

BIOPHYSIQUE DE L'AUDITION

ACOUSTIQUE PHYSIQUE

I/ INTRODUCTION :

- Les sons et les ultrasons sont de même nature physique, seule la fréquence permet de les différencier.
- Un son ou un ultrason (US) est un mouvement vibratoire mécanique qui se transmet de proche en proche dans un milieu matériel $\Rightarrow$ les sons ne peuvent donc pas se propager dans le vide.
- Les émetteurs sont des objets susceptibles de transmettre des vibrations mécaniques au milieu aérien (exp : instruments de musique).
- En l'absence d'obstacle, la propagation du son se fait en ligne droite.
- Dans l'air, la célérité du son est de **330 à 340 m/s** en fonction de la pression atmosphérique.

II/ ACOUSTIQUE PHYSIQUE :

1. Définitions :

⬇ Son :

- **Objectivement :** (physique) vibrations mécaniques d'un milieu matériel.

- **Subjectivement :** sensation procurée par ces vibrations, reçue par l'oreille, puis transmise au cerveau.



Pas d'équivalence stricte entre une vibration périodique et un son $\Rightarrow$ les vibrations ne sont audibles par l'oreille humaine que dans une certaine gamme de fréquences (**20 - 20 000 Hz**) :

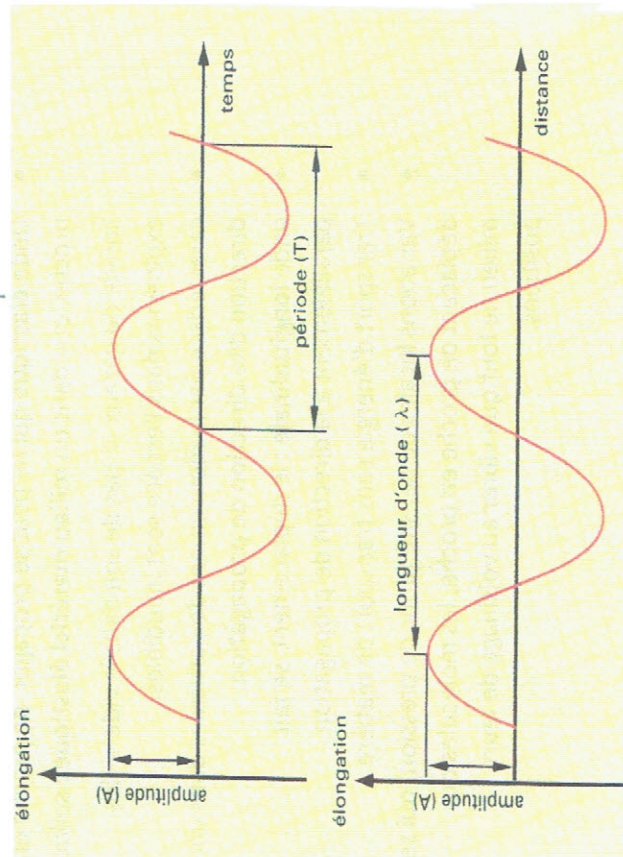
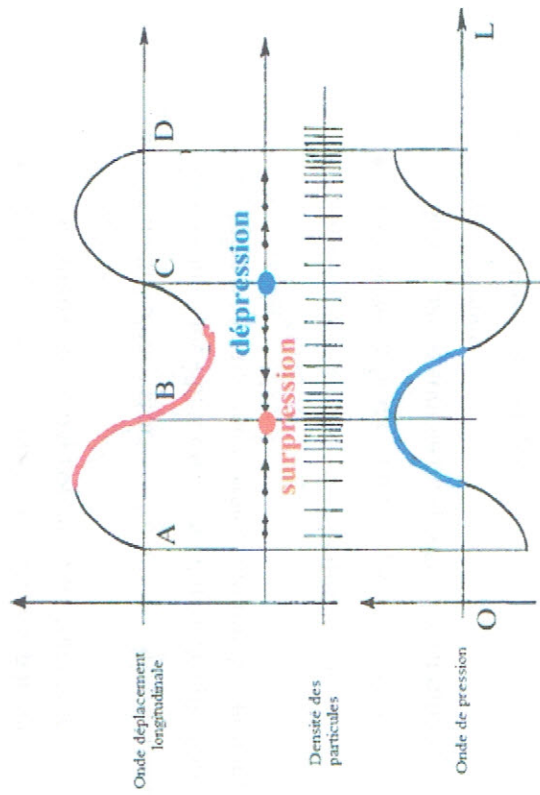
- Infra-sons : vibrations trop lentes **< 20 Hz.**
- Ultra-sons : vibrations trop rapides **> 20 000 Hz.**

Son $\Rightarrow$ partie audible du spectre des vibrations acoustiques



Onde sonore (acoustique) :

- Onde **élastique** qui ne peut se propager, de proche en proche, que dans un **milieu matériel élastique** : solide, liquide ou gazeux $\Rightarrow$ pas de son dans le vide $\Rightarrow$ les explosions dans l'espace sont inaudibles.
- caractérisée par le mouvement de particules dans une direction dite **direction de propagation**.
- onde **longitudinale** : le déplacement se fait parallèlement à la direction de propagation.
- Transport d'énergie **sans** transport de matière.
- Variations locales de densité (donc de pression) qui se déplacent de proche en proche, les molécules du milieu ne font que vibrer au voisinage de leurs positions.

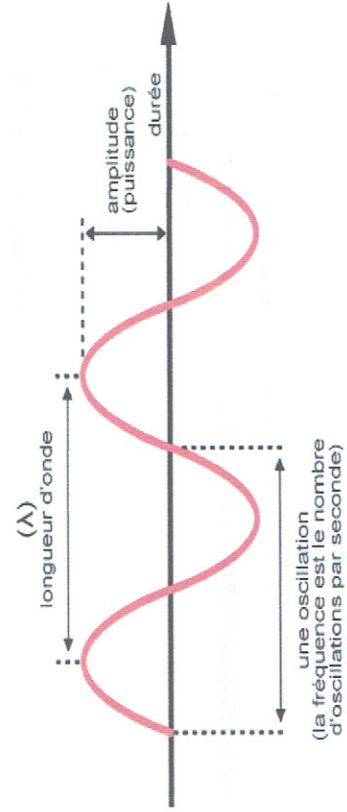
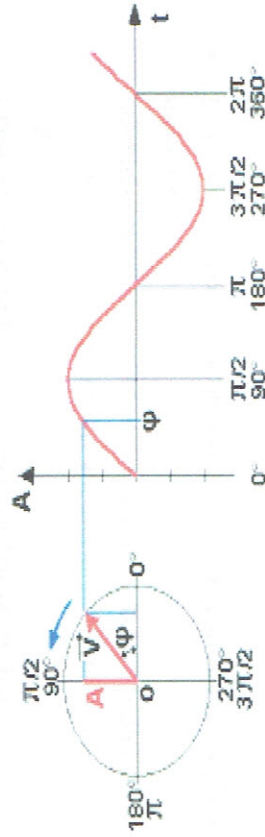


Caractéristiques d'une onde : amplitude, longueur d'onde et période.

2. Différents types de son :

A. Les sons purs :

- ⬇ Les plus simples
- ⬇ Déplacement longitudinal des particules qui entrent en vibration autour d'une position d'équilibre.
- ⬇ Ce déplacement est une fonction sinusoïdale :
$$X = A \sin \omega t$$
- A : l'amplitude = déplacement maximal de la particule.
- ω : pulsation de l'onde, $\omega = 2 \pi \nu$
- N : (ν) fréquence
- T : période = temps que met la particule pour revenir à sa position d'équilibre, $T = 1/\nu$



- La longueur d'onde λ : l'espace parcouru dans un milieu matériel donné pendant une période T .

$$\lambda = c T = c/v$$

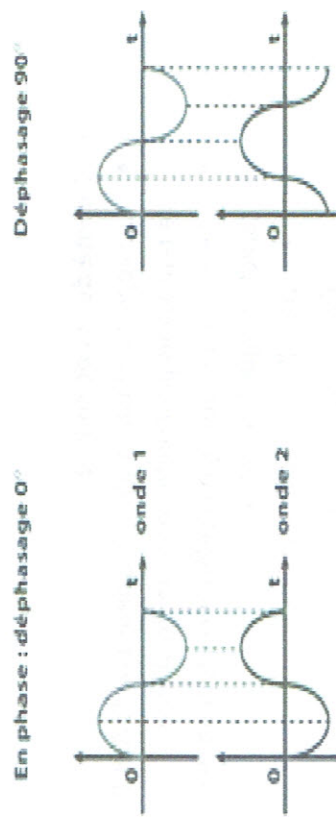
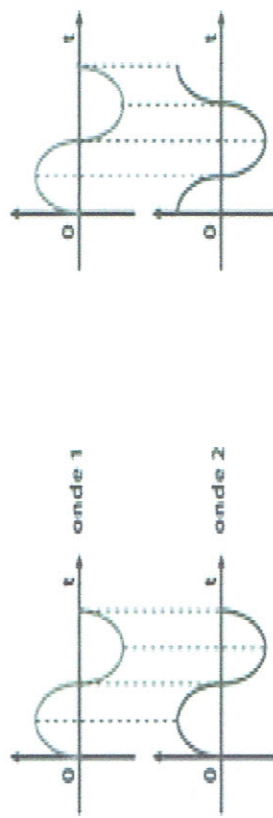
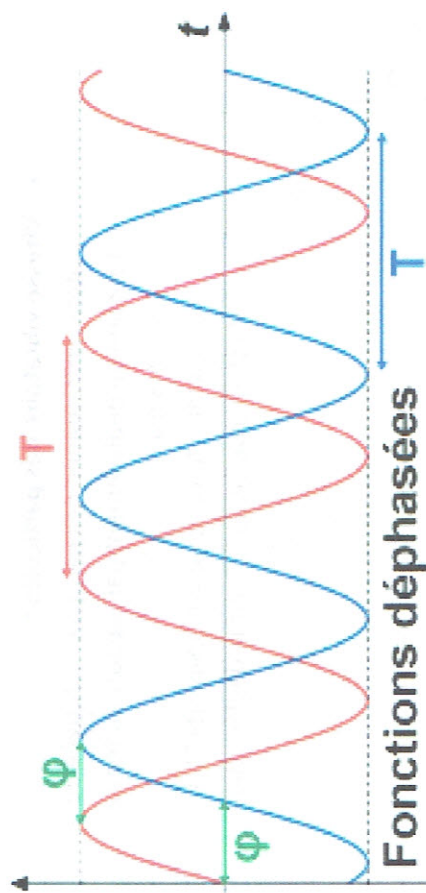
c : célérité du son dans le milieu.

- Remarques :

- la fréquence ν ne change pas d'un milieu à un autre car c est une caractéristique de l'oscillateur émetteur.
- la longueur d'onde varie en fonction du milieu car elle dépend de la célérité de l'onde dans un milieu donné.

- Notion de phase : deux sons purs peuvent entraîner les mêmes déplacements longitudinaux sur les particules d'un milieu commun, mais ces mouvements peuvent être décalés dans le temps.

Entre $x_1 = A \sin \omega t$ et $x_2 = A \sin (\omega t + \varphi)$, il n'y a pas de différence dans le mouvement des particules mais le deuxième mouvement est en avance sur le premier d'un temps $t = \varphi/\omega$



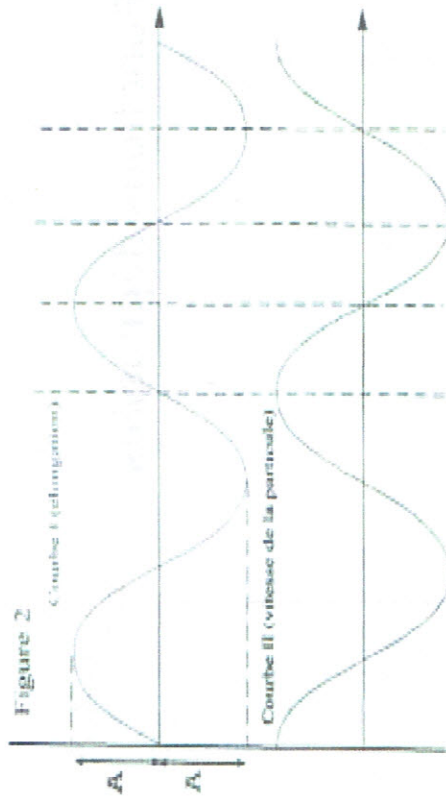
⚡ Vitesse vibratoire des particules :

Vitesse instantanée des particules : dérivée de la fonction de déplacement par rapport au temps

$$X = A \sin \omega t$$

$$V = dx/dt = A\omega \cos \omega t = A\omega \sin \omega(t + T/4)$$

V est en avance de $\frac{1}{4} T$ sur le déplacement.



⚡ Célérité de l'onde sonore :

- Le rapport de la distance entre deux points A et B sur le temps mis par l'onde pour aller de A en B.
- Si le milieu est isotrope la célérité ne dépend pas des caractéristiques du milieu :

- Dans l'air : $c = 330 - 340 \text{ m/s}$
- Dans l'eau : $c = 1450 \text{ m/s}$
- Dans les tissus mous : $c = 1540 \text{ m/s}$
- Dans l'os : $c = 3300 \text{ m/s}$

Les sons vont d'autant plus vite que les milieux sont solides.

⚡ Pulsation :

Vitesse angulaire ω (radian/s), 2π radians = 360°

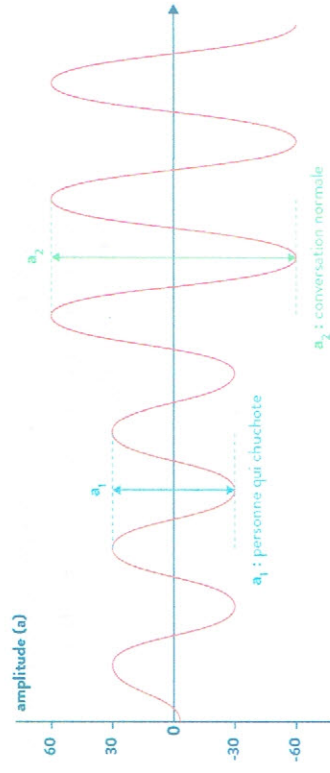
$$\omega = 2\pi \cdot N$$

N = fréquence du son (v)

⚡ Amplitude (A) (en dB):

- intensité de la vibration.
- définit les sons **forts** ou **faibles**.
- élongation maximale d'un point à partir de sa position d'équilibre, correspond aux variations de pression de l'onde sonore.
- se mesure à l'aide d'un sonomètre.

L'amplitude d'un son



⚡ Période(T) (en seconde) :

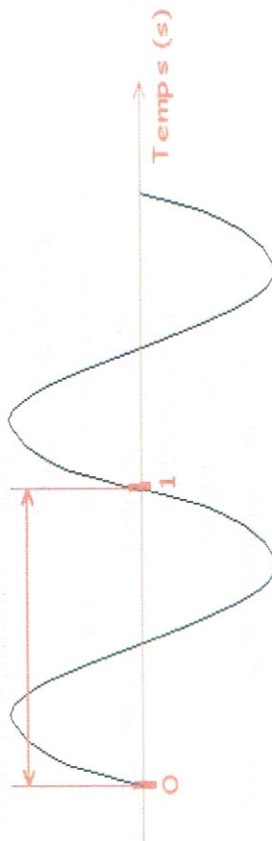
- temps au bout duquel le phénomène se reproduit identiquement à lui-même.
- cela correspond au cas où l'angle α s'accroît de 2π tel que : $T = 1/N = 2\pi/\omega$

⚡ Fréquence (N ou ν) (en seconde⁻¹ = Hz) :

- nombre de vibrations par seconde.
- définit les sons **aigus** et **graves**.
- nombre de fois par unité de temps, où le phénomène se reproduit identiquement à lui-même : $N = 1/T$
- N ne change pas quand on passe d'un milieu à un autre.

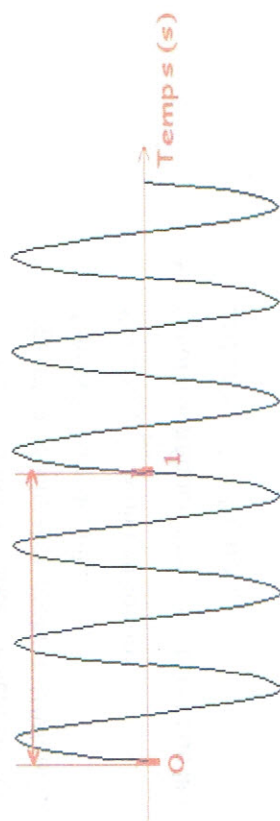
1 oscillation par seconde = 1 Hz

Son grave



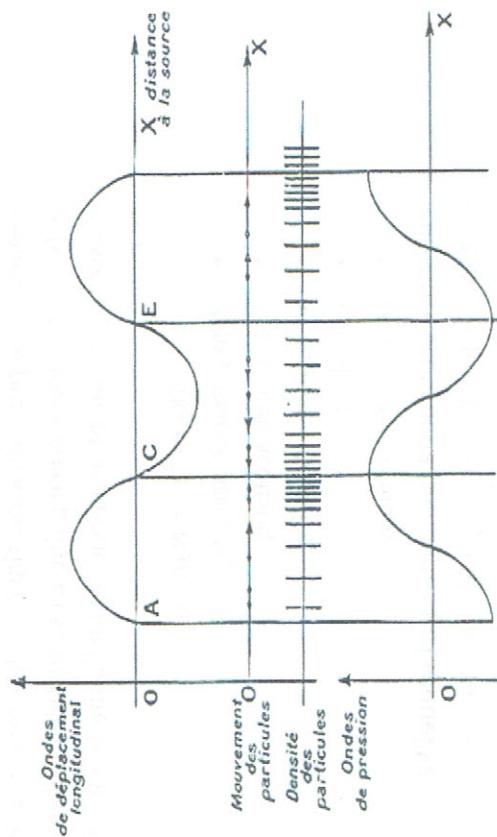
3 oscillations par seconde = 3 Hz

Son aigu



⚡ Pression acoustique :

- 1^{ère} courbe : onde de déplacement longitudinal en fonction de la distance x à la source.
- 2^{ème} courbe : déplacement des particules.
- 3^{ème} courbe : pression dans le milieu de propagation.



- Au passage de l'onde sonore, les particules subissent soit des déplacements positifs soit négatifs par rapport à leur position d'équilibre.
- Du fait de ces déplacements, il y'a soit accumulation de ces particules (surpression en C), soit raréfaction de ces particules (dépression en A et E).
- Pression acoustique $p = v \cdot \rho \cdot c$
 ρ : masse volumique du milieu considéré
 c : célérité du son dans ce milieu.

v : vitesse vibratoire d'un point du milieu animé du

mouvement $x = A \sin \omega t$.

$$v = dx/dt = A \omega \cos \omega t = A \omega \sin (\omega t + \frac{1}{2} \pi)$$

$$v = A \omega \sin (\omega t + \frac{1}{2} \pi)$$

⚡ Impédance acoustique :

L'impédance acoustique en un point d'un milieu est le rapport de la pression acoustique sur la vitesse vibratoire v de l'onde sonore en ce point, c'est aussi le produit de la masse volumique et de la célérité de l'onde sonore dans ce milieu.

$$Z = p / v = \rho \cdot c \quad (\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} = \text{N m}^{-3} \text{s}^{-1})$$

- Z : impédance acoustique
- P : pression acoustique
- V : vitesse vibratoire
- C : célérité
- ρ : masse volumique

⚡ Puissance acoustique (puissance surfacique) W :

- C'est la quantité d'énergie transportée par le son par unité de surface traversée (watts/m²).
- En rapportant la pression acoustique à l'unité de surface et à l'unité de temps on peut définir la puissance acoustique d'un son pur par :

$$W = v \cdot p$$

$$P = v \cdot p \cdot c \Rightarrow W = v^2 \cdot \rho \cdot c$$

$$v^2 = \frac{1}{2} \omega^2 A^2 \quad (\text{valeur moyenne d'une fonction sinusoïdale}) \quad \text{donc } W = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2$$

- Puissance acoustique : puissance d'une source sonore transmise sous forme de bruit aérien au milieu environnant.
 - Le niveau de puissance acoustique est une valeur caractéristique des sources sonores (machines, haut-parleurs,...), alors que le niveau sonore en un lieu dépendra de l'éloignement de la source sonore, des caractéristiques de réverbération (résonance) de la pièce, ...
 - Pour une puissance acoustique donnée, la pression acoustique dans le vocal va dépendre du milieu qui entoure la source et de la position du point de mesure. Plus on s'éloigne de la source, plus la pression acoustique décroît. Elle dépend aussi des qualités d'absorption des parois.
 - La mesure du niveau de puissance :
 - se fait toujours par comparaison avec un son de référence tel que : $W_0 = 10^{-12} \text{ watt/m}^2$
 - L'échelle des rapports W/W_0 pouvant aller jusqu'à 10^{12} , on a choisi de prendre comme unité de mesure de puissance acoustique le logarithme décimal du rapport W/W_0 et de lui donner le nom de Bel.
- $$S = \log_{10} \frac{W}{W_0} = \text{niveau sonore}$$
- On utilise fréquemment en acoustique le décibel déduit de $S = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0}$

S : la mesure en décibel du niveau sonore d'un son de puissance W par rapport au son de référence de puissance W_0 .

- Donc le décibel est une unité qui sert à comparer entre 2 sons :
 - ✓ l'un est un son de référence W_0 exprimé en décibels absolus
 - ✓ l'autre un son de puissance W

B. Les sons complexes :

- Produits par des particules animées de mouvements **périodiques** mais qui **ne sont plus sinusoïdaux** (fréquences, phases et/ou amplitudes différentes).
- D'après le **théorème de Fourier** : « Tout mouvement périodique peut être considéré comme la superposition d'un nombre fini ou infini de mouvements sinusoïdaux d'amplitudes diverses et dont les fréquences sont des multiples entiers de celle de l'un d'eux. »

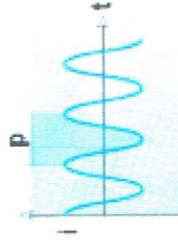
• Il faut donc distinguer dans un son complexe :

- **Le son fondamental** : son pur de fréquence N (la plus petite).
- **Un certain nombre d'harmoniques** : de fréquences plus élevées, multiples entiers de N.
- **Partiels** : sons purs dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fréquence N.
- D'où $y = A_1 \sin(2\pi Nt + \varphi_1) + \dots + A_n \sin(n2\pi Nt + \varphi_n) + \dots$

- Les analyseurs de son permettent de reconstruire le spectre d'un son complexe sous forme de **raies** en fonction de la fréquence.

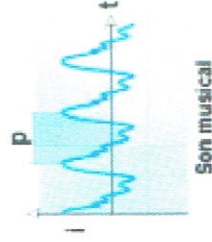
C. Les bruits :

- Sons complexes.
- Dus à des vibrations **non périodiques**.
- Les fréquences sont infiniment voisines.
- Spectre **continu**.



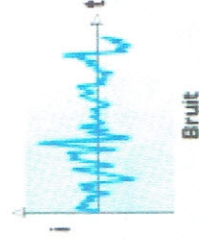
Son pur : la vibration est caractérisée par une seule fréquence.

(p=période, t=temps, i=intensité)



Son musical : à la même fréquence fondamentale que le son pur ci-dessus s'ajoutent des harmoniques (fréquences plus aiguës, multiples entiers de la fréquence fondamentale) qui caractérisent le timbre de l'instrument ou de la voix.

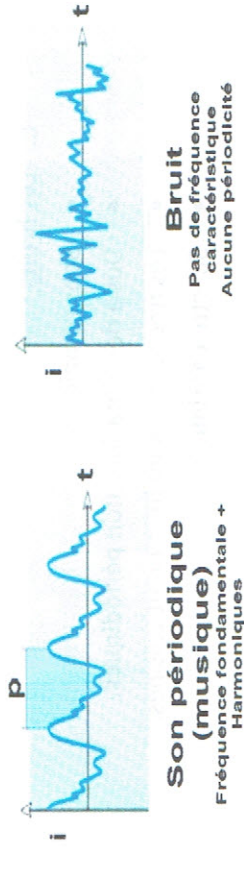
(p=période, t=temps, i=intensité)



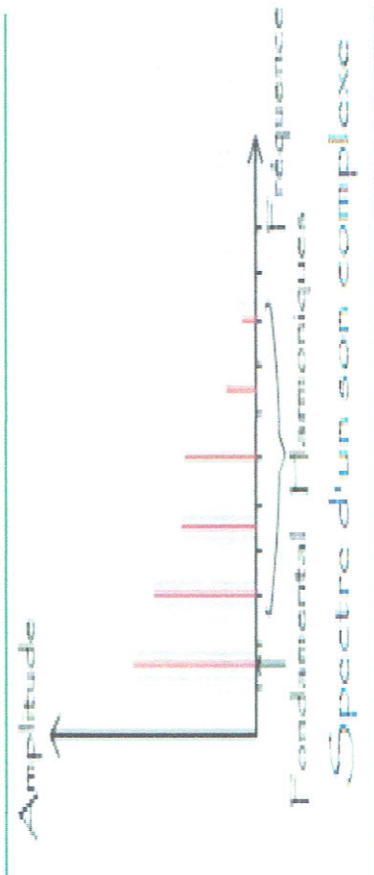
Bruit : pas de fréquence caractéristique.

(t=temps, i=intensité)

Sons complexes



Spectre d'un son pur



3. Propagation des ultrasons dans les milieux :

- Les ondes ultrasonores se comportent comme des ondes lumineuses et respectent les mêmes lois que celles de l'optique classique.
- Lorsqu'un faisceau ultrasonore tombe sur une interface, on observe les 2 phénomènes suivants :
 - Une partie du faisceau est **réfléchi** sur l'interface et la réflexion est d'autant plus grande que la différence d'impédance entre les 2 milieux est grande. Donc une interface liquide-gaz ou tissu-gaz est pratiquement impénétrable aux ultrasons.
 - L'autre partie du faisceau est **transmise** (par réfraction) dans le second milieu avec une atténuation d'autant plus forte que l'on s'éloigne de l'interface.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c_1}{c_2}$$

c_1 et c_2 : célérité de l'onde ultrasonore dans les milieux 1 et 2.

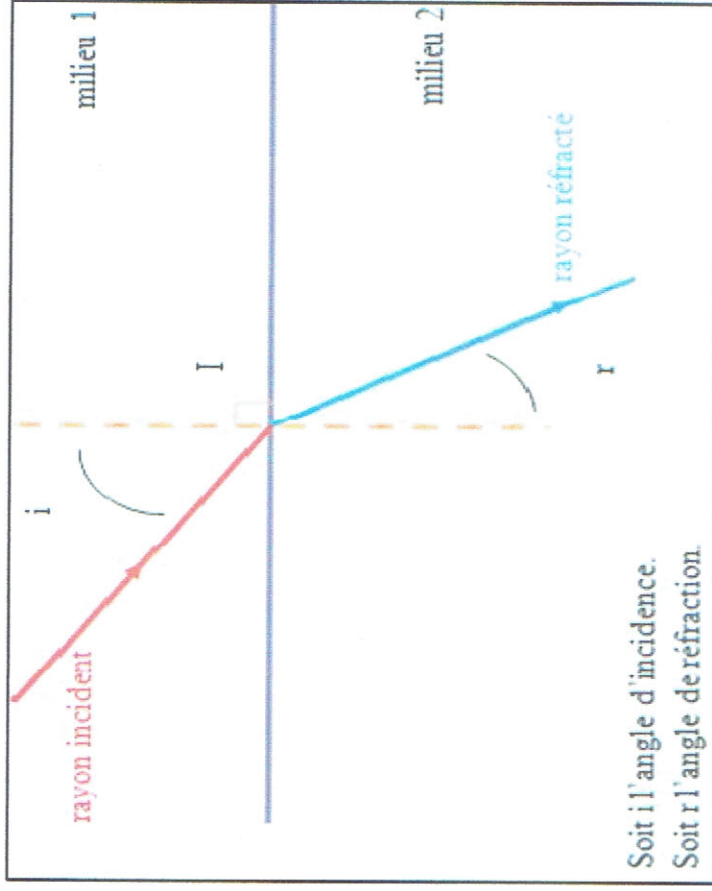
- Si on considère des ondes placées sous incidence normale, Z_1 et Z_2 sont les impédances acoustiques des milieux 1 et 2, on définit ;

- **coefficient de réflexion :**

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I} \quad \text{donc} \quad \alpha_r = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

- **coefficient de transmission :**

$$\alpha_t = \frac{I_t}{I} \quad \text{donc} \quad \alpha_t = \frac{4 Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$



- Les ondes sonores s'atténuent au cours de leur propagation :
 - **Par l'accroissement de surface de l'onde** : l'énergie totale répartie sur l'onde ne change pas lorsque la surface d'onde augmente. Il en résulte que l'énergie par unité de surface d'onde varie suivant une loi $1/d^2$; c'est-à-dire que : $1 \cdot d^2 = \text{constante}$
 - ✓ 1 : intensité de l'onde en un point
 - ✓ d : distance du point considéré à la source
 - **par l'amortissement des vibrations** : plusieurs phénomènes interviennent. Ces phénomènes provoquent une atténuation exponentielle. $I = I_0 e^{-\alpha x}$
 - ✓ I : intensité à la distance x de la source
 - ✓ I_0 : intensité au niveau de la source
 - ✓ α : coefficient d'absorption, varie comme le carré de la fréquence, l'atténuation est plus forte aux hautes fréquences, d'où l'utilisation des sondes de 7,5 MHz pour les explorations peu profondes comme la thyroïde ou de sondes de 2,5 MHz pour des explorations hépatiques.

- Comme l'intensité incidente ne peut être que réfléchie ou transmise, on doit avoir : $\alpha_t + \alpha_r = 1$

- exemples :

- Interface tissu adipeux-muscle : $\alpha_r = 0,007$, $\alpha_t = 0,993$
- Interface cerveau-crâne : $\alpha_r = 0,36$, $\alpha_t = 0,64$
- Interface muscle-gaz intestin : $\alpha_r = 0,94$, $\alpha_t = 0,06$

Ce dernier couple de valeurs montre l'impossibilité d'utiliser l'échographie au niveau des parties anatomiques renfermant de l'air (poumons, intestins).