

Ondes Sonores et ultrasons :

↪ Objectifs du chapitre :

- Connaître les caractéristiques d'un son ou d'un ultrason
- Connaître le principe de production et de réception d'un son ou d'un ultrason
- Etudier et savoir représenter mathématiquement la propagation d'une onde sonore ou ultrasonore dans différents milieux
- Comprendre les modifications observables lors de changements de milieu (réflexion, transmission)
- Etudier les applications médicales des ultrasons : échographie, vélocimétrie à effet DOPPLER

Caractéristiques d'un son

Un son correspond à une vibration de l'air perçue par l'oreille.

Un **son pur** (par exemple celui émis par un diapason) peut être décrit mathématiquement par une fonction sinusoïdale de fréquence donnée)

→ Exemple : $x = A \times \sin\left(\frac{2\pi}{T} \times t + \varphi\right) = A \times \sin(2\pi \times N \times t + \varphi) = A \times \sin(\omega \times t + \varphi)$

- *A est l'amplitude de la vibration, N sa fréquence (T sa période et ω sa pulsation)*
- *Remarque : on note la fréquence N dans le cas de vibrations mécaniques, f en électricité, ν dans le cas d'ondes électromagnétiques, mais la définition reste la même ainsi que son unité .*

○

1.1. Hauteur

La hauteur permet de distinguer les graves des aiguës ; elle est liée à la **fréquence** de la vibration sonore.

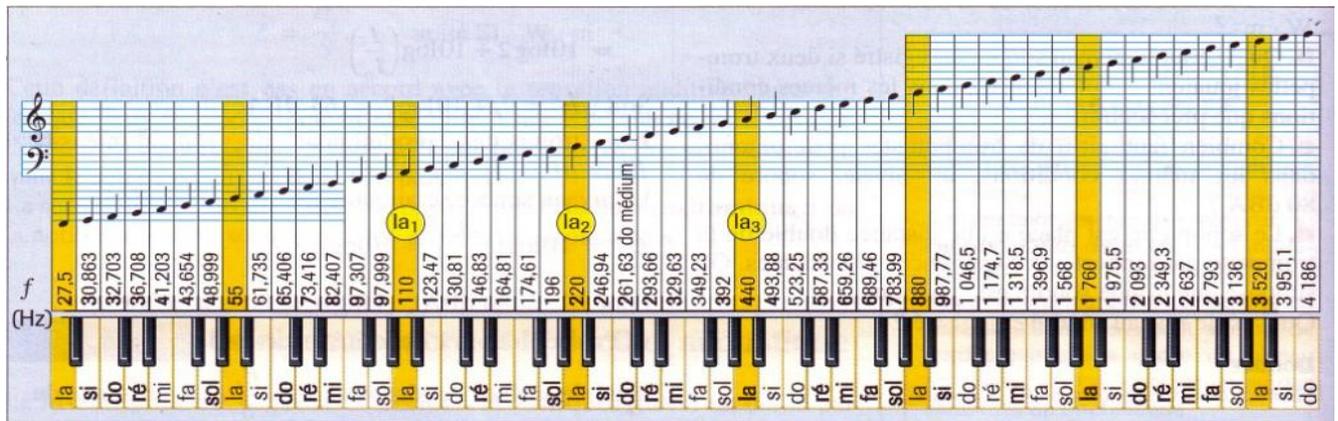
L'oreille « normale » perçoit des hauteurs de sons entre 20 Hz et 20 kHz.

Les fréquences inférieures correspondent aux **infrasons**, les fréquences supérieures aux **ultrasons**

- certains animaux peuvent entendre les ultrasons (jusqu'à 40 kHz pour les chiens, et 100 kHz pour les chauves-souris), les dauphins communiquent par ultrasons
- les éléphants communiquent par infrasons sur plusieurs kilomètres.
- Au-delà des ultrasons s'étend le domaine des **hyper sons** (fréquences supérieures à 10^9 Hz = 1000 MHz).

→ **Les notes de la gamme correspondent aux hauteurs suivantes :**

Note	Do ₃	Ré ₃	Mi ₃	Fa ₃	Sol ₃	La ₃	Si ₃	Do ₄
Fréquence (Hz)	261,6	293,7	329,6	349,2	392	440	493,9	523,5



Le clavier du piano et les fréquences des notes de la gamme tempérée.

1.2. Intensité

L'intensité I est la puissance reçue par unité de

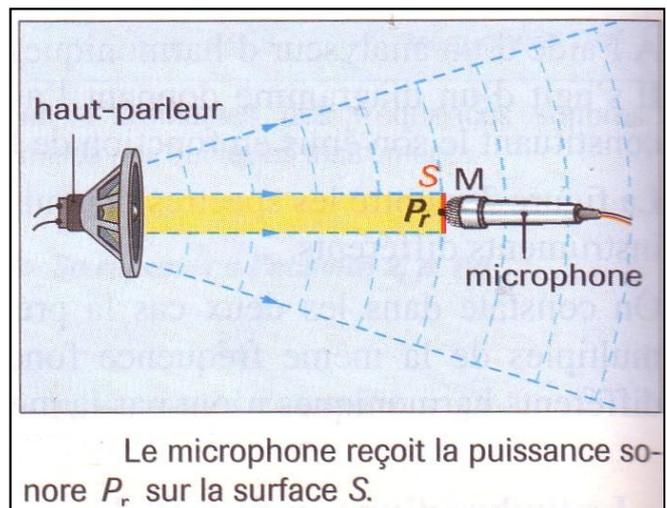
surface:
$$I = \frac{P_{reçue}}{S}$$

→ On l'exprime en W.m^{-2}

→ Cette intensité I est proportionnelle à A^2 : carré de l'amplitude A du son

→ Le seuil d'audition moyen de l'oreille humaine est de l'ordre de

$$I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} \text{ W.m}^{-2} \text{ à } 1000 \text{ Hz.}$$

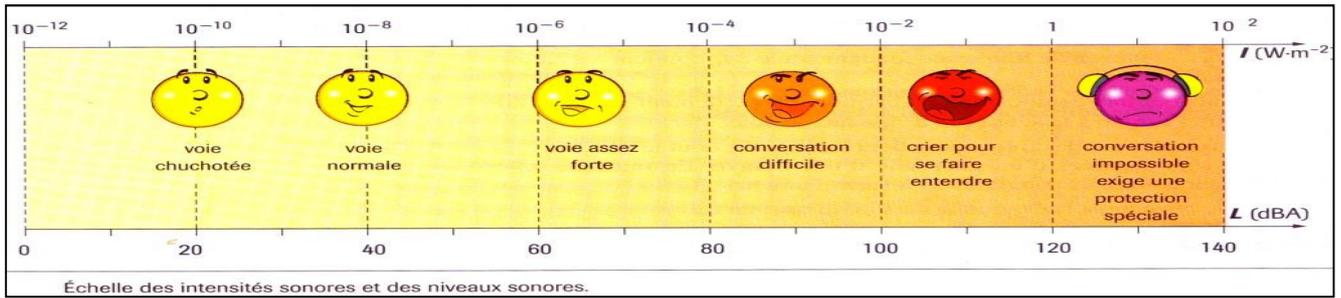


Notre oreille étant un récepteur sonore *sensible au logarithme de l'intensité sonore*, on définit le **niveau sonore relatif**, exprimé en **décibel acoustique (dBA)** par la relation $\frac{L}{L_0} = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ (le L correspond à **level**, niveau en anglais).

- « log » est le logarithme à base 10, défini à partir du logarithme Néperien « ln » par la relation $\log x = \frac{\ln x}{\ln 10}$.

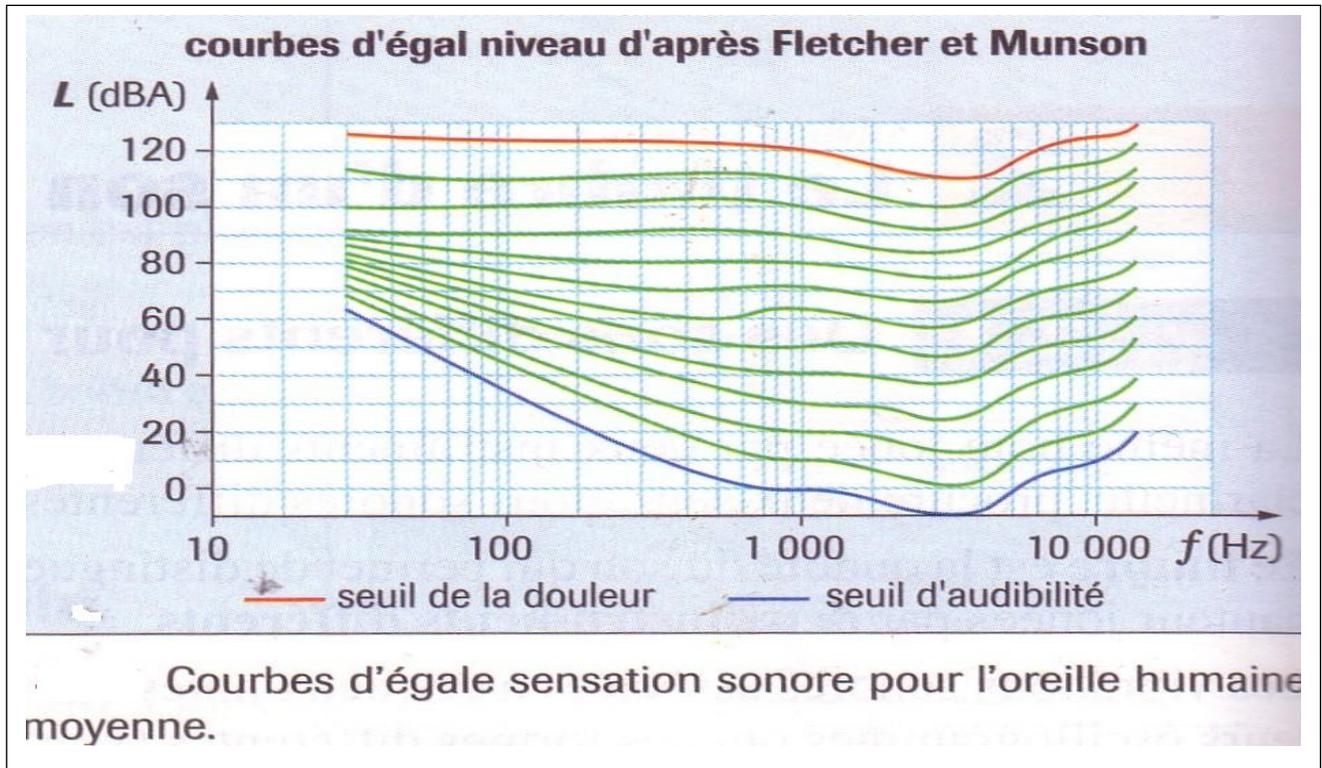
La fonction $\log x$ est la fonction inverse de 10^x . Par conséquent : $\log(10^x) = x$ et $10^{\log x} = x$

- Exemples de niveaux sonores : 20 dB pour la voie basse, 90 dB pour une motocyclette, 130 dB pour un avion.



- Relation entre intensité et niveaux sonores

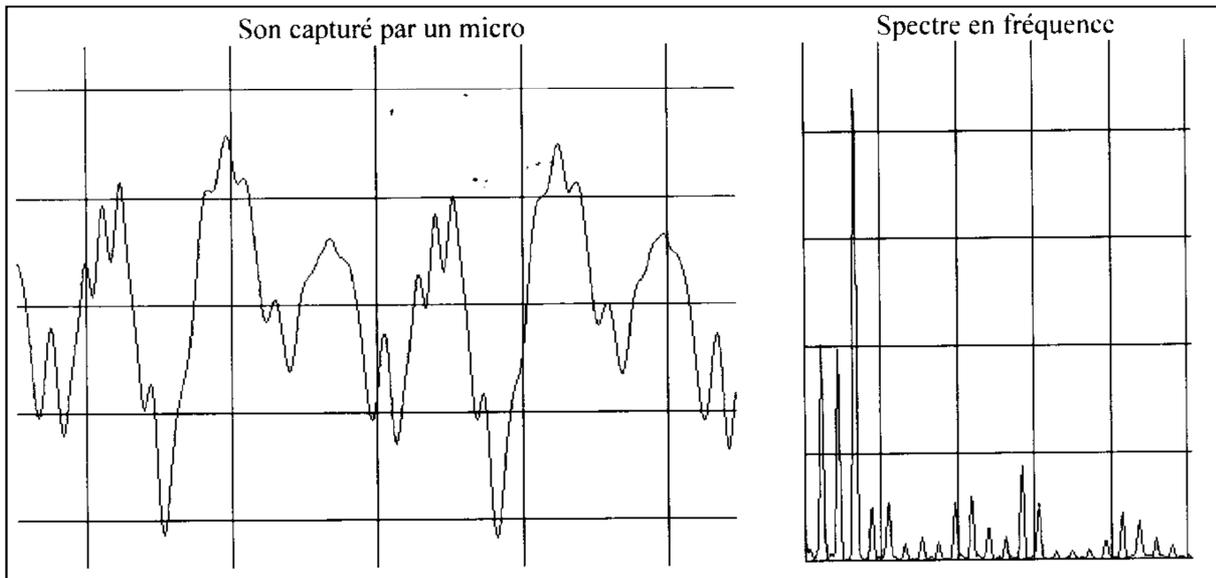
- La sensation sonore de l'oreille humaine moyenne varie avec la hauteur (fréquence) du son



1.3. Timbre

La même note jouée par deux instruments différents ne donne pas la même sensation auditive ; on montre que chaque son complexe est une somme de différents sons sinusoïdaux (les harmoniques) de fréquences multiples entières de la fréquence fondamentale.

Le spectre d'un son montre les différentes contributions des harmoniques ; il caractérise le timbre.



Emission et réception de sons et d'ultrasons

2.1. Sons audibles

Les émetteurs sont des systèmes mécaniques dont les vibrations sont transmises au milieu qui les entoure (l'air en général, mais également d'autres milieux fluides voire solides)

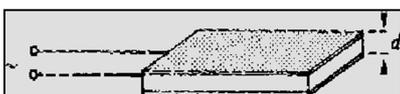
- *instruments de musique, cordes vocales, hanche, haut-parleur...*

Les récepteurs sont l'oreille, les micros : ils transforment les vibrations de l'air en influx nerveux ou en tension électrique.

2.2. Ultrasons

Certains cristaux, comme le quartz, possèdent des propriétés piézo-électriques : si on applique une tension aux bornes d'un quartz celui-ci se dilate.

Sa déformation δd est sensiblement proportionnelle à la tension appliquée U ; $\delta d = K \times U$



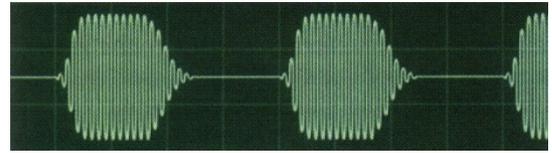
L'application d'une tension alternative aux bornes du cristal crée une vibration du cristal qui produit des ondes ultrasonores dans le milieu ambiant.

Inversement, si on déforme un cristal de quartz, il apparaît une tension à ces bornes ; **un émetteur piézoélectrique** peut également être utilisé en récepteur.

Effet direct		Effet inverse	
Cause	Effet	Cause	Effet
↓	-	-	↓
↑	+	+	↑
↑	+	+	↑
↓	-	-	↓

- *Le rendement ultra sonique du cristal est amélioré en enfermant ces deux faces entre deux plaques d'acier.*
- *On utilise des cristaux synthétiques qui présentent l'avantage de posséder une impédance électrique relativement basse, et qui fonctionnent sous plus basse tension.*

En pratique, on émet les ultrasons par salves (environ 20 périodes) afin d'éviter les interférences entre onde émise et onde réfléchie.



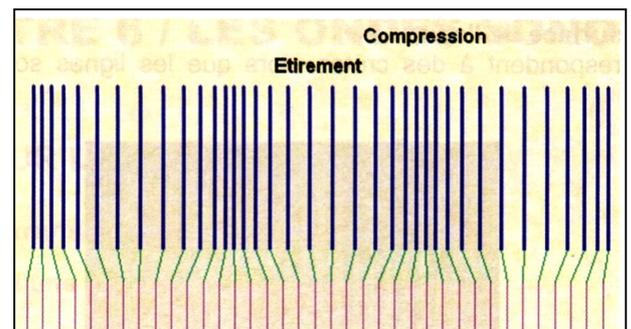
Propagation d'une onde sonore ou ultrasonore

3.1. Mécanisme de propagation

3.1.a. Cas des gaz et des liquides

La vibration de l'émetteur entraîne des **déformations locales des couches de fluide à son contact**. Cette compression entraîne une variation locale de pression. Comme les fluides sont des milieux élastiques, la tranche de fluide comprimée se dilate ensuite en comprimant la tranche voisine, qui fait de même avec sa voisine et ainsi de suite.

Cette déformation (ainsi que les variations de pressions) **se transmettent donc de proche en proche selon la direction de propagation x** : l'onde sonore est donc **mécanique et longitudinale** (selon la direction de propagation).



Chaque couche de fluide vibre donc autour de sa position d'équilibre : il y a donc **propagation de l'onde, mais pas déplacement global de matière**.

Les **propriétés élastiques du milieu** responsables de la propagation varient avec :

- les différents fluides (gaz ou liquides).
- pour un même gaz, elles varient également avec son état : par exemple la célérité augmente avec la température (*le milieu est plus « rigide » et plus réactif du fait de sa plus grande agitation moléculaire*).
- *Exemple : $C = 344 \text{ m/s}$ dans de l'air à 20 °C et à $p = 1 \text{ atmosphère}$; $C = 1482 \text{ m/s}$ dans de l'eau (température et pression sans grande influence)*

Par conséquent, la célérité C de propagation de l'onde sonore ou ultrasonore **dépend fortement du milieu de propagation**. Plus le milieu est rigide, plus la célérité augmente.

Par contre, dans un fluide, la célérité C des sons ou des ultrasons **ne dépend pas de leur hauteur** (de leur fréquence) : **le milieu est non-dispersif**.

3.1.b. Cas des solides

Dans le cas des solides, la vibration de l'émetteur provoque **une vibration des atomes proches** autour de leur position d'équilibre qui **se transmet de proche en proche selon la direction de propagation x** : l'onde sonore est donc encore **mécanique** et **longitudinale** (selon la direction de propagation).

Il y a encore dans ce cas propagation de l'onde par vibration des atomes (appelées **phonons**), mais pas déplacement global de matière.

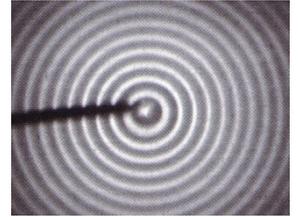
La célérité C de propagation de l'onde sonore ou ultrasonore dépend donc encore du milieu de propagation .

- *Exemple : $C = 5050$ m/s dans de l'aluminium; $C = 5120$ m/s dans du fer;
 $C = 6000$ m/s dans de l'aluminium;*

Milieu	Célérité (m·s ⁻¹)
air (0 °C)	331
vapeur	494
eau	$1,50 \cdot 10^3$
plomb	$2,16 \cdot 10^3$
cuivre	$5,01 \cdot 10^3$
aluminium	$6,42 \cdot 10^3$
diamant	$20,0 \cdot 10^3$

Doc. 17 – Célérité du son dans quelques milieux.

Les ondes périodiques progressives



3.1.c. Onde progressive

L'onde sonore parcourt une distance d pendant une durée $\Delta t = \frac{d}{C}$

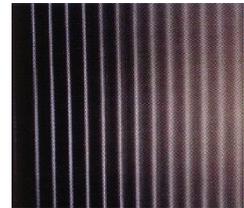
Un point du milieu situé à une distance d reproduit donc le mouvement de l'onde avec un retard égal à $\Delta t = \frac{d}{C}$ (ou un point situé à une distance d est dans le même état à l'instant t que la source à l'instant $t - \Delta t = t - \frac{d}{C}$).

On appelle « **front d'onde ou surface d'onde** » l'ensemble des points atteints à la même date par l'onde sonore.

Quand **la source est ponctuelle et le milieu isotrope**, le front d'onde est une sphère de rayon $\frac{d}{C}$ à l'instant t . On parle donc **d'onde sphérique**.

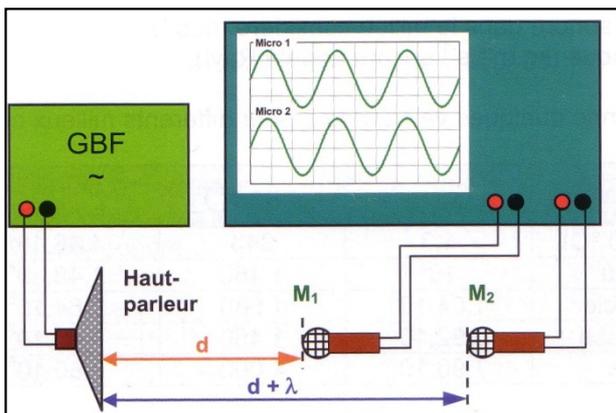
Les émetteurs d'ultrasons piézoélectriques sont **des sources planes** ; dans ce cas les fronts d'onde sont des plans. On parle alors **d'onde plane**.

→ Remarque : quand on est très éloigné d'une source ponctuelle, le rayon de courbure du front d'onde très grand et on a pratiquement **une onde plane**.



3.1.d. Onde progressive périodique

Si l'émission du son (ou de l'ultrason) se fait durant un temps suffisamment long, chaque point de l'espace situé à une distance d de la source vibre périodiquement avec la même fréquence que le son émis, mais avec un retard $\frac{d}{C}$.



De ce fait, certains points oscillent de la même manière en même temps : ils sont en phase.

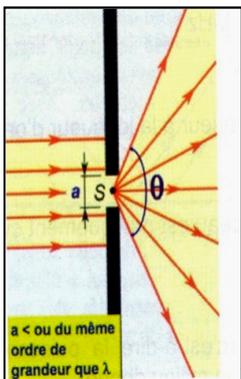
Deux points consécutifs M_1 et M_2 oscillant de la même manière (en phase) sont séparés par une distance caractéristique de l'onde et du milieu appelée la longueur d'onde λ de l'onde (unité : m).

M_2 reproduit le mouvement de M_1 avec une période de retard ; puisque M_1 et M_2 sont séparés par λ , on

$$\text{donc : } M_1 M_2 = \lambda = C.T = \frac{C}{\nu}$$

- La longueur d'onde λ correspond à la période spatiale de l'onde (sa période T étant sa période temporelle)
- On peut montrer de la même façon que deux points séparés par un nombre impair de demi-longueurs d'onde ($\lambda/2$, $3\lambda/2$, $5\lambda/2$...) vibrent en opposition de phase
- La fréquence de l'onde ne dépend que de l'émetteur
- La célérité de l'onde dépend du milieu
- La longueur d'onde dépend donc à la fois de l'émetteur et du milieu

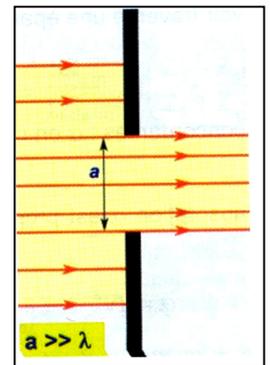
3.2. Diffraction en présence d'un obstacle



Quand un **faisceau cylindrique (ondeplane)** rencontre une ouverture circulaire (ou un obstacle) dont le diamètre est inférieur ou du même ordre de grandeur que sa longueur d'onde, il se transforme en faisceau conique et repart dans de nombreuses directions.

Si par contre, le diamètre de l'ouverture est très supérieur à la longueur d'onde, il y a peu ou pas de diffraction.

Pour éviter les perturbations du faisceau dues à ce phénomène de diffraction et avoir un faisceau le plus cylindrique possible, le diamètre de la source doit être très supérieur à la longueur d'onde



ex : à 40 kHz dans de l'eau ($C = 1480$ m/s) , la longueur d'onde vaut 3,7 cm d'où une forte diffraction alors qu'à 1 MHz dans l'eau la longueur d'onde vaut 1,5 mm d'où quasiment pas de diffraction avec une ouverture de 2 cm de diamètre.

3.3. Atténuation du faisceau – pertes d'énergie

3.3.a. Source ponctuelle – faisceau sphérique

Rappel : l'intensité sonore I est la puissance reçue par unité de surface du récepteur. – voir paragraphe 1-

$$2 : I = \frac{P_{\text{sonore}}}{S}$$

Dans le cas d'un faisceau sphérique, la répartition de la puissance de la source sur une surface d'onde de plus en plus grande (S varie avec la distance d selon la loi

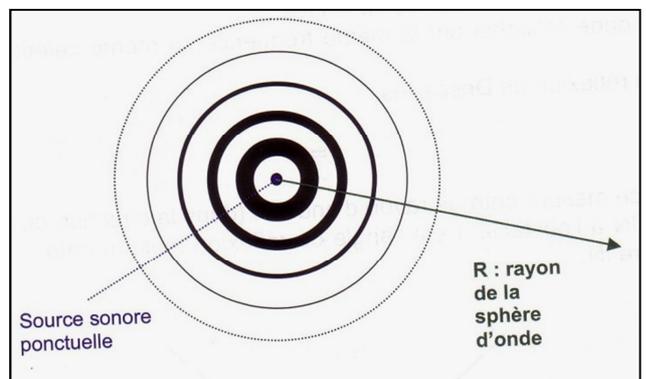
$S = 4\pi d^2$) entraîne une diminution de l'intensité du

$$\text{faisceau : } I = \frac{P_{\text{source}}}{4\pi d^2} = \frac{P_{\text{recepteur}}}{S_{\text{recepteur}}} \text{ d'où}$$

$$P_{\text{recepteur}} = P_{\text{source}} \times \frac{S_{\text{recepteur}}}{4\pi d^2}$$

Cette intensité variant dans de grandes proportions, on utilise des échelles logarithmiques pour mesurer

$$\text{les atténuations : } A = \frac{L_0}{L} = 10 \log \frac{I_0}{I}$$



On cherchera donc à avoir des ondes planes plutôt que sphériques (possible avec cristaux piezoplans) et des faisceaux cylindriques.

3.3.b. Absorption

Dans le cas d'un faisceau parallèle (onde plane), la répartition de l'énergie sonore ne diminue pas du fait de la surface d'onde ; on constate cependant qu'elle diminue du fait de l'interaction de l'onde avec la matière (une partie de l'énergie est dissipée dans le milieu sous forme de chaleur), mais également du fait de la diffusion du faisceau.

En première approximation, l'intensité sonore I décroît de façon exponentielle avec la distance x :

$$I = I_0 \times e^{-\alpha \cdot x}$$

Pour un milieu donné, le coefficient d'absorption α varie avec le carré de la fréquence de l'onde :

$$\alpha = k \cdot f^2$$

Par conséquent, plus la fréquence de l'ultrason sera élevée, plus l'onde sonore sera vite absorbée.

3.4. Ultrasons utilisés en médecine

Les ultrasons utilisés en médecine ont des fréquences comprises entre 2 MHz et 10 MHz.

Il faudra un juste compromis entre le fait de limiter la diffraction (donc augmenter la fréquence) et limiter l'absorption (donc diminuer la fréquence).

En échographie on utilise des fréquences de 2 MHz pour les gros organes profonds, 3 MHz pour le cœur, 6 MHz pour les petits organes moins profonds (la thyroïde, le sein) ; en ophtalmologie, on prend des fréquences de 8 à 15 MHz.

En vélocimétrie doppler on utilise des fréquences entre 3 MHz et 6 MHz.

Propagation dans différents milieux

4.1. Notion d'impédance

L'impédance d'un milieu caractérise son aptitude à reprendre sa forme originelle après déformation. Elle est définie comme le produit de la célérité et de la masse volumique du milieu : $Z = C \times \rho$

→ Unités : C en $m \cdot s^{-1}$; ρ en $kg \cdot m^{-3}$; Z en $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ou Rayl.

L'impédance ne dépend pas de la fréquence de l'onde sonore.

substance	Masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$)	Célérité ($m \cdot s^{-1}$)	Impedance Z ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
Air (20°C)	1,3	343	$4,5 \cdot 10^2$
Eau	$1,0 \cdot 10^3$	1480	$1,48 \cdot 10^6$
Muscle	$1,04 \cdot 10^3$	1580	$1,64 \cdot 10^6$
Graisse	$0,92 \cdot 10^3$	1450	$1,33 \cdot 10^6$

Os	$1,9.10^3$	4000	$7,7.10^6$
----	------------	------	------------

4.2. Changement de milieu : réflexion ; réfraction

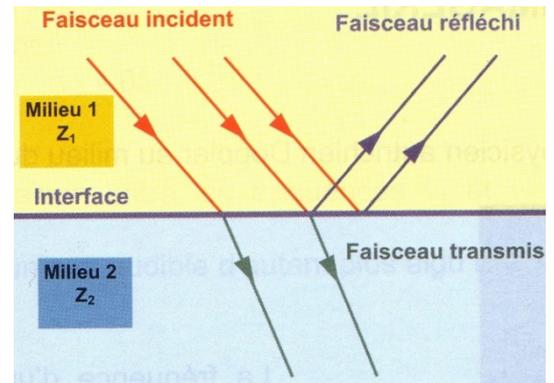
La séparation entre deux milieux (d'impédances différentes) s'appelle une **interface**.

Quand une onde sonore plane change de milieu (elle rencontre une interface) une partie de l'onde est réfléchi (elle subit une réflexion), une autre partie est transmise (elle subit une réfraction).

Ces deux phénomènes existent en optique et on retrouve des relations analogues pour les angles :

→ Réflexion : $i_1 = r$ (l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion)

→ Réfraction : $\frac{\sin(i_1)}{\sin(i_2)} = \frac{C_1}{C_2}$



En échographie (sauf Doppler), on travaillera en **incidence normale** ($i_1 = i_2 = r = 0$) et on comparera les intensités sonores incidente, réfléchi et transmise.

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

→ **Coefficient de réflexion** sous incidence normale: $R = \frac{I_{reflechie}}{I_{incidente}} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$

→ **Coefficient de transmission** sous incidence normale: $T = \frac{I_{transmise}}{I_{incidente}} = \frac{4Z_2 \times Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$

On peut remarquer que $T + R = 1$

$$\text{En effet : } T + R = \frac{4Z_2 \times Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} + \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \frac{(Z_2 - Z_1)^2 + 4Z_2 \times Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

$$\text{soit } T + R = \frac{Z_2^2 + Z_1^2 - 2Z_2 \times Z_1 + 4Z_2 \times Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{Z_2^2 + Z_1^2 + 2Z_2 \times Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{(Z_2 + Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} = 1$$

Prenons quelques exemples à partir du tableau donné au 4-1 :

→ Réflexion air-muscle : $R = 99,9\%$ et $T = 0,1\%$: il est donc nécessaire de ne pas laisser de couche d'air, d'où l'utilisation de gelée échographique

→ Réflexion graisse-muscle : $R = 1,1 \%$ et $T = 98,9 \%$: interface peu visible

→ Réflexion muscle-os : $R = 42 \%$ et $T = 58 \%$: interface visible.

D'une manière générale, il faut que **les impédances des deux milieux soient bien différentes**. En effet, si $Z_1 \approx Z_2$, alors $R \approx 0$ et $T \approx 1$: le faisceau incident ne subit quasiment pas de réflexion.

Si par contre, les impédances des deux milieux sont très différentes ($Z_1 \ll Z_2$), alors $T \approx 1$ et $R \approx 0$, : le faisceau incident est presque totalement réfléchi et ne traversera pas au-delà de l'interface.

De même si $Z_1 \gg Z_2$, le faisceau incident est presque totalement transmis : l'interface est « transparente » aux ultrasons.

C'est quoi l'échographie?

L'échographie est une technique d'imagerie médicale récente. Cette technique permet d'explorer toutes sortes d'organes (sein, muscles, articulations, foie, rein, vessie et même le fœtus). L'examen dure 15 à 30 minutes et il permet d'établir un diagnostic rapide. L'appareil utilisé pour réaliser les échographies s'appelle un échographe.



Son principe ?

On place une sonde sur la région à examiner après avoir appliqué sur la peau un gel qui permet de supprimer la présence d'air entre la sonde et la peau (l'air empêche la transmission d'ultrasons). Cette sonde est faite de plusieurs émetteurs disposés côte à côte.

Quand l'un d'entre eux émet un ultrason, celui-ci pénètre donc les tissus jusqu'à ce qu'il soit arrêté par une structure et réfléchi (l'ultrason qui est émis dans cette structure est en partie absorbé par les éléments qui la compose et en partie réfléchi). Il est alors renvoyé en direction de la sonde comme un faisceau lumineux par un miroir. Plus la structure est éloignée plus il mettra du temps à revenir. L'écho qui en résulte est enregistré et donne des informations sur la position et la densité des tissus rencontrés. La vitesse de propagation de l'onde sonore étant connue, il suffit de mesurer le temps qui s'écoule entre l'émission du message et la réception de l'onde réfléchi pour connaître la position d'un organe par exemple.

Effet Doppler?

Définition : Variation de la fréquence perçue par un observateur lorsqu'il y a un mouvement de la source (v_s) et/ou un mouvement de l'observateur (v_o)

$$f' = f \left(\frac{v \pm v_o}{v \pm v_s} \right)$$

Échographie par effet Doppler?

$$\Delta f = \frac{2f v_s \cos \theta}{v}$$

$$v_s = \frac{\Delta f}{2f \cos \theta} v$$

f = fréquence de l'onde émise

v_s = vitesse de la source

v = vitesse de l'onde sonore dans le milieu

θ = angle entre la ligne de "visée" et la direction du mouvement.

