

Chapitre 1 – Caractéristiques des ondes

I. Les ondes dans la matière

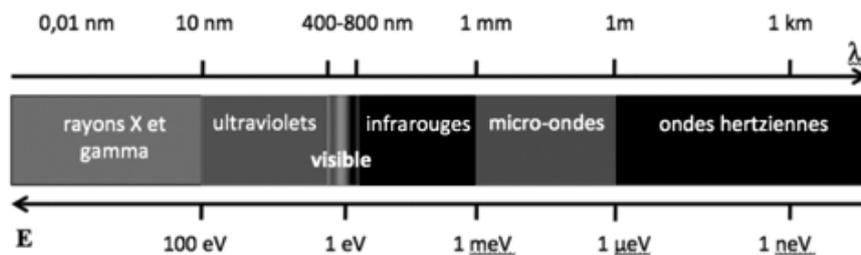
1. Le photon, particule élémentaire de la lumière

Une onde lumineuse correspond à la variation de proche en proche **du champ électrique et magnétique** ou **électromagnétique**. Cette variation du champ électromagnétique correspond à un **transport d'énergie**, par exemple le rayonnement du Soleil chauffe la surface terrestre.

Le plus petit paquet d'énergie transporté par une onde lumineuse ou **quanta d'énergie** est le **photon**. Le caractère **corporel** de la lumière fut introduit par **Albert Einstein**, ce qui permet **la quantification** de l'énergie d'une onde lumineuse. Le photon est une particule de masse supposée nulle, sans charge électrique et se déplaçant dans le vide à la vitesse de la lumière $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

2. Les différentes sources de rayonnements

On caractérise les différents rayonnements grâce à leur énergie E en électron-volt (eV) ou leur longueur d'onde λ en mètre (m).



La lumière visible est comprise pour une longueur d'onde entre **400 nm et 800 nm**. Elle se situe entre les ultraviolets (UV) et les infrarouges (IR). Par exemple le Soleil émet une lumière principalement jaune qui est située à une longueur d'onde de 600 nm.

Les différents émetteurs rayonnent donc des ondes plus ou moins **énergétiques**. A un seuil de 13,6 eV, le rayonnement est **ionisant** et donc dangereux pour l'homme. L'atmosphère joue un rôle de bouclier contre les UV. En effet les molécules de gaz contenues dans l'atmosphère absorbent et diffusent les rayonnements de type UV.

3. Vitesse d'une onde lumineuse

La vitesse d'une onde lumineuse se détermine par le rapport entre la distance parcourue par l'onde et la durée du parcours. Dans le vide, la vitesse de l'onde est appelée **célérité** c et vaut $3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

$$c = \frac{d}{t} = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

c en mètre par seconde (m.s^{-1}), d en mètre (m) et t en seconde (s).

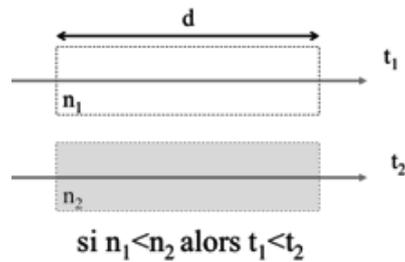
La lumière dans le vide parcourt pendant un an une distance d'**une année-lumière**.

La propagation de la lumière dépend des propriétés du milieu. Le temps mis par un même faisceau lumineux pour parcourir une distance identique dans deux milieux différents varie, il dépend de l'**indice de réfraction** n . Dans un milieu d'indice de réfraction n , la vitesse de la lumière vaut :

$$v = \frac{c}{n}$$

n sans unité, c et v en mètre par seconde (m.s^{-1}).

Milieu	Indice de réfraction n
vide	1
air	1,0003
eau	1,333
diamant	2,419



La longueur d'onde λ dépend aussi du milieu traversé contrairement à **la fréquence de l'onde qui est invariante**. Soit λ la longueur d'onde de la lumière dans un milieu d'indice n , λ_0 la longueur d'onde de la lumière dans le vide :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

n sans unité, λ et λ_0 en mètre (m).

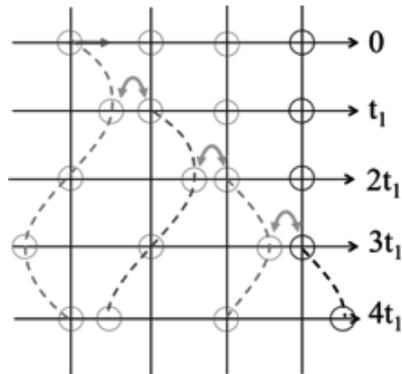
II. Les ondes progressives

1. Propagation d'une onde

On appelle une onde progressive périodique **la propagation dans un milieu d'au moins une perturbation**. Les ondes lumineuses sont un exemple d'ondes progressives, la perturbation du champ électromagnétique se déplace de proche en proche.

Une onde est dite **mécanique** si elle nécessite un milieu matériel pour se propager. Les ondes sonores sont des ondes mécaniques, dans l'espace le son ne peut se propager contrairement aux ondes lumineuses.

Les ondes sonores correspondent à une **variation locale de la pression** d'un fluide (liquide ou gaz). En branchant un haut-parleur, on crée une perturbation dans un fluide qui se propage grâce à l'oscillation des molécules entre elles.



Les collisions entre molécules d'air permettent au son de se propager. On note $T = 4t_1$ la période de la perturbation. La perturbation est de même sens que la propagation de l'onde.

La propagation d'une onde peut se faire dans une direction, deux directions ou dans les trois directions de l'espace. Par exemple, le son et la lumière sont des ondes se déplaçant dans les trois directions de l'espace, dans ce cas **la propagation de l'onde est à trois dimensions (3D)**. La déformation le long d'une corde ne se déplace que suivant une seule direction, **sa propagation est à une dimension (1D)**.

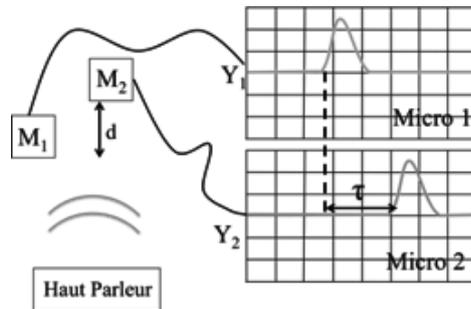
2. Retard d'une onde progressive

Une méthode expérimentale permettant de mesurer le retard d'une onde s'obtient grâce à un haut-parleur et deux microphones M_1 et M_2 séparés d'une distance d . Une brève impulsion est envoyée par le haut parleur. En reliant les deux microphones sur un oscilloscope, on observe que l'onde arrive avec un retard τ sur le microphone M_2 qui est le plus éloigné.

On appelle **retard τ** la durée nécessaire pour que l'onde parcourt une distance d .

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

τ en seconde (s), d en mètre (m) et v en mètre par seconde ($m \cdot s^{-1}$).



3. Exemple d'une onde progressive : les ondes sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes progressives. Elles se décomposent en **ondes volumiques et surfaciques**. Il existe deux types d'ondes volumiques : **les ondes P** (ou ondes primaires) **et ondes S** (ou ondes secondaires).

Les ondes P et S ont des vitesses de propagation différentes. A l'aide de sismographes qui enregistrent la différence de temps d'arrivée des deux ondes, on peut localiser l'épicentre d'un séisme.

Charles Francis **Richter** et Beno Gutenberg furent les premiers à étudier **la magnitude** des tremblements de terre en Californie du Sud. Ils établirent en 1935 l'échelle de Richter mais qui est aujourd'hui dépassée et seulement adaptée aux séismes californiens. Depuis 1970, la magnitude d'un séisme sur l'échelle de Richter est en réalité **la magnitude de moment M** d'un séisme défini par :

$$M = \frac{2}{3} \log M_0 - 6,03$$

M est sans unité, M_0 est le moment sismique exprimé en newton mètre (N.m).

Dans cette expression, le log désigne un logarithme décimal, on rappelle que :

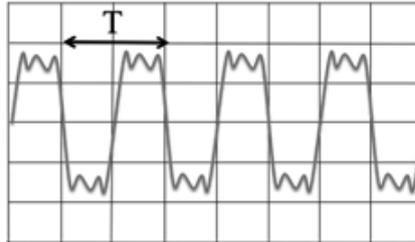
$$\log x = \frac{\ln x}{10} \quad \text{et} \quad \log X = a \Leftrightarrow X = 10^a$$

III. Les ondes progressives périodiques

1. La période T

Quand la perturbation se reproduit identique à elle même à intervalle de temps T régulier, **l'onde est progressive périodique**. Par exemple en enregistrant un son sur un système d'acquisition, on obtient un signal périodique.

On appelle **T la période de l'onde**, elle s'exprime en seconde (s). Dans l'oscillogramme ci-dessous, on a relevé l'**élongation** d'une onde sonore à un calibrage de 10 ms par division. La période T de l'onde mesure deux divisions, elle vaut donc 20 ms.



La **fréquence f** (parfois notée ν) de l'onde est égale au nombre de perturbations enregistrées par unité de temps. Elle est égale à l'inverse de la période T et s'exprime en hertz (Hz).

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

f en hertz (Hz), T en seconde (s).

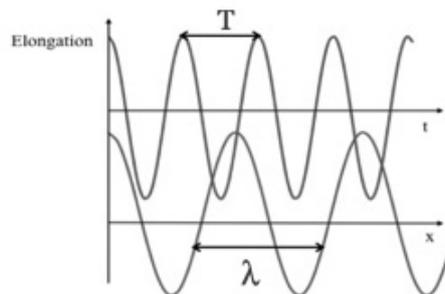
2. La longueur d'onde λ

Les ondes progressives périodiques présentent **une double périodicité** : **temporelle** symbolisée par la période T et aussi **spatiale** symbolisée par **la longueur d'onde λ** .

λ correspond à la distance minimale pour que la perturbation se reproduise identique à elle-même. Pour toute onde périodique progressive, il existe une relation entre les deux périodicités.

$$\lambda = vT$$

λ en mètre (m), v en mètre par seconde ($m \cdot s^{-1}$) et T en seconde (s).

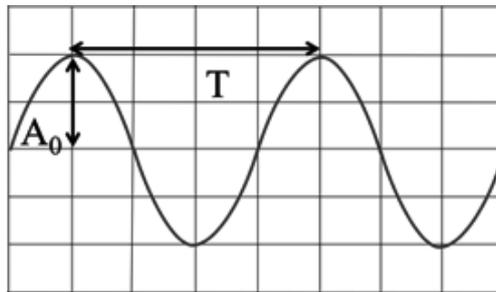


3. Ondes progressives périodiques sinusoïdales

Une onde est progressive périodique et sinusoïdale lorsque son **élongation** $A(t)$ s'exprime par :

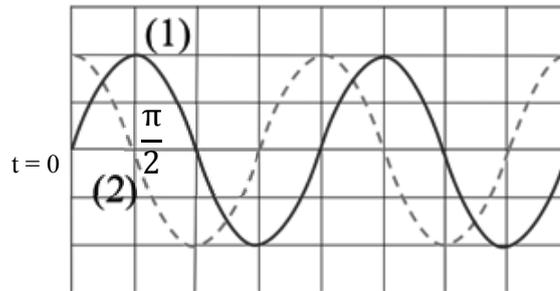
$$A(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

- A_0 est la distance maximale entre la perturbation et l'axe des abscisses. Elle est toujours positive.
- $\omega_0 = 2\pi f$ est la pulsation de l'onde et s'exprime en radian par seconde ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$).
- φ est la phase à l'origine de l'onde et s'exprime en radian (rad).



φ se détermine à partir des conditions initiales.

Sur l'exemple ci-dessous, on a représenté deux signaux de même période $T = 2\pi$ (1) et (2) possédant une phase à l'origine φ différente :



L'onde (1) possède un minima en $t = 0$.

Soit $A(0) = A_0 \sin(\omega_0 \times 0 + \varphi) = 0 \Leftrightarrow A_0 \sin \varphi = 0$ d'où $\varphi = 0$ (π).

$A'(t) = \omega_0 A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) > 0$ sur $[0 ; \frac{\pi}{2}]$ puisque $A(t)$ est strictement croissante.

$\Leftrightarrow A'(0) = \omega_0 A_0 \cos \varphi > 0$ d'où $\varphi = 0$ puisque $\omega_0 A_0 > 0$.

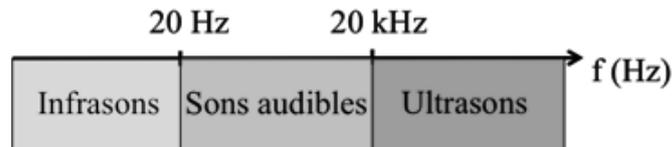
L'onde (2) possède un maxima en $t = 0$.

$A(0) = A_0 \sin(\omega_0 \times 0 + \varphi) = A_0 \Leftrightarrow \sin \varphi = 1$ d'où $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

IV. Transmission du son

1. Perception du son

Un son est une onde mécanique progressive tridimensionnelle. Il est **audible** si sa fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 kHz. En dessous de 20 Hz se situent **les infrasons** et au-dessus de 20 kHz **les ultrasons**.



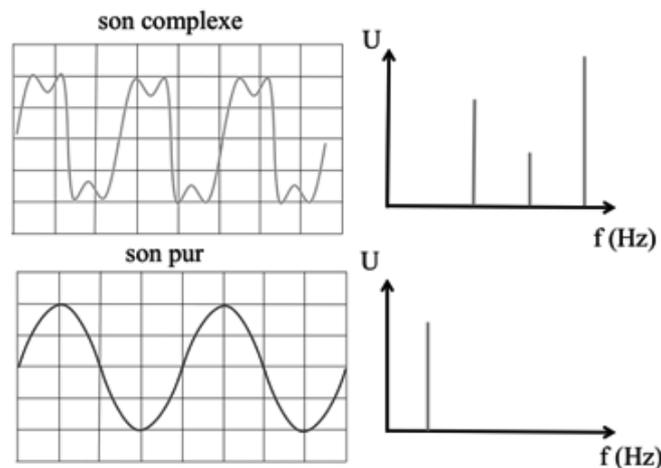
Les infrasons sont utilisés par certaines espèces animales pour communiquer (girafes, baleines) ou se repérer (chauves-souris, dauphins). Les ultrasons donnent lieu à un grand nombre d'applications dans différents secteurs :

- En laboratoire, les bains d'ultrasons permettent de dissoudre des agrégats moléculaires.
- En médecine, les ultrasons sont utilisés notamment pour l'échographie.
- En télémétrie, les ultrasons indiquent la présence d'obstacles (sous-marins, automobiles).

2. Le spectre du son

Les ondes sonores **complexes** sont composées par un certain nombre de sinusoïdes de fréquence f_n et d'amplitudes différentes. Un tel signal peut être **discrétisé** en un spectre de raies ou d'**harmoniques**. On appelle spectre d'un son la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de la fréquence.

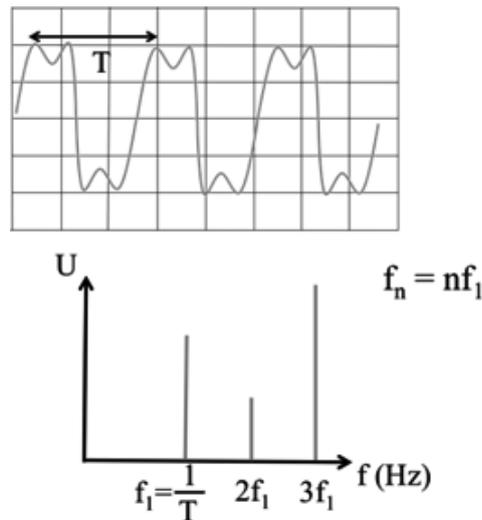
Si le spectre d'un son ne comporte qu'une seule harmonique, il est dit **pur** et correspond à une onde progressive sinusoïdale (diapason).



a. La hauteur du son

On appelle le **fondamental** l'harmonique de plus faible fréquence f_1 . Cette fréquence est une caractéristique physiologique du son émis. **Plus un son est aigu, plus f_1 est grande ; plus un son est grave, plus f_1 est faible**. Le fondamental correspond à la **hauteur** d'un son.

La fréquence de chaque harmonique est un multiple entier de la fréquence du fondamental. On a $f_n = n f_1$; $n \in \mathbb{N}^*$.



b. Le timbre du son

Les ondes sonores se distinguent également par leur **timbre**. Il est défini par le **nombre d'harmoniques d'un son et de leurs amplitudes**. Deux sons de même fréquence et de même intensité provenant de deux appareils différents se distinguent par leur timbre.

3. L'intensité sonore

L'**intensité sonore ou acoustique I** correspond à la puissance P du son transporté par unité de surface S :

$$I = \frac{P}{S}$$

I en watt par mètre carré ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), P en watt (W) et S en mètre carré (m^2).

La puissance ne dépend pas de la distance à laquelle un observateur se situe, seule l'intensité varie.

Le plus faible signal sonore pouvant être perçu par l'homme, ou **seuil d'audibilité**, est à une intensité $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Le **seuil de douleur** se note I_{max} et vaut $1,0 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Ces deux valeurs très différentes montrent la faculté exceptionnelle d'adaptation du tympan.