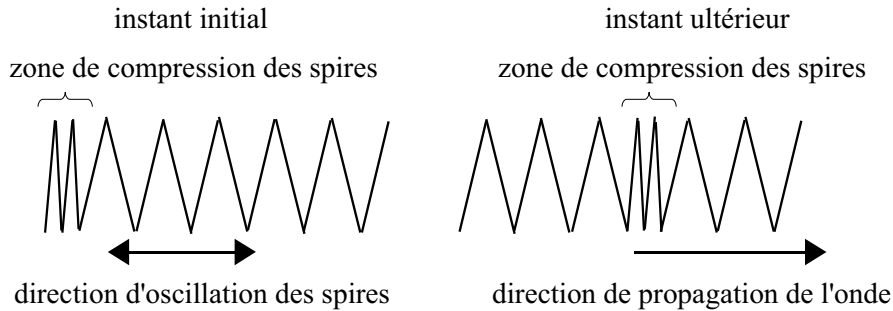


Figure 1.1 : un exemple d'onde longitudinale, le pincement d'un ressort.

b. Onde transverse

Une onde est transverse quand la direction du déplacement de la perturbation est perpendiculaire à la direction d'oscillation de la grandeur perturbée. Une onde se déplaçant le long d'une corde est une onde transverse comme l'illustre la figure 1.2.

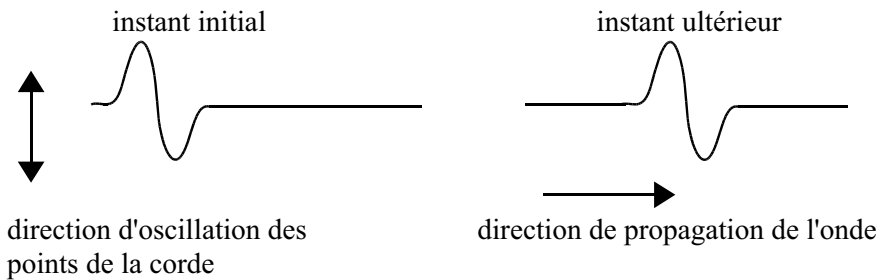


Figure 1.2 : un exemple d'onde transverse, une déformation se propageant le long d'une corde.

c. Onde plane, onde sphérique

Une onde est dite plane lorsque le front d'onde est un plan. La seule coordonnée d'espace intervenant dans la description mathématique de l'onde est celle perpendiculaire au front d'onde.

Une onde est dite sphérique lorsque le front d'onde est une sphère. La seule coordonnée d'espace intervenant dans la description mathématique de l'onde est la distance au centre de la sphère.

d. Onde progressive, onde stationnaire, onde évanescence

On ajoute le qualificatif de « progressive » à toute onde qui correspond à la propagation effective d'une perturbation. Si l'on se réfère à la définition d'une onde donnée plus haut, ce qualificatif est redondant. Il est surtout utilisé pour marquer la

différence avec d'autres types d'ondes que nous allons évoquer dans les paragraphes suivants. Dans le cas d'une onde plane, l'expression mathématique de l'onde dépend uniquement de la variable $u_1 = ct - x$ (avec c la célérité, t le temps et x la coordonnée perpendiculaire au front d'onde) pour les ondes se propageant vers les x croissants, ou de $u_2 = ct + x$ pour les ondes se propageant vers les x décroissants.

Une onde stationnaire est une onde dans laquelle la propagation de la perturbation a disparu (cela pourrait sembler contradictoire avec la définition d'une onde mais l'usage a consacré cette appellation). Les dépendances temporelle et spatiale sont découplées et l'on peut écrire l'onde sous la forme d'un produit d'une fonction du temps par une fonction de l'espace soit $p(x, t) = f(t) \cdot g(x)$ (en prenant l'exemple d'une onde de pression à une dimension). Une manière de construire une onde stationnaire consiste à superposer deux ondes progressives de même fréquence et de même amplitude se propageant en sens inverse.

Une onde évanescence est une onde qui s'atténue sans se propager (atténuation exponentielle en général).

e. Onde périodique, non périodique, aléatoire

Une onde est périodique (sous entendu en temps) si, pour un endroit donné, elle se répète à l'identique à un intervalle de temps constant. On montre (décomposition en série de Fourier) qu'une onde périodique peut toujours se décomposer comme la somme (en général infinie) d'ondes sinusoïdales.

Les ondes non périodiques en acoustique se subdivisent en deux catégories :

- les sons déterministes qui sont décrits, en un endroit donné, par une fonction déterminée du temps.
- les bruits (*bruit* étant compris au sens de la théorie du signal) qui au contraire ne peuvent être décrits par une fonction du temps mais ont un caractère aléatoire.

5. Grandeurs caractéristiques des ondes planes progressives périodiques

a. Période T , fréquence f , pulsation ω

La période T est la durée minimale de répétition à l'identique de l'onde en un endroit donné. La fréquence f est le nombre de ces répétitions par unité de temps. Dans le système international, T se mesure en seconde (s) et f en Hertz (Hz). On a les relations :

$$f = \frac{1}{T} \Leftrightarrow T = \frac{1}{f} \quad (1.1)$$

La figure 1.3 représente la notion de période d'une onde.

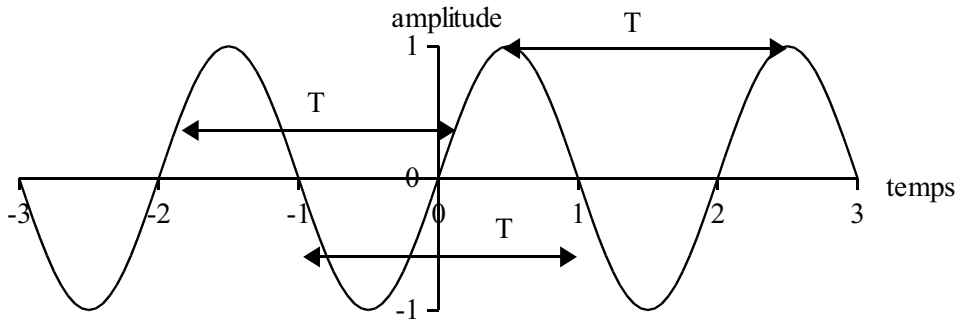


Figure 1.3 : illustration de la période T d'une onde.

La pulsation ω est définie par

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.2)$$

ω se mesure en radians par seconde ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$). Même si l'on peut formellement définir la pulsation pour toute onde périodique, son usage en pratique est restreint aux ondes sinusoïdales.

b. Longueur d'onde λ et nombre d'onde k

La longueur d'onde λ est la distance minimale de répétition à l'identique de l'onde pour un instant donné (c'est la période spatiale). λ est la distance parcourue par l'onde en une période. Dans le système international, λ se mesure en mètre (m).

Le nombre d'onde k se définit par

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (1.3)$$

k se mesure en m^{-1} . Même si l'on peut définir le nombre d'onde pour toute onde périodique, son usage en pratique est restreint aux ondes sinusoïdales.

Remarque : en spectroscopie, le nombre d'onde a une autre définition. Noté σ , il est défini comme l'inverse de la longueur d'onde $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ (il est donc l'équivalent spatial de la fréquence). On parle parfois de nombre d'onde spectroscopique pour σ et de nombre d'onde angulaire pour k .

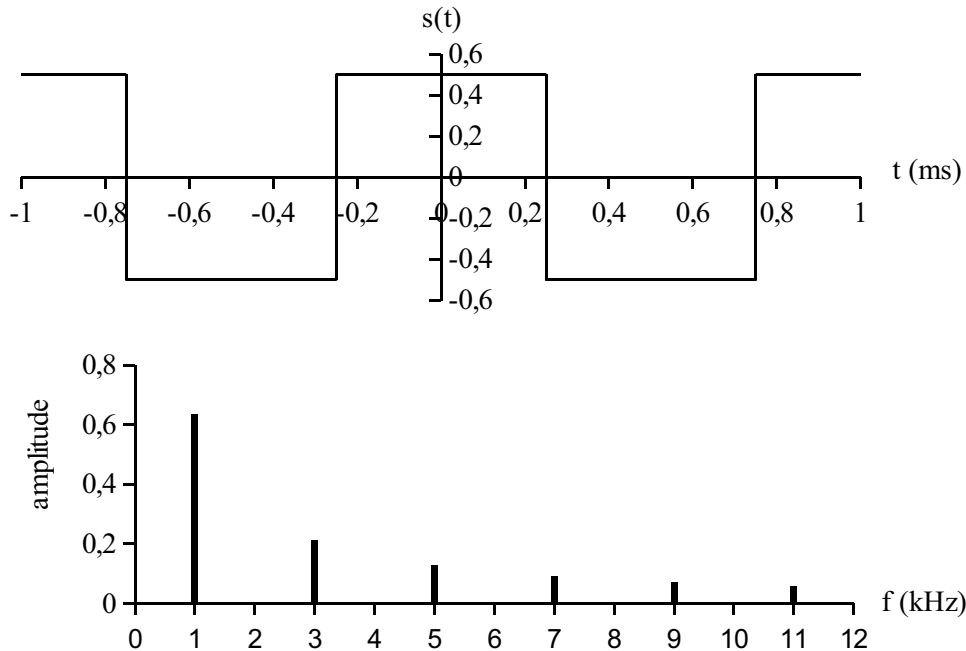
c. Lien entre ces grandeurs

Les grandeurs temporelles (T, f, ω) et spatiales (λ, k) ne sont pas indépendantes. On montre que l'on a les relations

$$c = \lambda f \Leftrightarrow \lambda = cT \Leftrightarrow \omega = kc. \quad (1.4)$$

d. Spectre

Le spectre d'une onde périodique est discret (*i.e* il peut être indexé avec les entiers) et est formé d'une fréquence fondamentale, égale à la fréquence de l'onde, et de tout ou partie des multiples entiers de cette fréquence. Ce résultat découle directement de la décomposition d'une onde périodique en une somme d'ondes sinusoïdales de fréquences multiples de la fréquence de l'onde. L'exemple d'une fonction périodique carrée symétrique avec son spectre est donné sur les figures 1.4 a et b respectivement.



Figures 1.4 a et b (haut et bas) : fonction périodique carrée symétrique et son spectre (limité à l'intervalle 0-12 kHz ; il s'étend en toute rigueur à l'infini).

Remarque : il existe une ambiguïté sur la signification du terme « harmoniques ». Tantôt les harmoniques désignent toutes les fréquences du spectre à l'exception de la fréquence fondamentale, tantôt la fréquence fondamentale est considérée comme l'harmonique de rang 1. En acoustique, c'est la première définition qui prévaut et que nous adopterons dans la suite.

6. Ondes sinusoïdales ou monochromatiques et leur intérêt

Une onde sinusoïdale, ou monochromatique (les deux termes sont équivalents), est une onde dont la grandeur caractéristique, en un endroit donné, varie de façon sinusoïdale avec le temps. Son spectre ne comporte qu'une seule fréquence.

Si l'on note u la grandeur, l'expression mathématique d'une telle onde en un endroit donné est de la forme

$$u(t) = U \sin(\omega t + \phi) = U \sin(2\pi f t + \phi) = U \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \phi\right). \quad (1.5)$$

U est l'amplitude et ϕ la phase à l'origine des temps.

Pour une onde plane progressive se propageant suivant les x croissants, l'expression mathématique est

$$u(x, t) = U \sin(k(ct - x) + \phi) = U \sin(\omega t - kx + \phi) = U \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \phi\right). \quad (1.6)$$

Dans le cas fréquent où les équations décrivant un phénomène sont linéaires, il est intéressant d'étudier le comportement des ondes sinusoïdales. Une fois ce comportement connu, on connaît alors le comportement pour n'importe quelle onde périodique. Les équations étant linéaires, le comportement d'une somme d'ondes sinusoïdales est la somme des comportements pour chacune des ondes sinusoïdales.

II. Ondes acoustiques

1. Nature

Les ondes acoustiques sont des ondes de pression. Autrement dit un son est la propagation d'une variation de pression, appelée pression acoustique, autour de la pression moyenne dans un milieu. Pour cette raison, un son ne se propage pas dans le vide (contrairement à la lumière) mais a besoin d'un support matériel (solide, liquide ou gazeux).

Ce milieu matériel est toujours plus ou moins élastique (évidemment, un gaz est plus élastique qu'un solide) et c'est cela qui permet la propagation de proche en proche d'une onde sonore. À l'image de ce qu'il se passe pour un ressort, une zone comprimée du milieu matériel va mettre en mouvement la zone contiguë qui à son tour va faire bouger la zone d'à côté, etc.

Une fois encore, insistons sur l'importante distinction à faire entre la célérité, c'est-à-dire la vitesse à laquelle la variation de pression se transmet d'une couche du milieu à une autre, et la vitesse à laquelle ces couches oscillent autour de leur position moyenne.

Dans le cas de l'air qui nous intéressera ici, une variation de pression signifie une variation de la densité : une onde acoustique dans l'air s'accompagne aussi d'une variation de la densité de l'air.

Comme il a été dit précédemment, une onde ne s'accompagne pas d'un transport de matière. La propagation d'un son dans l'air, par exemple, se fait donc sans déplacement d'air : il n'y a pas de vent créé par le passage d'une onde sonore.

2. Hypothèses de travail

Dans tous les cas qui seront traités dans cet ouvrage, les variations de pression (et de densité) dues au passage d'une onde acoustique seront faibles par rapport à la pression moyenne (la pression atmosphérique dans notre cas). Nous justifierons plus loin la validité de cette hypothèse. Toutes les ondes ne vérifient pas cette hypothèse, en particulier les ondes de choc, et elles ne seront pas traitées dans ce livre.

Les vitesses d'oscillation des couches du milieu seront aussi faibles par rapport à la célérité de l'onde acoustique (ce ne serait pas vrai pour une onde de choc).

L'air étant un très mauvais conducteur de la chaleur, le passage d'une onde sonore est isentropique (pas d'échange de chaleur entre les différentes couches d'air) sauf pour des cas très particuliers qui ne seront pas abordés dans l'ouvrage (en particulier ultrasons de très haute fréquence, de l'ordre du GHz et plus, pour lesquels la diffusion de la chaleur n'est plus négligeable).

3. Type d'ondes dans les différents milieux

Dans un fluide (liquide ou gaz), les ondes sonores sont longitudinales (pas de transmission possible des cisaillements). Dans un solide, elles peuvent être longitudinales et/ou transverses.

Quel que soit le milieu, les ondes acoustiques peuvent avoir des fronts d'onde de forme quelconque (plan, sphérique ou autre) et des évolutions temporelles quelconques (périodique, non périodique, aléatoire).

4. Vitesses de propagation

De façon générale, plus le milieu est rigide et plus la transmission des variations de pression est rapide. La vitesse de propagation du son dans un solide est plus grande que celle dans un liquide, qui est elle-même plus grande que celle dans un gaz.

Dans du fer, la vitesse de propagation du son est de 5950 m.s^{-1} , dans l'eau elle est d'environ 1500 m.s^{-1} (cette valeur dépend des solutés éventuels, le sel dans l'eau de mer par exemple, de la pression, donc de la profondeur pour les étendues d'eau suffisamment profondes, et de la température) et dans l'air d'environ 340 m.s^{-1} (nous détaillerons le cas de la vitesse du son dans l'air plus loin dans ce livre).

5. Sons, ultrasons, infrasons

Les ondes acoustiques perceptibles par l'oreille humaine s'étagent en fréquence entre 20 Hz et 20 kHz (nous verrons dans un autre chapitre les limites de perception en intensité). Ces bornes sont évidemment des moyennes, variables d'une personne à une autre, variables avec l'âge (une oreille jeune — du moins si elle n'a pas abusé de sons trop forts ! — perçoit une gamme de fréquences plus étendue qu'une oreille âgée). L'étendue très large des fréquences perceptibles par

l'oreille est à comparer à celle de la vision : il n'existe qu'un facteur deux entre les fréquences extrêmes du spectre visible.

Les ondes acoustiques de fréquences trop faibles pour être perceptibles par l'oreille humaine, en dessous de 20 Hz, sont appelées infrasons (de la même manière, les infrarouges sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence est située juste en dessous de celles du spectre visible). Les infrasons peuvent cependant être ressentis par d'autres organes (cœur, viscères). Quelques animaux (éléphants, baleines) produisent et entendent les infrasons. Des phénomènes naturels comme les séismes, les turbulences au dessus de reliefs montagneux, l'entrée d'une météorite dans l'atmosphère, produisent des infrasons.

Les ondes acoustiques de fréquences trop élevées pour être perceptibles par l'oreille humaine, au dessus de 20 kHz, sont appelées ultrasons (de la même manière, les ultraviolets sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence est située juste au dessus de celles du spectre visible). De nombreux animaux émettent ou perçoivent des ultrasons (chiens, chauves-souris qui s'en servent pour l'écholocation).

Retenons que sons, ultrasons et infrasons sont de même nature : tous sont des ondes de pression. Seules les limites des sens humains ont conduit à les distinguer.

6. Phénomènes auxquels donnent lieu des ondes acoustiques

a. Dispersion

La dispersion est la variation de la vitesse de propagation avec la fréquence. L'air, ou les gaz en général, ne sont pas dispersifs : la vitesse du son est indépendante de la fréquence. Les sons graves ou aigus, les infrasons et les ultrasons se propagent à la même vitesse dans l'air.

b. Réflexion

Lorsqu'une onde acoustique rencontre un obstacle de grande taille par rapport à la longueur d'onde (si ce n'est pas le cas, la diffraction, abordée au paragraphe d, devient prépondérante), elle est renvoyée (en partie ou en totalité) avec un angle r égal à celui d'incidence i comme le montre la figure 1.5.

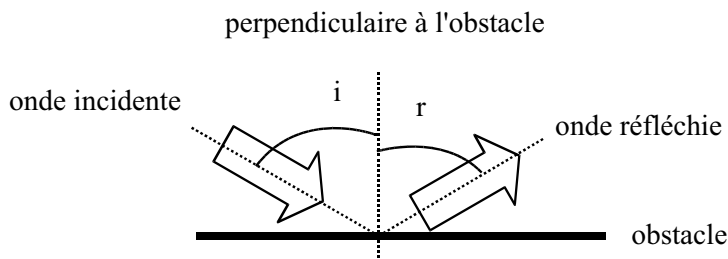


Figure 1.5 : réflexion d'une onde sonore sur un obstacle.