

Biophysique de l'audition

Dr. S.M Meghelli - 2^{ème} A. médecine-
(Faculté de médecine de Tlemcen)

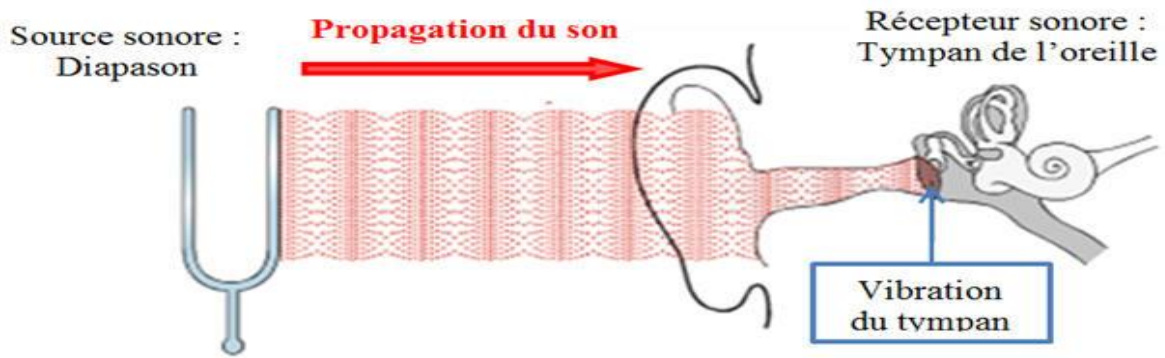
I/ Introduction

- Les sons et ultrasons sont de même nature physique, seule la fréquence permet de les différencier.
- De façon générale, un son ou un ultrason (US) est un mouvement vibratoire mécanique qui se transmet de proche en proche dans un milieu matériel.
- 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) Introduction :

- Acoustique est la science des sons.
- Terme « Son » désigne:
 - Phénomène physique de Vibration Mécanique des Milieux Matériels
 - Sensation que certaines vibrations entraînent chez l'homme par l'intermédiaire de l'Ouïe.
- Toutes les vibrations ne sont pas Audibles:
 - Certaines sont trop Lentes = Infra-Sons < 20 Hz
 - Certaines sont trop Rapides = Ultra-Sons > 20 000 Hz
- On constate qu'un Écran placé sur le trajet du son est repoussé, et se met à vibrer (Vitre, Tympan). Cela matérialise l'existence d'une onde sonore, qui développe au niveau de l'écran une Pression.
- Ondes sonores sont des ondes longitudinales caractérisées par des fluctuations de densité et de pression (16 Hz à 20 000 Hz).

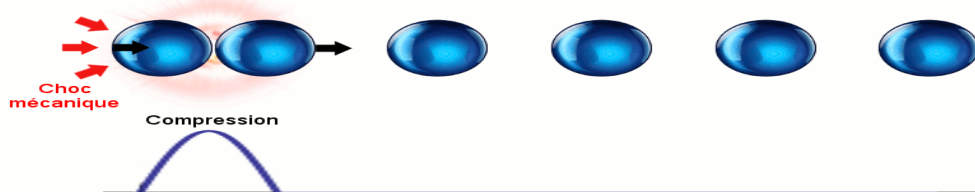


Son = vibration matérielle, ne se propage pas dans le vide.

- Propagation de l'**Ébranlement Mécanique** de l'onde sonore, se fait le long d'un rayon sonore par **Transmission** de l'ébranlement d'une particule matérielle à sa **Voisine**.
- La Propagation résulte donc des propriétés mécaniques et en particulier de l'**Élasticité** de la matière.

L'ébranlement se propage avec une célérité «*c*» dépendant des propriétés physiques du milieu (compressibilité, densité).

- Lors du passage du l'ébranlement en un point, les particules du milieu matériel oscillent autour de leur position d'équilibre.



- Le passage de l'onde s'accompagne donc de la **Variation** de **Pression** dans le milieu, c-à-d des zones de compression et de raréfaction de l'air qui correspondent à des variations de pression de l'ordre de 10^5 Pa.
- **Son**: peut être défini comme représentant la partie audible du spectre des vibrations acoustiques, de même que la lumière (partie visible du spectre des vibrations EM).
- **Audition = 2 paramètres essentiels**:
- Fréquence ou nombre de vibrations par seconde (**Hz**) qui définit les sons **aigus** et **graves**
- Intensité ou Amplitude de la vibration (**dB**) qui définit les sons **forts** ou **faibles**.
- Oreille est extrêmement sensible, les sons les plus imperceptibles font bouger le tympan d'environ un **1/100 000 de mm**, valeur suffisante pour y être traité par notre cerveau.

2) LES PARAMETRES PHYSIQUE DU SON

→ Le son est un signal physique

- Le son est une vibration qui se transmet de proche en proche, dans un milieu matériel, avec un transport d'énergie sans transport de matière.

A retenir : Pas de son dans le vide (les explosions dans l'espace sont inaudibles)

→ **Le son se propage comme une onde**

- L'air vibre, (mais reste sur place), alors que l'onde se propage de proche en proche sur de grandes distances (interactions +++ : L'onde qui se propage va subir des interactions, par exemple des réflexions sur les murs d'une salle, qui font que le son va revenir vers nous)

Exemple : Pièce : Si la fenêtre s'ouvre à l'intérieur, et la porte à l'extérieur, l'ouverture brusque de la fenêtre comprime l'air et la porte s'ouvre.

→ Il existe une compressibilité de l'air. Cette notion permet de comprendre la notion d'onde sonore.

- Il existe deux sortes de son :

- **Les sons purs**
- **Les sons complexes.**

A) Les sons purs

Ce sont les sons les plus simples.

→ Ils trouvent leur origine dans les vibrations périodiques et de même fréquence d'un ensemble de particules.

→ La propagation de ces vibrations donnera naissance à l'onde sonore.

- Dans un milieu homogène, une onde acoustique se propage en ligne droite. - La célérité **c** de cette onde s'exprime en **m.s-1**.

- La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde durant l'intervalle d'une période T

$$\lambda \text{ (m)} = c \text{ (m.s-1)} \cdot T \text{ (s)}$$

A.1 CARACTÉRISATION DES SONS PURS

A.1.1 État Vibratoire en un Point

1°- Élongation

L'élongation d'un point du milieu matériel est une fonction sinusoïdale du temps, telle que :

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

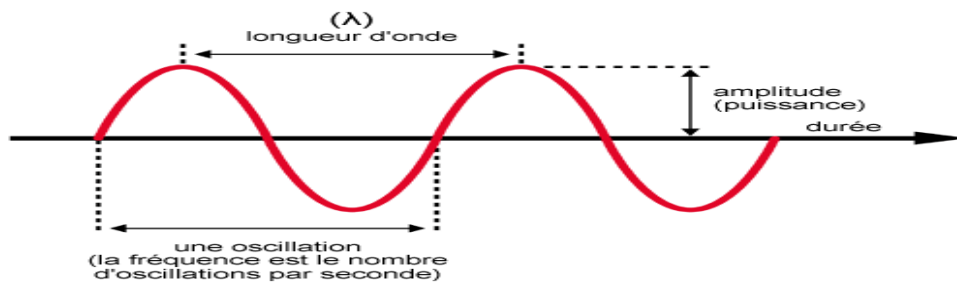
A : l'amplitude ou le déplacement maximal de la particule.

ω : la pulsation de l'onde, $\omega = 2\pi \nu$

N est la fréquence et $T=1/\nu$, T étant la période .

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

Si c est la célérité du son dans ce milieu, on a : $\lambda = cT = c/v$

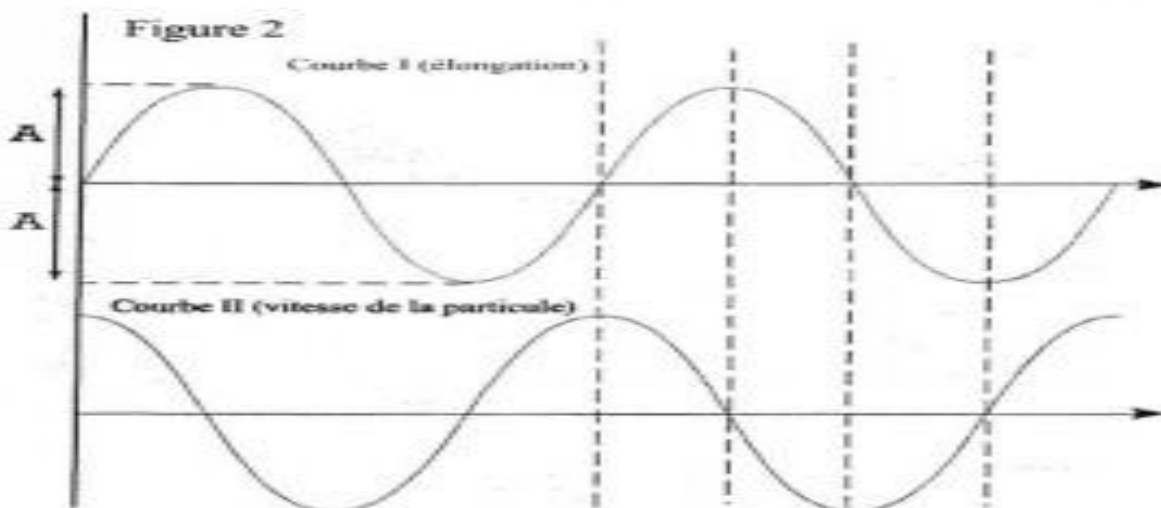


2°- Vitesse vibratoire des particules et célérité de l'onde sonore.

→ la vitesse vibratoire ou vitesse instantanée des particules est la dérivée par rapport au temps de la fonction de déplacement $x : A \sin \omega t$

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

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



→La célérité est la vitesse au sens classique du terme, c'est-à-dire le rapport de la distance entre 02 points A et B sur le temps mis par l'onde pour aller de A en B.

dans l'air $c = 330 \text{ à } 340 \text{ m/s}$

dans l'eau $c = 1450 \text{ m/s}$

dans le tissu mou $c = 1540 \text{ m/s}$

dans l'os $c = 3300 \text{ m/s}$

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

3°- Pulsation

Pulsation = vitesse Angulaire (ω)

exprimée en radian/seconde (2π radians = 360°)

telle que : $\omega = 2\pi.f$

f = fréquence du son.

4°- Amplitude

Amplitude (a) = élongation maximale d'un point à partir de sa position d'équilibre, et correspond aux variations de pressions de l'onde sonore.

En Musique, (a) = intensité du son = niveau sonore S ou L.

En pratique se mesure à l'aide d'un sonomètre (0 et 150 dB).

5°- Période

Période (T) = temps au bout duquel le phénomène se reproduit identiquement à lui-même (x, v et γ).

Cela correspond aux cas où l'angle α s'accroît de 2π ou d'un multiple de 2π , telle que : $T = 1/f = 2\pi/\omega$ (seconde)

6°- Fréquence

Fréquence (f) = nombre de fois par unité de temps, où le phénomène se reproduit identiquement à lui-même:

$f = 1/T$ (seconde⁻¹ = Hz)

Seule f ou T est caractéristique d'un son.

f ne change pas quand on passe d'un milieu à un autre.

A1.2. Pression- puissance et impédance acoustique

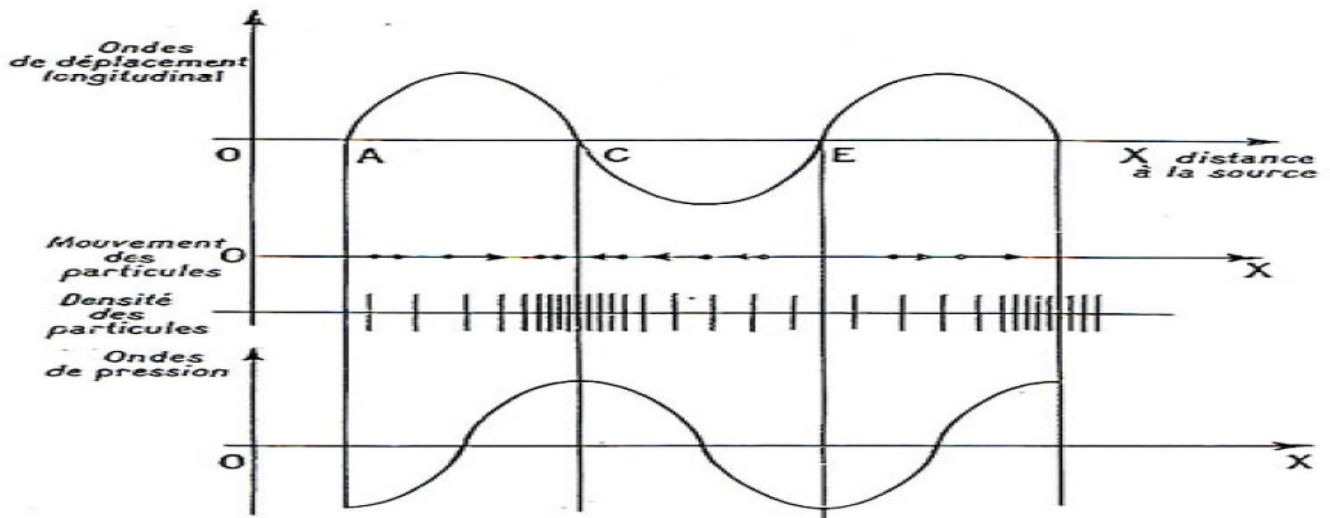
1- Pression acoustique et densité des particules

- Considérons l'onde de déplacement longitudinal en fonction de la distance X à la source (1ere courbe).

- La 2e courbe représente le déplacement des particules.

- La 3e courbe représente la pression dans le milieu de propagation.

➤ Au passage de l'onde sonore, les particules subissent des déplacements soit 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).



On définit la pression acoustique (en pascal) comme le produit:

$$p = v \cdot \rho \cdot c$$

avec ρ = masse volumique du milieu considéré

c = célérité du son dans ce milieu

2- Impédance acoustique

C'est une grandeur particulièrement importante pour caractériser un milieu.

L'impédance acoustique en un point d'un milieu est égale au 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.

$$\text{Soit } Z = p/v = \rho \cdot c = \text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} = \text{N.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$$

Soit Z = impédance acoustique

p = pression acoustique

v = vitesse vibratoire

c = célérité

ρ = masse volumique

3- puissance acoustique (ou puissance surfacique) L_w

La puissance acoustique surfacique W est la quantité d'énergie transportée par le son par unité de surface traversée et s'exprime en watts/m².

En rapportant la pression acoustique à l'unité de surface et à l'unité de temps, on peut définir la puissance acoustique W d'un son pur par les relations:

$$W(x,t) = v(x,t) \cdot P(x,t) \text{ et comme } p = v \cdot \rho \cdot c \rightarrow W = v^2 \cdot \rho \cdot c$$

de plus, $v^2 = \frac{1}{2} \omega^2 A^2$ (valeur moyenne d'une fonction sinusoïdale).

$$\text{D'où } W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot \omega^2 A^2$$

On entend par puissance acoustique P la puissance d'une source sonore transmise sous forme de bruit aérien au milieu environnant. Comme pour la pression sonore (acoustique), on utilisera la notion plus pratique de niveau de puissance acoustique L_w :

$$L_w = 10 \log[P/P_0]$$

où, P = puissance acoustique en Watt (W)

p_0 = puissance acoustique de référence = 10^{-12} W

L_w est également exprimé en décibels (dB). (Attention aux confusions avec le niveau sonore)

Le niveau de puissance acoustique est une valeur caractéristique de 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, ...

Lien entre puissance acoustique et niveau sonore

Le niveau de puissance acoustique est une valeur caractéristique des sources sonores (machines, haut-parleurs, ...). Pour une puissance acoustique donnée, la pression acoustique dans le local va dépendre du milieu qui entoure la source et de la position du point de mesure. Plus on s'éloigne de la source sonore, plus la pression acoustique décroît. Elle va dépendre également des qualités d'absorption des parois.

On pourrait établir une analogie avec une lampe d'éclairage : elle possède une puissance donnée mais le niveau d'éclairage dépend de la distance à laquelle on se trouve de la lampe.

De plus, le niveau d'éclairage (= de pression acoustique) est plus élevé dans une pièce dont les murs sont blancs (= dont les murs sont réfléchissants) que lorsque les murs sont sombres (= dont les murs sont absorbants).

Mesure du niveau de puissance acoustique

- Pressions acoustiques varient dans un rapport de 10^6
- Puissances surfaciques varient dans un rapport de 10^{12} .
- Donc, l'utilisation d'une échelle Log_{10} sera plus adaptée.
 - On appelle : **Bel** = $\log_{10} W_1/W_2 = L_1 = S = \text{Niveau Sonore}$
 - On obtient: **Échelle Trop Tassée (0 à 12)**. Pour cela, on choisie le **dB**
 - Donc, le Niveau L_1 sera égal à : **$10 \cdot \log_{10} W_1/W_2$ (dB)**
 - Par conséquent on obtient une Échelle qui varie de **0 à 120 dB**.
 - La mesure du niveau de puissance acoustique se fait toujours par comparaison avec un son de référence tel que: **$W_0 = 10^{-12}$ watt/m²** = Puissance correspondant au **Seuil d'Audibilité** pour une **Fréquence** de **1 000 Hz** à une **Pression** de **$2 \cdot 10^{-5}$ Pa**.
- S ou L est la mesure en décibel du niveau sonore d'un son de puissance W par rapport au son de référence de puissance W_0

Conclusion :

- Le dB est une unité qui sert à comparer entre eux 2 sons:
 - l'un est un son de référence W_0 exprimé en dB Absolus
 - l'autre un son de puissance W_1 .
- Au lieu de considérer un rapport W_1/W_0 qui pour des sons audibles peut varier de 1 à 10^{12} , on considère le \log_{10} de ce rapport.

Ainsi un niveau sonore $L_1 = 0 \text{ dB} \rightarrow 10 \text{ Log } W_1/10^{-12}$ correspond à un son de puissance $W_1 = 10^{-12}$ qui est la limite d'Audibilité.

Exemple :

- Quel est le niveau sonore obtenu par la superposition de 2 sons de niveau $L \text{ dB}$ chacun?

➤ Réponse :

- 2 sons de **100 dB** ensemble, donnent un niveau **$L_s = 103 \text{ dB}$** .
- 2 sons de **10 dB** ensemble, donnent un niveau **$L_s = 13 \text{ dB}$** .
- 2 sons de **0 dB** ensemble, donnent un niveau **$L_s = 3 \text{ dB}$** .
- 2 sons de **-2 dB** (Inaudibles) ensemble, donnent un niveau **$L_s = 1 \text{ dB}$**

➤ Démonstration :

- Superposer 2 sons de même niveau revient à doubler W
- Donc le niveau de superposition **$L_s = 10 \log_{10} 2W/W_0$**
- Tel que **$L_s = 10 \log_{10} 2 + 10 \log_{10} 2W/W_0 = 3 + L$** car **$\log_{10} 2 = 0,3$**

▪ Rappel mathématique sur les propriétés des logarithmes

- $\log X = \log_{10} X = y$ si $X = 10^y$
- "Le logarithme en base 10 d'un nombre est l'exposant auquel il faut soumettre 10 pour retrouver le nombre".
- ex : $\log(10) = 1$, $\log(100) = 2$, ... ,
- $\log(10\,000) = 4$, ...
- propriétés
 - $\log(X.Y) = \log X + \log Y$
 - $\log(X^2) = \log(X.X) = 2 \log X$
 - $\log(2X) = \log X + \log 2 = \log X + 0,3$

A.1.3- Propriétés de l'Onde Sonore

1° Réflexion et réfraction

LE SON

Phénomène de réflexion et transmission en incidence normale

Définition du **coefficient de réflexion** (il s'exprime en général en pourcentage de l'onde incidente) :

$$R = \frac{|Z_1(\text{milieu}_1) - Z_2(\text{milieu}_2)|}{Z_1 + Z_2}$$

$$\text{Coef. de transmission : } T = 1 - R$$

Onde en incidence normale



Réflexion d'une partie de l'onde

Transmission d'une partie de l'onde

Plus la différence d'impédance sera grande entre les milieux 1 et 2 :

- plus l'énergie réfléchi sera grande
- plus l'amplitude des échos sera grande
- plus le défaut sera visible

2°- Diffraction d'un son

- L'effet d'un obstacle sur la propagation des sons n'est facile à décrire que pour des sons **Purs**.

a- Absorption

- Si la surface de l'obstacle n'est pas **Dure** et **Rigide**, une partie du son peut être absorbée.

b- Réflexion

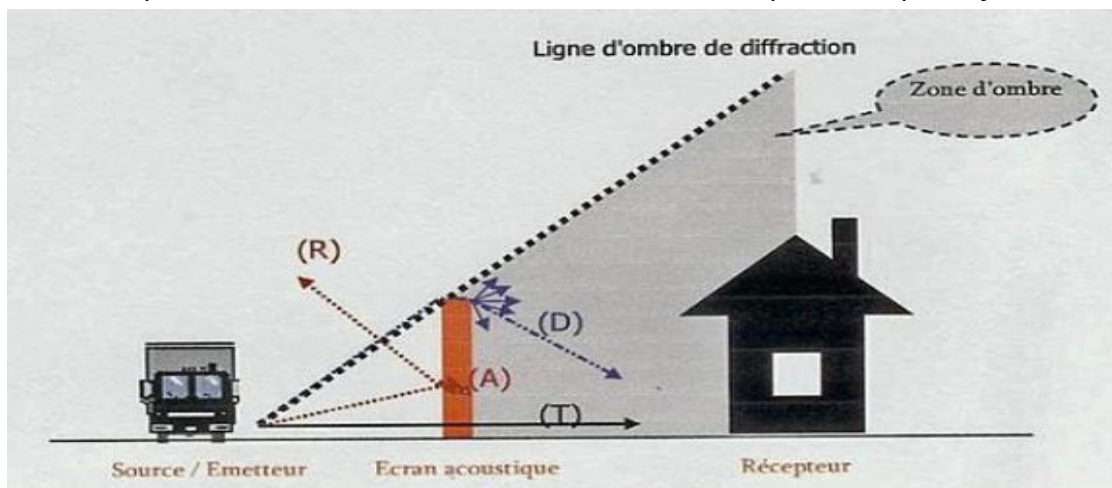
- Sur un obstacle **Rigide** et **Massif** dont les dimensions (**L**) sont supérieures à la longueur d'onde du son λ_s , ce dernier se réfléchit.

c- Diffusion

- Si $\lambda_s \gg L$; gouttelettes de **Brouillard** dans l'atmosphère. L'obstacle va se comporter comme une source secondaire.

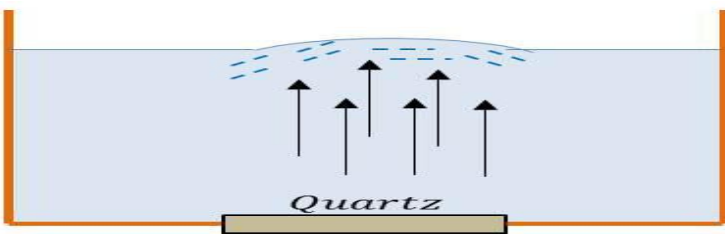
d- Diffraction

- Son peut contourner les obstacles. Diffraction est importante quand **f** est basse.



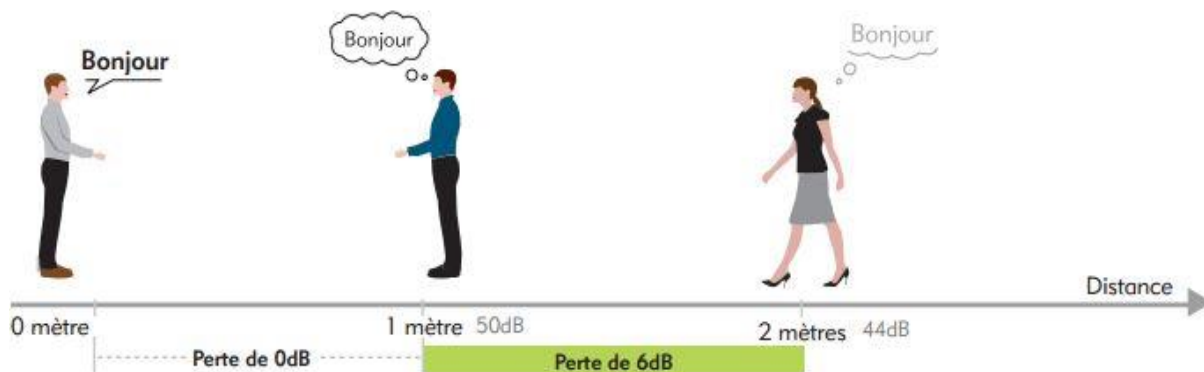
3°- Pression de radiation

- S'il y a un obstacle (**Écran**) sur le trajet d'une onde, alors l'obstacle est repoussé.
- L'onde exerce une certaine pression dite **Pression de Radiation** qui est différente de la pression acoustique.
- Si l'onde a une grande énergie, cette pression de radiation peut être importante.
- Sur une interface **Air-Eau** une onde aérienne sonore propagée dans l'eau peut déformer l'interface et projeter en l'air un véritable Geysier.



4°- Absorption du son

- Loi ($1/d^2$) → affaiblissement du son pour des motifs purement géométriques, tout en supposant qu'il n'y a pas d'absorption d'énergie sonore par le milieu vibrant.
- Milieu vibrant absorbe un peu d'énergie sonore par 2 mécanismes :
 - **Viscosité** → frottement des molécules vibrantes entre-elles
 - **cession de chaleur** → particules voisines



B) Les sons complexes

Un son complexe est une somme de sons purs, c'est-à-dire l'association de plusieurs ondes acoustiques de fréquences, de phases et/ou d'amplitudes différentes (sons non sinusoïdaux).

Notion de phase: 02 sons purs peuvent entrainer les mêmes déplacements longitudinaux sur les particules d'un milieu commun, mais ces mouvements peuvent être décalés dans le temps.

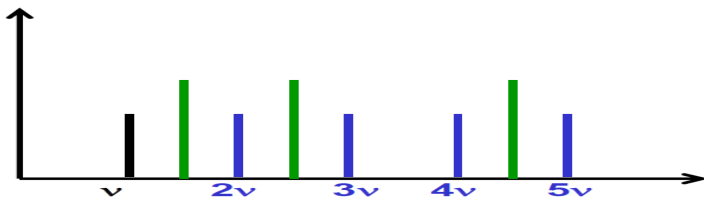
Le théorème de Fourier indique que « toute fonction périodique peut être décomposée en une somme de fonctions sinusoïdales de fréquences qui sont les multiples d'une fréquence fondamentale ». (Jean Baptiste Fourier : mathématicien français).

Il faut donc distinguer dans un son complexe:

- **Son Fondamental** : son pur dont la fréquence est la plus petite (ν).
- **Harmoniques** : faciles a mettre en évidence dans un spectre de raie. Ce sont des sons purs dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence ν .
- **Partiels** : sons purs dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fréquence ν . Sur le plan musical, plus il y a de partiels, plus le son est dit riche.

Il existe deux sortes de sons complexes :

- Les sons complexes **périodiques, répétés identiques a eux-mêmes au bout d'une période T**. Exemple : un violon.
- Les sons complexes **non périodiques ou bruits**. Exemple : un tambour.



III/ Les phénomènes objectifs de l'audition

- La biophysique de l'audition repose sur l'étude du signal et de la chaîne de mesure de l'audition.
- Ce signal ou onde sonore correspond à une forme spécialisée d'énergie.

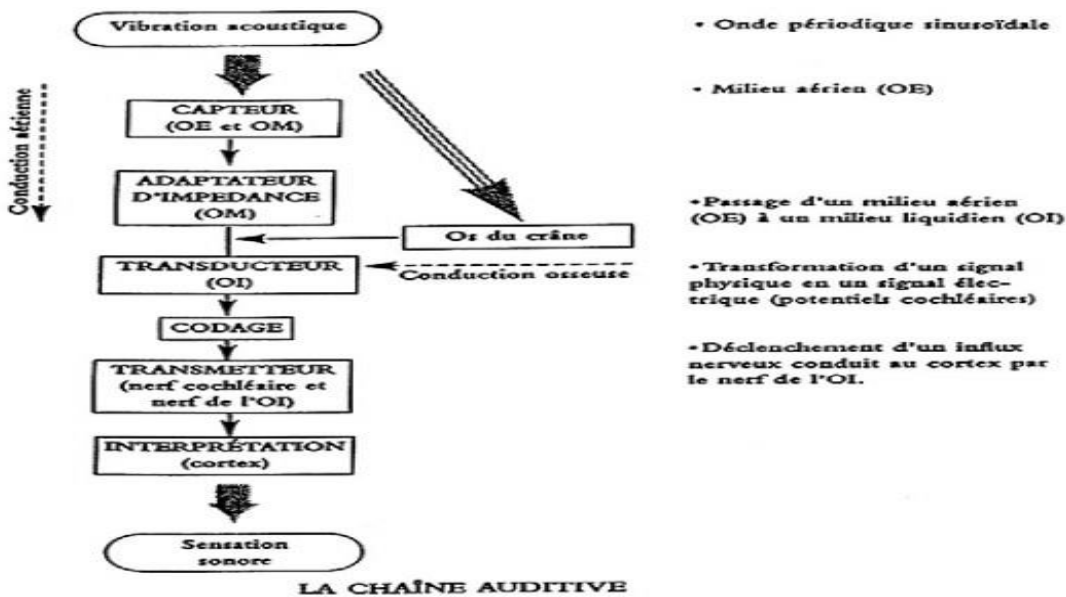
L'oreille (pavillon) est le capteur, on a transduction (via l'oreille interne) aux voies nerveuses puis aux centres nerveux.

On a 2 types de conductions par vibration :

- Aérienne (OE, OM, OI)
- Osseuse (par les os du crâne)

L'OM sert d'adaptation d'impédance.

Le codage nerveux est transmis par les nerfs et interprète par le cortex cérébral , procurant ainsi la sensation sonore.



- L'onde sonore est transmise au tympan, qui, par vibration va transmettre son signal a l'OM (oreille moyenne) via la chaine des osselets jusqu'a la fenêtre ovale.
- La variation de pression modifie celle des fluides cochléaires, dans la cochlée, les cellules ciliées de la membrane basilaire ont un rôle important.
- Selon leur inclinaison, on a une polarisation différente et donc un message différent.

A) l'oreille externe

- Elle est constituée du pavillon et du conduit auditif externe.
- Elle est séparée de l'OM par la membrane tympanique. Le pavillon capte le signal sonore, il est important car il sert dans la stéréophonie et dans l'amplification du son.

Ex: perte du pavillon : pose d'oreilles en silicone, pavillon artificiel.

B) L'oreille moyenne:

- L'oreille moyenne reçoit l'onde sonore au niveau du tympan et la transmet à l'oreille interne. Elle transmet et amplifie la fonction acoustique.

Elle est constituée par:

- La caisse du tympan creusée dans l'os temporal et remplie d'air
- Le tympan
- La chaîne des osselets (malleus, incus, stapes)
- La fenêtre ovale et la fenêtre ronde.

Ceci est possible grâce aux muscles accompagnant la chaîne des osselets (muscle tenseur du tympan / du marteau et le muscle stapédien). Ils permettent :

- l'accommodation.
- la cohésion de la chaîne des osselets.
- la protection contre les sons intenses.
- la localisation spatiale du son.
- le maintien de l'attention auditive.

C) L'oreille interne

C'est une partie complexe qui contient un organe d'équilibration ou vestibule (canaux circulaires) et un organe d'audition ou cochlée. Ces deux systèmes sont réunis par un liquide semblable au LCR.

L'OI est chargée de transformer les variations de pression acoustique transmise par l'OM en un message nerveux conduit par le nerf cochléaire sous forme de potentiel d'action.

Remarque: Cette transformation d'un signal physique en signal nerveux est appelée transduction.

L'OI contient le labyrinthe osseux à l'intérieur duquel se trouve le labyrinthe membraneux.

Le labyrinthe osseux est creusé dans l'os temporal

et comprend 3 parties:

- les canaux semi-circulaires osseux
- le vestibule
- le limaçon osseux ou cochlée.

En audition on ne parlera que du limaçon ou cochlée.

-Sous l'action de l'étrier, une pression sonore est transmise à la fenêtre ovale.

La périlymphe transmet la pression à la membrane de Reissner qui, par l'endolymphe, la transmet à la membrane basilaire qui agit sur le périlymphe de la rampe tympanique et la pression est finalement transmise à la fenêtre ronde qui sert de soupape.