

Chapitre 8 : Sons et Ultrasons

Applications - échographie et Doppler

Public cible :

Ce cours est destiné aux étudiants de la première année Docteur Vétérinaire, il est conseillé à toute personne qui veut avoir une idée sur le son et l'ultrason.

Pré requis :

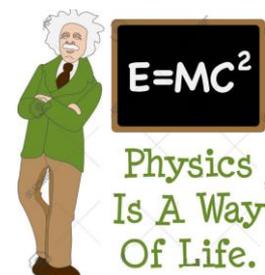
- Connaissance de la période, la fréquence, la longueur d'ondes et de l'amplitude.
- Relation $v = d / \Delta t$

Connaissances :

- La nature et les propriétés physiques des ondes sonores et Ultrasonores.
- Production, propagation et principe des Ultrasons
- Principe et modes de l'échographie.
- Principe et modes de l'écho-Doppler.

Compétences attendues :

- Déterminer les caractéristiques d'un signal (Ultra) sonore.
- Définir la piézoélectricité directe et inverse.
- Expliquer la propagation des US dans un milieu biologique.
- Comprendre le fonctionnement d'une échographie.
- Déterminer la profondeur et la taille d'un organe.
- Discuter le choix de la fréquence ultrasonore.
- Expliquer l'effet Doppler.
- Déterminer la fréquence Doppler.
- Distinguer les modalités d'échographie et doppler



Patrie 1 : Ondes sonores et Ultrasonores

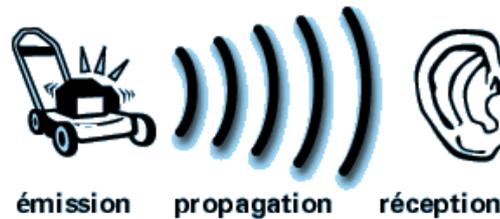
I) Le son : un phénomène physique ondulatoire

1- Définitions

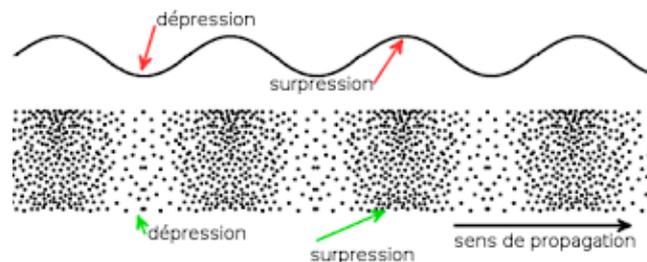
- Le **son** est une **onde mécanique** produite par tout **corps solide, liquide, ou gazeux** qui rentre en **vibration** et qui se propage dans un **milieu élastique** (qui se déforme sous au passage d'une onde mécanique, et reprend sa forme initiale lorsqu'elle disparaît), avant de se transmettre à notre oreille.

Trois **éléments** permettent l'**existence** du son :

- une **source**, produisant une vibration mécanique.
- un **milieu porteur**, transmettant cette vibration.
- un **récepteur**, l'oreille, qui reçoit cette vibration.



- **Onde sonore** ou **onde acoustique** est une **onde longitudinale** qui se propage de proche en proche par **compression** et **décompression** des molécules dans un milieu matériel. Les ondes longitudinales sont des ondes qui ont la même direction de vibration que leur direction de déplacement.



Signal sonore

- La **vitesse de propagation** ou **célérité du son** dépend de la **nature du milieu** (solide, liquide ou gazeux), de la **température** et de la **pression du milieu**.

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \chi}}$$

- c : Célérité du son.
- K : Module de compressibilité.
- χ : Coefficient de compressibilité. $\chi = 1/K$.

Dans le **vide** le son ne **se propage pas**, car il n'y a pas de matière pour transporter les ondes

Milieu	Vitesse du son
Air	340 m/s
Eau	1450 m/s
Glace	3200m/s
Verre	5300 m/s
Acier	5750m/s

Célérité du son dans quelques milieux

Température	Vitesse du son
-10°C	325 m/s
0°C	330 m/s
10°C	337m/s
20°C	343 m/s
30°C	349m/s

Célérité du son dans l'air en fonction de la température

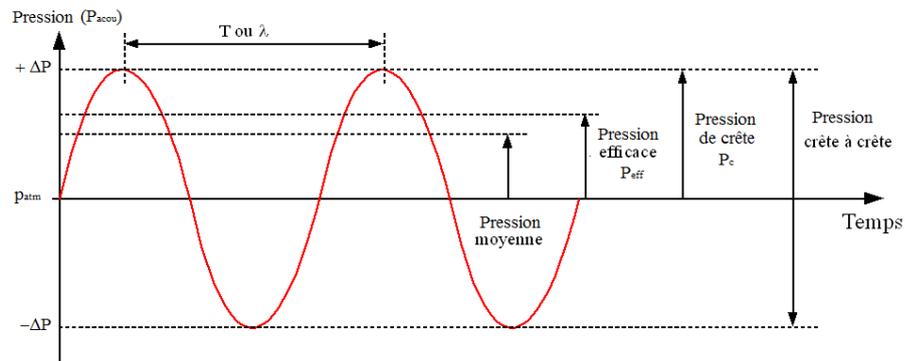
- La **pression acoustique** correspond à la variation de la pression de l'air au passage de l'onde sonore, qui crée des **compressions** et **dilatations** du milieu.

$$P(t)_{\text{acou}} = \Delta P = P(t) - P_{\text{atm}} \quad ; P_{\text{atm}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa (Pascal).}$$

Les **pressions acoustiques** (en **pascal**) sont comprises entre **20 μPa** (**seuil d'audibilité**) et **20 Pa** (**seuil de douleur**).

On distingue deux valeurs remarquables :

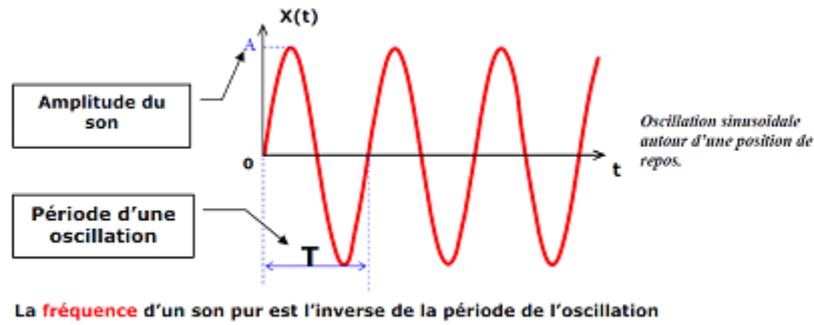
- **P_c** : la **pression de crête** est la pression acoustique maximale sur la durée de l'échantillon étudié.
- **P_{eff}** : la **pression efficace**, elle se calcule par la formule $P_{\text{eff}} = \frac{P_c}{\sqrt{2}}$



2- Modélisation du son

a- Son pur

Un **son pur** ou un son simple correspond à une **onde sinusoïdale** dont la **fréquence** et **l'amplitude maximale** sont constantes au cours **du temps**.



Il est représenté par une fonction sinusoïdale :

$$X(t) = A \sin \omega t \quad \left| \begin{array}{l} - A : \text{Amplitude.} \\ - \omega \text{ (rad/s)} : \text{Pulsation, } \omega = 2\pi f, f \text{ la fréquence} \end{array} \right.$$

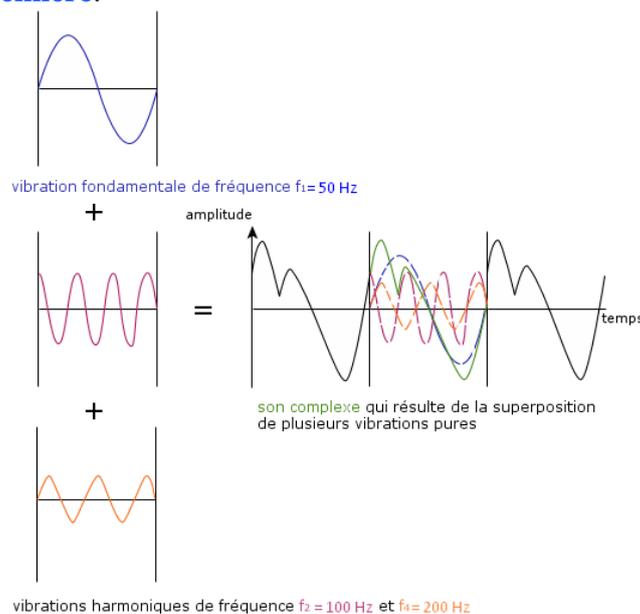
La **fréquence** d'un son correspond au **nombre de vibrations par seconde** de la source sonore.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} ; \lambda = c \cdot T \quad \left| \begin{array}{l} T \text{ (s)} : \text{Période.} \\ \lambda \text{ (m)} : \text{Longueur d'onde.} \\ c \text{ (m/s)} : \text{Célérité du son.} \end{array} \right.$$

b- Son complexe ou composé

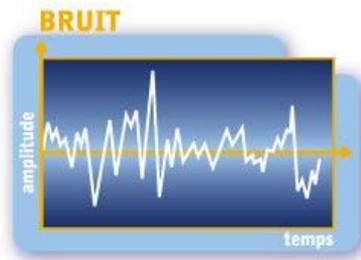
La plupart des sons que nous percevons dans notre environnement ne sont pas purs mais **complexes**.

- Le **son complexe périodique** est **composé** de **plusieurs sons purs** de **fréquences** et **d'amplitudes** différentes. Un **son complexe** est représenté par une **courbe périodique, non Sinusoïdale** et de **forme compliquée**. Elle est la résultante de la superposition de plusieurs vibrations : **la vibration fondamentale** de fréquence f_1 sur laquelle se superposent des **vibrations harmoniques** dont les fréquences sont des **multiples** de la **première**.



Vibrations résultant de la superposition d'harmoniques $f_2 = 2f_1$ et $f_4 = 4f_1$

- **Son complexe non périodique** ou **bruit** est un **mélange complexe** et **aléatoire** de sons de **fréquences quelconque**, il produisant une **sensation auditive** considérée comme **gênante** ou **dangereuse**. Le **bruit** est représenté par une **courbe non périodique, non Sinusoïdale**.



3- Caractéristiques physiques d'une onde sonore

Le son se caractérise principalement par trois paramètres physiques :

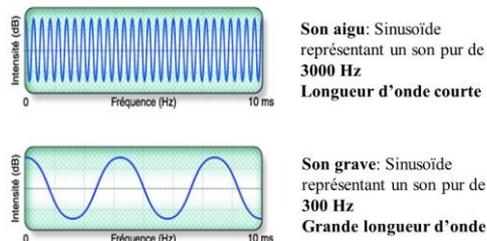
- La **hauteur tonale**
- L'**intensité** ou le **volume sonore**
- Le **timbre** ou la **richesse du son**

a- La hauteur (Hz)

La **hauteur (Hz)** d'un son est la **qualité** qui fait qu'il est **grave** ou **aigu**. Elle est égale à sa **fréquence fondamentale**.

- Un **son** est d'autant plus **grave** que sa fréquence est **faible**.
- Un **son** est d'autant plus **aigu** que sa fréquence est **élevée**.

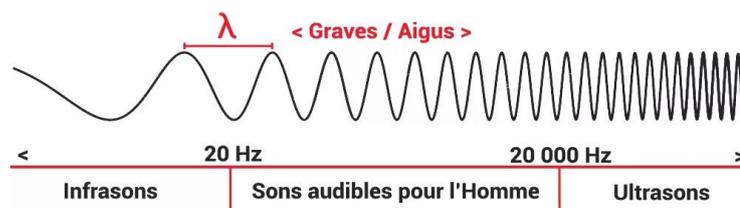
Sons graves / Sons aigus



De toutes les **ondes acoustiques**, seules certaines peuvent être **perçues** par **l'oreille** : il s'agit des ondes dont la fréquence est comprise entre **20 Hz** et **20 000 Hz** :

- En dessous de **20 Hz**, on parle des **infrasons** ;
- Au-dessus de **20 000 Hz**, on parle des **ultrasons**.

Onde sonore selon la longueur d'onde et la fréquence



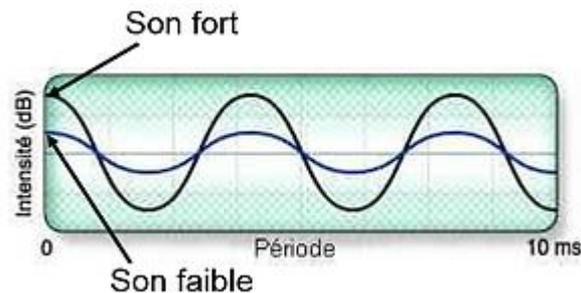
λ : longueur d'onde : distance entre deux crêtes. Plus l'onde fait de crête-à-crête par seconde, plus le son est aigu. Le dessin et l'échelle en Hertz ne sont pas à l'échelle.

b- L'intensité sonore et le Niveau sonore (dB)

Lorsqu'on se trouve à **proximité** d'une **source sonore**, le son est toujours **plus fort** que lorsqu'on s'en **éloigne**. Ce phénomène est dû à la **répartition de l'énergie sonore** dans l'espace

Pour traduire ce phénomène, on définit une grandeur appelée '**Intensité sonore**'.

- L'**intensité sonore** ou le **volume sonore** distingue un **son fort** d'un **son faible**, et est liée à l'**amplitude** (la pression acoustique) des vibrations sonores **A**. Lorsque l'**amplitude** de l'onde est **grande**, l'**intensité** est **grande** et donc le **son** est plus **fort**.



Pour caractériser cette grandeur, on définit cette **intensité sonore**, notée **I**, par la **puissance reçue** par unité de surface.

$$I = \frac{P_{\text{reçue}}}{S}$$

I : Intensité sonore (Watt/m²)

P_{reçue} : Puissance reçue (Watt)

S : Surface (m²), S=4πR²

- **Puissance acoustique** est **énergie sonore** traversant une surface par unité de temps.

$$P = p^2 \cdot \frac{S}{\rho c}$$

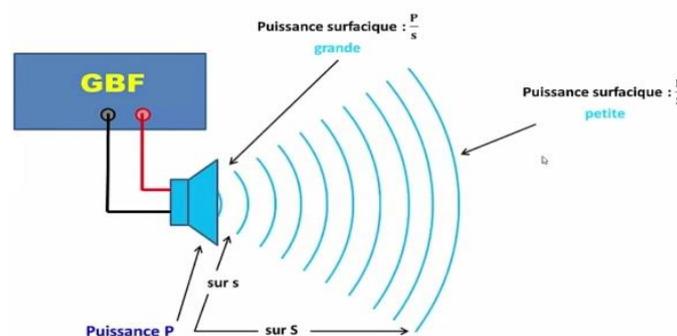
p : Pression acoustique efficace (Pa)

ρ : Masse volumique du milieu propagateur (Kg/m³)

c = célérité du son dans le milieu propagateur (m/s)

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

Intensité sonore



Pour le tympan de l'oreille, il existe deux seuils,

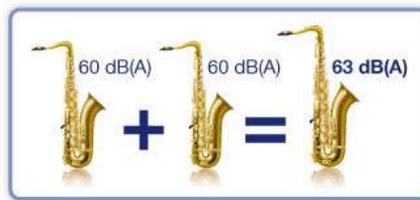
- **Seuil d'audibilité** : $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$
- **Seuil de douleur** : $I = 100 \text{ W/m}^2$

- **Niveau sonore L** (Level en Anglais) se mesure en **décibels acoustiques (dBA)** à l'aide d'un appareil appelé **sonomètre**. Il est relié à **l'intensité acoustique I** par la relation suivante :

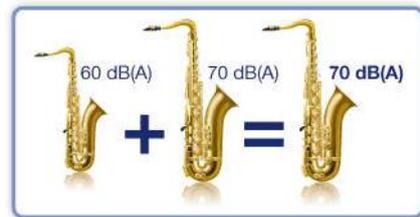
$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad \left| \begin{array}{l} I_0 : \text{Intensité de référence (seuil d'audibilité)} \\ I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2. \end{array} \right.$$

La sensation auditive n'est pas proportionnelle à **l'intensité acoustique I**, elle est **liée** au **niveau d'intensité acoustique L**.

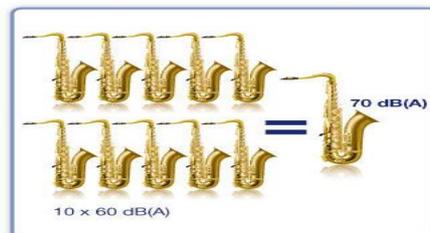
Les décibels (les niveaux sonores) ne s'additionnent pas de façon arithmétique, mais selon une **progression logarithmique**. Cela signifie que **lorsqu'une source sonore est multipliée par deux, le niveau sonore n'augmente que de 3 dB**.



On **prend en compte** le **niveau sonore** le **plus élevé** lorsque la **différence** entre deux niveaux sonores est **supérieure à 10 dB(A)**.



Lorsqu'une **source sonore** est multipliée par **10**, le son **augmente 10 dB**.



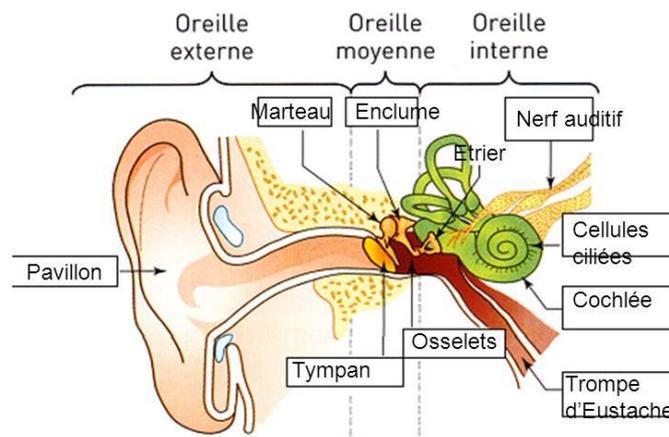
- **Le seuil de douleur** correspond à un niveau d'intensité sonore égal à **120 dB**
- **Le seuil d'audition théorique** correspond à un niveau d'intensité sonore égal à **0 dB**.

c- Le timbre

Le **timbre**, la **signature** ou la **couleur du son** est la **qualité spécifique** du son qui **permet d'identifier** un son d'un autre. D'une personne à l'autre, la même lettre est prononcée différemment, c'est ce que traduit le timbre.

4- Perception du son par l'oreille

Le son se propage dans l'air sous forme d'onde de pression. Pour devenir une information intelligible par le cerveau, ces **ondes mécaniques doivent être converties en signaux électriques**, appelés aussi **influx nerveux**. L'oreille détient ce rôle, grâce à sa structure complexe qui abrite le récepteur auditif.



II) Les Ultrasons : Production et propagation

1- Nature des Ultrasons

Les **ultrasons** sont des **vibrations mécaniques** de **même nature physique** que **le son**, seule la **fréquence** permet de les **différencier**. La gamme de fréquences des ultrasons se situe entre **20 kHz** et **100 MHz**, **trop élevées** pour être **perçues** par l'**oreille** humaine.

Dans un milieu matériel homogène les **sons** et les **ultrasons** se propagent à **vitesse constante identique**, c'est-à-dire que cette célérité dépend de la nature du **milieu** et **pas de la fréquence** de l'onde sonore.

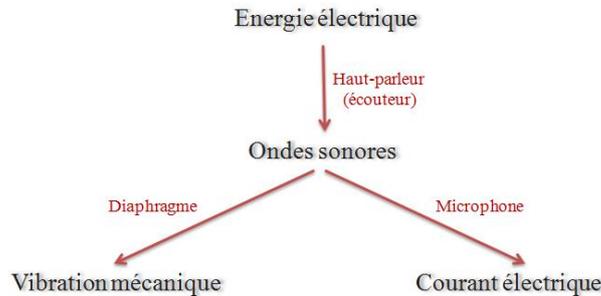
- **Caractéristique physiques des Ultrasons :**

- **fréquence** f (Hz) : **20 kHz** et **100 MHz**
- **période** T (s) : $T=1/f = \lambda/c$
- **Longueur d'onde** λ (m) : $\lambda = c/f = c.T$
- **Célérité** c (m/s) : $c=f.\lambda = \lambda/T$
- **Intensité** I (Watt/cm²) = Energie Transportée par unité de surface
 $I=P_c^2 / 2\rho c$
- **Le niveau sonore** L (dB) entre deux ondes ultrasonore (I_1 et I_2)
 $L=D=10 \log (I_2 / I_1)$

2- Production et réception des ultrasons

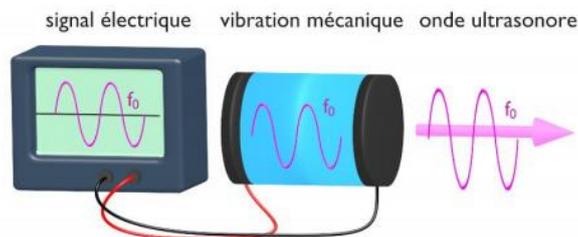
- Un **transducteur** est un dispositif **convertissant** un signal physique en un autre.

Exemple :



- **Transducteurs piézoélectriques:** La **production** des **ultrasons** utilise la **conversion d'énergie électrique** en **énergie mécanique** et réciproquement. Cette conversion est effectuée par un **transducteur piézoélectrique** adapté aux besoins, c'est à dire **choisi** suivant la gamme de **fréquences à produire** et la **puissance désirée**.

Le **transducteur piézoélectrique** est alimenté par une tension alternative de même fréquence que celle des ultrasons à produire. Il y a des **transducteurs émetteurs** et des **transducteurs récepteurs**.



- La **piézoélectricité** (**Piézo**, c'est-à-dire **pression**) est la propriété que possèdent certains corps de se **polariser électriquement** sous l'action d'une **contrainte mécanique** et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un **champ électrique**. Les deux effets sont indissociables. Le premier est appelé effet **piézoélectrique direct** ; le second effet **piézoélectrique inverse**. Cette propriété trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie et la vie quotidienne.



La piézoélectricité

Les **matériaux piézoélectriques** sont très nombreux. Le plus connu est sans doute le **quartz**, toujours utilisé aujourd'hui dans les **montres** pour créer des impulsions **d'horloge**. Mais ce

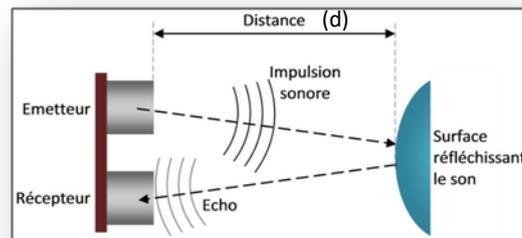
sont des **céramiques synthétiques**, les Céramique **PZT** (Titano-Zirconate de Plomb), qui sont le plus largement utilisées aujourd'hui dans l'industrie

Le premier générateur d'ultrasons est crée par Paul Langevin en 1915. Mais ce n'est qu'en 1917, sous l'influence des nécessités pressantes de la lutte anti-sous-marine, qu'est apparu le premier générateur d'ultrasons. **Le sonar**, est alors appelé "asdic", est envisagé.

Le système est simple, des ultrasons, ondes très peu absorbés par l'eau, sont envoyés dans la mer, s'ils rencontrent un obstacle, ils sont renvoyés aux navires, ainsi informé de la position de l'ennemi.

3- Le principe des ultrasons (l'écho)

Un **émetteur** à ultrasons **émet** à intervalles réguliers de courtes **impulsions sonores** à haute fréquence. Ces impulsions se propagent dans l'air à la vitesse du son. Lorsqu'elles **rencontrent un objet**, elles se **réfléchissent** et reviennent sous forme **d'écho** au **récepteur**. Celui-ci calcule la **distance** le séparant de la cible sur la base du temps écoulé entre **l'émission du signal** et la **réception de l'écho**.

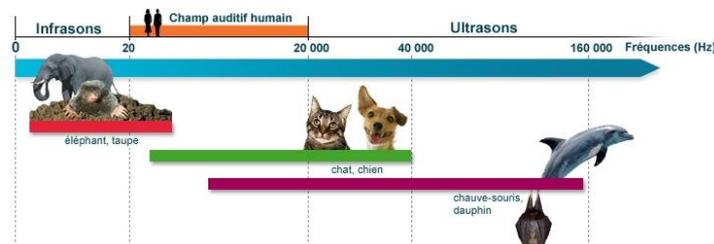


$$\Delta t = \frac{2d}{c}; \quad d = \frac{\Delta t \cdot c}{2}$$

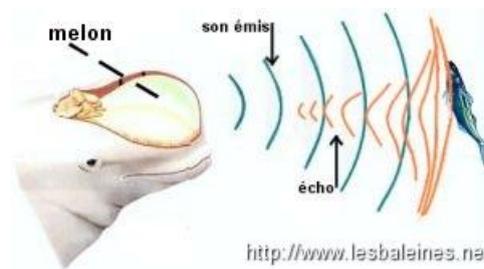
Trajet parcouru par l'onde sonore est **deux fois** la distance entre l'émetteur et l'objet (distance aller-retour).

a- Les Ultrason dans le monde animal

De **nombreux animaux** vertébrés terrestres, comme les **chiens**, certains **rongeurs** ou les **chauves-souris**, peuvent entendre certaines gammes d'ultrasons et/ou les utiliser pour communiquer. Les ultrasons en jeu dans le monde animal sont étudiés par la **bioacoustique**, qui a montré que de nombreux animaux utilisent des sons émis au-delà de la limite supérieure de l'audition humaine.



Les hautes fréquences confèrent certains avantages à la communication et des possibilités telles que l'**écholocalisation**.



Émission et réception des ultrasons chez les cétacés (principe de l'**écholocalisation**).

Certains peuvent en émettre : **les chauves-souris** émettent des ultrasons qui se répercutent sur les objets environnants, ce qui leur permet ainsi de **percevoir** leur environnement. **Les souriceaux** perçoivent des ultrasons émis par leur mère allaitante. Il en va de même chez les cétacés (**baleines, dauphins..**), qui utilisent les sons à très haute fréquence pour communiquer et percevoir leur environnement.

Chez certains animaux (la souris par exemple) le **cerveau comportait** une **zone** dédiée à **l'interprétation des ultrasons** perçus par l'animal.

Plusieurs méthodes d'effarouchement d'espèces jugées indésirables dans certains contextes reposent sur la diffusion d'ultrasons, y compris pour les oiseaux quand la diffusion se fait au-delà d'une certaine puissance. Certains animaux pourraient ainsi et pour d'autres raisons être victimes d'une *pollution sonore* inaudible par l'humain. On a par exemple constaté que les chauves-souris butineuses (qui jouent un rôle majeur pour la fécondation de certaines plantes) évitent les zones bruyantes, qui probablement les perturbent dans le repérage des fleurs. Pour d'autres espèces de chiroptères, le bruit pourrait gêner leur perception auditive (et notamment la perception de leurs proies, ou de certains obstacles ou prédateurs).

Concernant l'autre côté du spectre sonore, quelques espèces, dont le pigeon, sont sensibles aux infra-sons, qui peuvent endommager leur oreille interne.

4- Propagation des ultrasons à travers différents milieux

a- L'impédance acoustique (Z)

L'**impédance acoustique Z** est une grandeur très importante pour **caractériser un milieu**. Elle présente la **résistance** à la **propagation** de l'onde sonore et est donnée par :

$$Z = \sqrt{\frac{\rho}{\chi}} = \rho \cdot c$$

L'impédance acoustique s'exprime en **10⁶Kg/m².s** soit en **Rayleigh (Rays)**.

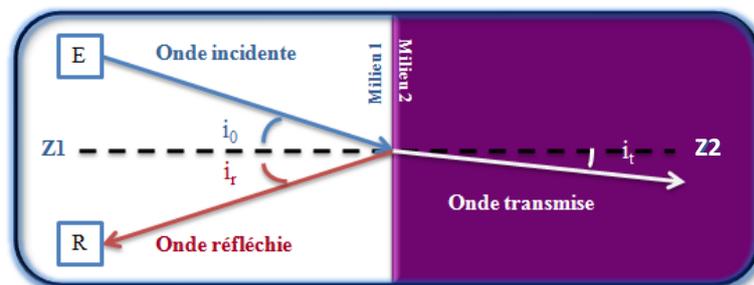
Milieu	Impédance acoustique Z (10 ⁶ Kg/m ² .s)
Air	0,0004
Eau	1,48
Foie	1,65
Os	4,11-8
Sang	1,66
Graisse	1,38
Cerveau	1,55
Muscle	1,65-1,74

Impédance acoustique pour quelques milieux

b- Changement de milieu de propagation

Dans un **milieu hétérogène** trois **mécanismes** distincts sont **responsables de l'atténuation** globale du faisceau. **Réflexion-réfraction, diffusion** l'**absorption**.

- **Réflexion et transmission** : lorsqu'une **onde acoustique** rencontre l'**interface séparant** deux milieux **d'impédances** acoustiques **différentes**, une partie de l'onde est **transmise** dans l'autre milieu (elle subit une **réfraction**) tandis qu'une autre partie se **réfléchit** sur l'interface (elle subit une **réflexion**). **La notion d'impédance** acoustique permet **d'étudier** complètement et quantitativement ce **phénomène** et **d'estimer** les **quantités d'énergie** acoustique **transmises** et **réfléchies**



Réflexion et transmission

Comme les rayons lumineux, ces deux phénomènes (**réflexion-réfraction**) obéissent aux **lois de Descartes**, les différents angles étant mesurés par rapport à la normale de l'interface : l'amplitude du signal reçu par le récepteur est maximale lorsque l'angle d'incidence égal l'angle de réflexion ($i_0 = i_r$), et le faisceau transmis est dévié selon un angle i_t qui dépend des célérités c_1 et c_2 de l'onde avant et après son passage à travers l'interface (c_1 et c_2 étant fonction des impédances respectives des milieux 1 et 2).

Lois de Snell-Descartes :

$$i_0 = i_r \quad ; \quad \frac{\sin i_0}{c_1} = \frac{\sin i_t}{c_2}$$

En échographie (sauf Doppler), on travaillera **en incidence normale** ($i_0 = i_r = i_t = 0$) et on comparera les intensités sonores incidente, réfléchie et transmise.

Pour cela, on étudie le rapport des intensités sonores et on définit alors deux coefficients :

- **Coefficient de réflexion** (Proportion des ultrasons réfléchis):

$$R = \frac{I_{reflechie}}{I_{incidente}} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

- **Coefficient de transmission** (Proportion des ultrasons transmis):

$$T = \frac{I_{transmise}}{I_{incidente}} = 4 \frac{Z_2 * Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

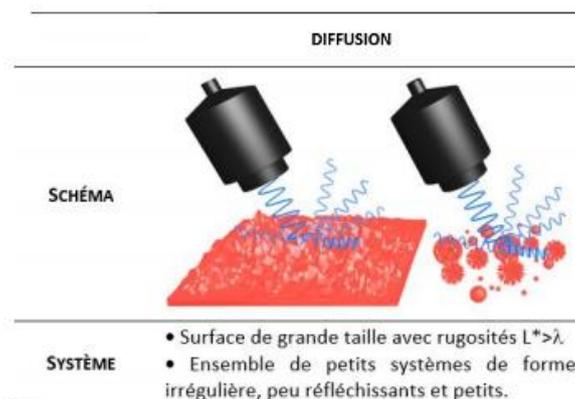
On peut remarquer que **R** et **T** sont compris entre 0 et 1, et **R + T = 1**.

D'une manière générale, il faut que **les impédances des deux milieux soient bien différentes**.

- Si **R** \approx 0, on parle **d'adaptation acoustique** : l'onde est **intégralement transmise** au milieu 2. Dans cette configuration **Z₁ \approx Z₂**.
- Si **R** \approx 1, l'onde est **intégralement réfléchi**e et ne passe pas dans le milieu 2. Dans ce cas, une des deux impédances est négligeable (ou nulle) par rapport à l'autre.

Plus la différence d'impédance sera grande entre les milieux 1 et 2 plus l'énergie réfléchi sera grande et plus l'amplitude des échos sera grande plus le défaut sera visible

- **Diffusion** : Elle se produit lors de l'interaction d'une onde de longueur d'onde λ et :
 - Un petit obstacle de dimension plus petit que la longueur d'onde ($d < \lambda$), ce petit objet vibre et réémet dans toutes les directions de l'espace une fraction de l'énergie contenue dans l'onde incidente.
 - Une interface rugueuse et très irrégulière



- **Absorption** : Lors de la propagation de l'onde, une partie de l'énergie ultrasonore est absorbée par le milieu, et conduit à une diminution de l'intensité acoustique. Elle dépend de :
 - la distance parcourue par l'onde (loi exponentielle décroissante), l'intensité diminue plus vite dans les premiers cm.
 - la fréquence: le transfert d'énergie vers les tissus augmente avec la fréquence, le coefficient d'absorption a est donné par la relation

$$a = K.f^2$$

Il apparaît donc que plus la fréquence des ultrasons est grande plus le phénomène d'absorption (donc d'atténuation) est important et par conséquent plus la profondeur maximale pouvant être visualisée est faible. En pratique, le choix de la fréquence utilisée est en grande partie guidé par la profondeur de la zone que l'on souhaite explorer.

- Basses fréquences pour l'exploration des organes profonds
- Hautes fréquences pour l'exploration des organes superficiels

• **Atténuation** : est définie par la réduction de l'intensité d'un faisceau des ultrasons au cours de sa propagation dans un milieu qui dépend de la nature et la profondeur du milieu traversé et de la fréquence de faisceau.

Cette atténuation des ultrasons est due aux multiples interactions vues précédemment (réflexion, réfraction, diffusion et absorption) qui diminuent l'intensité du faisceau lorsque celui-ci pénètre dans les tissus. Cette diminution obéissant à une loi exponentielle décroissante :

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

I : intensité des ultrasons à la distance x.
 I₀ : intensité initiale.
 μ : coefficient linéaire d'atténuation
 x : la distance parcourue par l'onde depuis la source.

Le coefficient d'atténuation exprimé en décibel par unité de longueur traversé est défini par :

$$\alpha = 10 \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = 10 \frac{\mu}{2,3}$$

Attention

La fréquence de l'onde n'est pas modifiée par le changement de milieu, Mais la célérité change donc la longueur d'onde change.

Référence :

Le son & L'audition, Dr CHAKOURI M.

Acoustique et mécanique ondulatoire, I.U.P. GDP Option GET

Imagerie Ultrasonore, Sonia Dahdouh, Télécom Paris Tech - CNRS LTCI - WHIST Lab