

Chapitre : Son et Ultrason

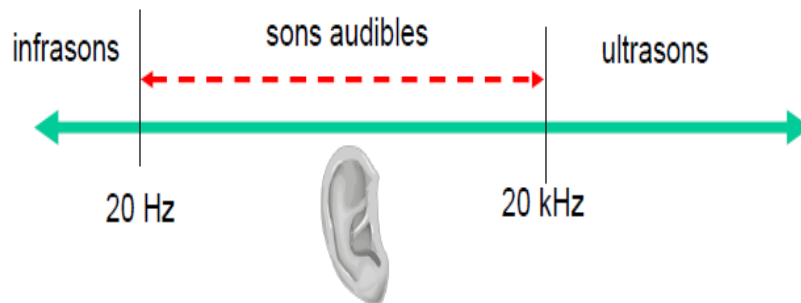
Dr. Bensaid S.

Définitions

- **Le son ou l'onde sonore (onde acoustique)** est une onde mécanique qui nécessite un milieu matériel élastique et déformable pour se propager. Le son ne se propage pas dans le vide

- L'onde sonore consiste en une propagation de proche en proche d'une déformation qui provoque localement des variations de pression et des oscillations des molécules autour de leur position d'équilibre, l'onde sonore est **longitudinale**.

Les ondes sonores sont émises par **une source (voix humaine, instrument de musique, diapason)** et mises en évidence par un récepteur tel que l'oreille humaine ou animale, un sonomètre. Elles sont caractérisées par leur **fréquence**. Elles se répartissent en 3 bandes:



1 Les infrasons ont une fréquence inférieure à 20 Hz, et ont une capacité du fait de leur faible fréquence de se propager à de grandes distances dans l'air comme dans l'eau ou bien à travers le sol. Ils sont audibles par certains animaux comme les éléphants qui leur permettent de communiquer entre eux jusqu'à 10km.

2 Les sons audibles par l'oreille humaine sont compris entre 20 Hz et 20 000 Hz. Les sons de basse fréquence sont les sons graves, les sons aigus sont des sons de haute fréquence.

3 Les ultrasons ont des fréquences supérieures à 20 000 Hz. Ils sont audibles par les chauve-souris, les chats, les dauphins....

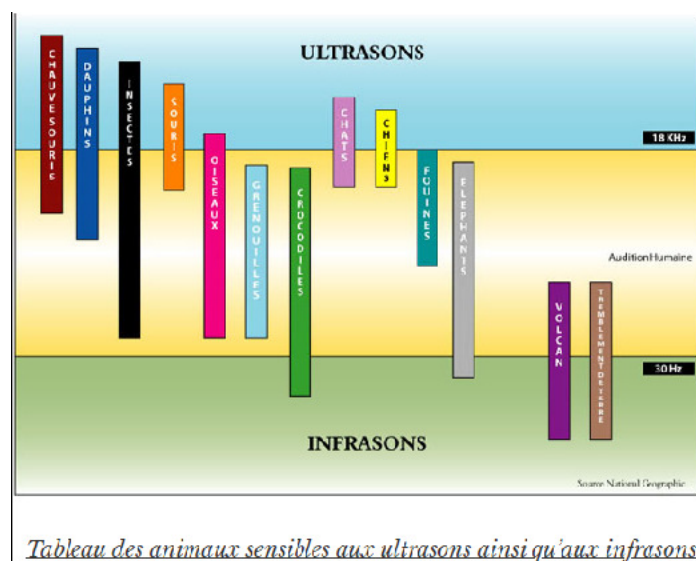


Tableau des animaux sensibles aux ultrasons ainsi qu'aux infrasons

Caractérisation de l'onde sonore

- L'onde sonore est une onde de pression longitudinale, les molécules vibrant dans la direction de propagation de l'énergie

- Le passage de l'onde induit des zones de détente et compression.

- L'onde sonore est définie par sa longueur d'onde λ et sa fréquence f qui sont liées par la relation $\lambda = cT = \frac{c}{f}$

avec λ la longueur d'onde est la distance parcourue par une onde pendant une période.

c correspond à la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu.

La période T est le temps que met une onde sonore pour accomplir un cycle complet.

La fréquence f ($f = \frac{1}{T}$) correspond au nombre d'oscillations périodiques par unité de temps.

Timbre d'un son

On distingue habituellement:

1- Son pur

Un son pur (ou son simple) correspond à une onde sinusoïdale plane: $X = A \sin(\omega t)$, dont la fréquence et l'amplitude maximale sont constantes au cours du temps.

avec: A est l'amplitude (le déplacement maximal de la particule).

$$\omega = 2\pi f$$

Exemple: Le son du diapason.



2- Sons complexes

La plupart des sons que nous percevons dans notre environnement ne sont pas purs mais complexes. Ils sont composés de plusieurs sons purs de fréquences et d'amplitudes différentes. On distingue 2 types:

- **Sons complexes périodiques:** Somme de fonctions sinusoïdales de fréquences multiples entières d'une fréquence dite fondamentale

- Fréquences multiples : harmoniques de rang 2, de rang 3, de rang 4,...

- Instruments à vent (flûte...) et à cordes (guitare...).

- **Sons complexes non périodiques** ou bruits (tambour).

3 - Les bruits

Le bruit est un son complexe produit par des vibrations aléatoires des molécules d'air. Le bruit est un phénomène à la fois physique (émission et propagation de l'onde sonore), physiologique (réception et traitement de l'onde par le système auditif).

Les sources sonores

Les émetteurs: ce sont des systèmes mécaniques: instruments de musique, cordes vocales, haut-parleur....l'émetteur émet souvent un son complexe

Les résonateurs: ce sont des appareils, qui soumis à une excitation unique, se mettent à vibrer selon une fréquence qui leur est propre.

La cavité buccale: elle présente une structure complexe, mais curieusement ses propriétés acoustiques sont assez proche de celles d'un modèle simple.

Célérité du son

La vitesse (c) d'une onde acoustique dans les matériaux est appelée célérité.

Dans un milieu homogène, la vitesse du son est constante ; elle ne dépend pas de l'amplitude des vibrations sonores et ne dépend pas de la fréquence des vibrations sonores si on admet que le milieu est non dispersif.

On peut utiliser les relations approchées qui suivent:

Célérité du son dans les solides:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

avec,

c : célérité du son en m/s.

E : Module d'Young du solide en N/m². (encore appelé « module d'élasticité longitudinale » du solide).

ρ : masse volumique du milieu en Kg/m³.

Célérité du son dans les liquides:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

avec,

c : célérité du son en m/s.

K : Module de compressibilité isotherme du liquide en N/m² ou en Pa .

ρ : masse volumique du milieu Kg/m³.

Célérité du son dans les gaz :

Loi de Laplace

$$c = \sqrt{\frac{YP}{\rho}}$$

avec,

c : célérité du son en m/s.

Y : coefficient de compression adiabatique (sans unité)

P : pression absolue du gaz (Pa)

ρ : masse volumique du milieu en Kg/m³.

Puissance et Intensité sonores

La puissance

est une **quantité d'énergie** émise pendant un certain **temps**. Une source sonore diffuse de l'énergie acoustique. En général, l'énergie désigne tout ce qui permet d'effectuer un travail, fabriquer de la chaleur, de la lumière ou un mouvement.

L'énergie se mesure en Joule (J). L'énergie acoustique correspond aux mouvements des molécules d'air propageant l'onde acoustique. Si une source acoustique émet un son d'énergie égale à E Joules pendant un intervalle de temps Δt secondes, alors on définit la puissance acoustique p de la source comme

$$p = \frac{E}{\Delta t}$$

la puissance acoustique se mesure en Watts (W).

L'intensité acoustique

L'**intensité** est un **flux d'énergie** transportée par unité de **surface**. Ou intensité sonore, correspond donc à une quantité d'énergie acoustique E (en joules) qui traverse une surface (réelle ou virtuelle) S en m^2 pendant un temps Δt (en secondes). Elle se définit comme :

$$I = \frac{E}{S\Delta t}$$

et elle se mesure en **W/m²**.

L'intensité et la puissance acoustique sont reliées par la relation

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

L'intensité et la pression acoustique sont reliées par la relation suivante :

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

avec c est la célérité du son et ρ est la masse volumique du milieu.

La pression acoustique

(aussi appelée **surpression acoustique**). Lors de la propagation d'une onde acoustique, les molécules d'air en mouvement modifient légèrement la pression localement. Cette variation de pression est ce que l'on appelle la pression acoustique P . Ainsi, en un point de l'espace, la pression totale :

$$P_{tot} = P_{atm} + P$$

avec

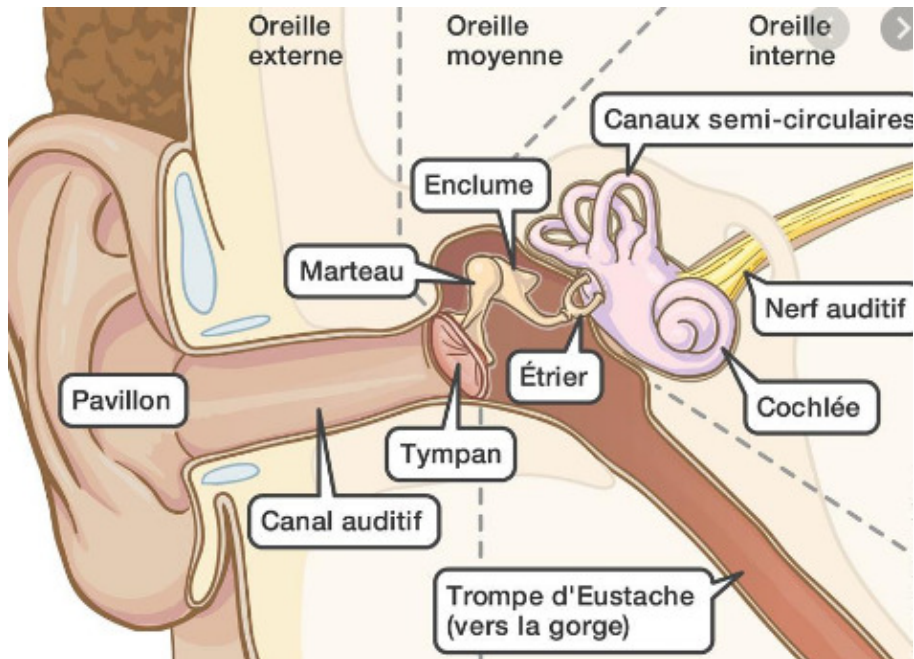
$$P = v \cdot \rho \cdot c$$

où ρ est la masse volumique du milieu considéré et v est la vitesse vibratoire d'un point du milieu du mouvement.

On peut donc relier la puissance et la pression acoustique par la relation

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

Cette pression acoustique exerce une force sur le tympan. Elle met en vibration le tympan qui transmet les ondes au cerveau via les mécanismes de l'oreille moyenne et de l'oreille interne.



Remarque

La pression atmosphérique est une pression qu'on appelle "absolue", donc toujours positive, alors que la pression acoustique est une fluctuation autour de la pression atmosphérique, et est donc alternativement positive (surpression) ou négative (dépression).

Impédance acoustique

Notée Z , c'est une grandeur particulièrement importante pour caractériser un milieu. elle présente la résistance à la propagation de l'onde et est donnée par:

$$Z = \rho \cdot c = \frac{P}{v}$$

Z est exprimé par $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{RAYL}(\text{Rayleigh})$

Quelques valeurs d'impédance acoustique:

Matériau Tissu	Célérité m/s	Impédance Acoustique « $\text{kg/m}^2/\text{s} \times 10^6$ »
Air	330	0,0004
Graisse	1450	1,38
Eau à 37° C	1530	1,48
Sang	1580	1,61
Tissu mou	1540	1,3 - 1,63
Muscle	1600	1,7
Os	3000 à 4000	3,8 - 7,8
Foie	1570	1,62

Niveau sonore:

Le niveau sonore noté L d'un son d'intensité sonore I à un son d'intensité sonore I_0 est égal en bels (B) à:

$$L = \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Comme le bel est une unité très grande, il est d'usage d'employer la sous unité décibel (dB), alors

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

avec I_0 est l'intensité de référence qui correspond à la plus petite intensité acoustique détectable par l'oreille d'une fréquence 1000Hz et donnée par $10^{-12} W \cdot m^{-2}$.

Seuil d'audition et de douleur

Le seuil d'audition correspond au son le plus faible (en intensité) que l'oreille est capable de percevoir. La pression acoustique correspondante vaut à 1000Hz: $P_{réf.} = 20\mu Pa$

Cette pression est appelée pression de référence. Elle correspond à une vibration du tympan d'environ $0,3 \cdot 10^{-10} m$.

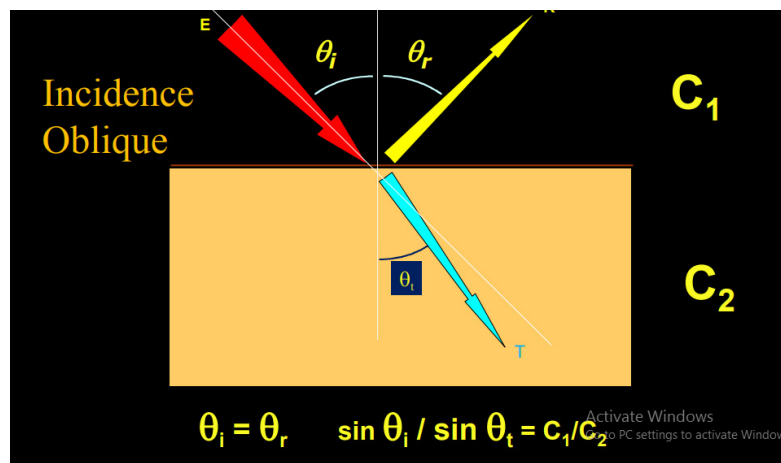
Le seuil de douleur correspond à la pression acoustique d'intensité maximale que l'oreille peut supporter sans être endommagée: $P_{douleur.} = 20 Pa$

Bases physiques de l'échographie

Propagation des ondes acoustiques

l'onde acoustique suit le même processus de réflexion et de réfraction comme l'onde lumineuse, donc elle subit les lois de Snell-descarte

$$\theta_i = \theta_r$$
$$\frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2}$$



θ_i est l'angle d'incidence, θ_t est l'angle de réfraction ou transmission, et θ_r est l'angle de réflexion

Où c_1 et c_2 sont respectivement célérités du son dans les milieux d'incidence et de réfraction (transmission).

Interaction des ultrasons avec la matière

Dans un milieu hétérogène (être vivant): trois mécanismes distincts sont responsables de l'atténuation globale du faisceau.

Absorption

Réflexion- réfraction

Diffusion.

Atténuation par absorption

Lors de la propagation de l'onde, une partie de l'énergie ultrasonore est absorbée par le milieu
→ diminution de l'intensité acoustique, selon la loi d'exponentielle

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

Avec, I est l'intensité acoustique pour une profondeur de pénétration x

I_0 est l'intensité incidente

α est le coefficient d'absorption, s'exprime en Nepers.m^{-1} et dépend de la fréquence suivant la relation:

$$\alpha = k f^b$$

Où,

k est une constante.

f est la fréquence de l'onde acoustique.

b est compris entre 1 et 2 selon les tissus absorbants. Pour l'eau, $b = 2$. En général, pour les tissus mous, $b = 1$

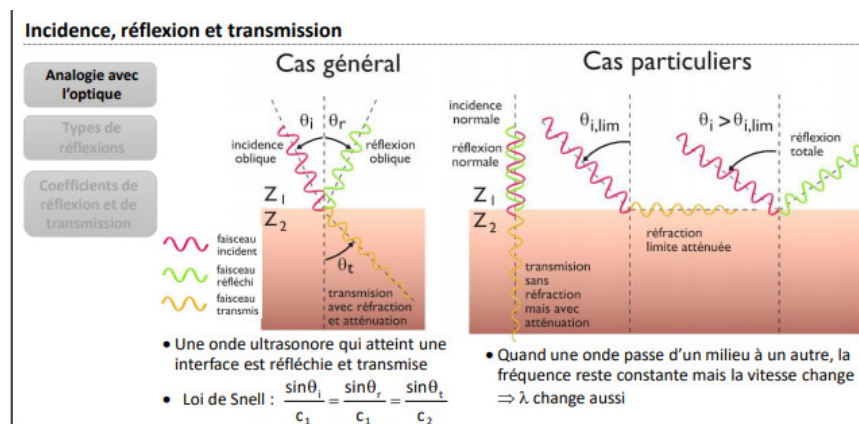
Remarque

L'atténuation augmente lorsque la fréquence augmente.

Le choix de la fréquence des ultrasons en fonction de la profondeur de l'organe:

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

Atténuation par réflexion- réfraction



Le coefficient de réflexion R : est le rapport entre l'énergie réfléchi I_r et l'énergie incidente I_i

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

Et le coefficient de transmission T : est le rapport entre l'énergie transmise I_t et l'énergie incidente I_i

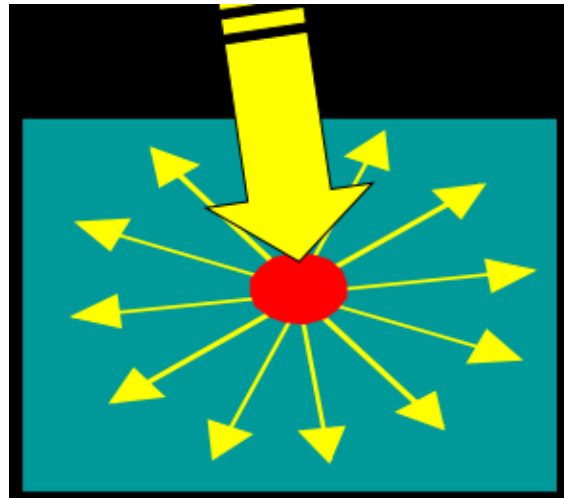
$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

et

$$R + T = 1$$

Atténuation par diffusion

Quand la taille de la cible est petite par rapport à λ l'énergie de l'onde ultrasonore est diffusée, avec réémission dans toutes les directions de l'espace.

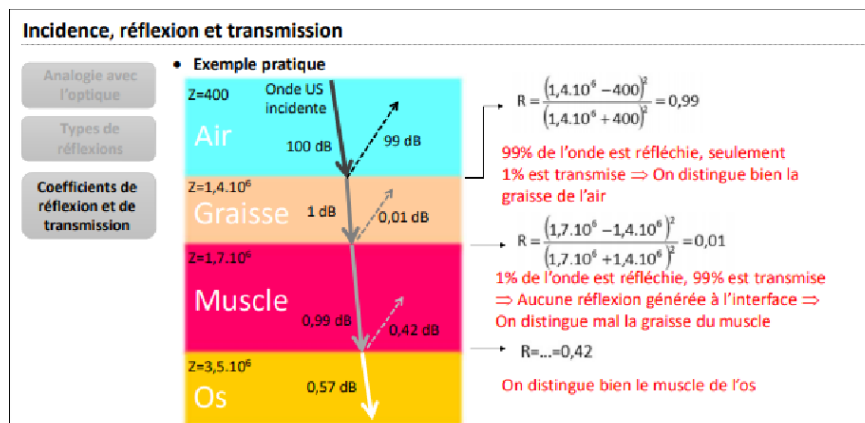


Exemple1:

pour une fréquence d'émission de 5MHz et $\lambda = c/f = 0,308\text{mm}$
($f = 5 \cdot 10^6\text{Hz}$ et $C = 1540 \cdot 10^3\text{mm/s}$)

Taille du globule rouge = $7\text{ }\mu\text{m} = 0,007\text{ mm} \rightarrow$ Diffusion

Exemple2: application de déterminer le coefficient de réflexion et de transmission



La production des ultrasons

C'est en 1917 qu'est apparu le premier générateur d'ultrasons. Actuellement trois phénomènes sont utilisés; et dans les trois cas l'énergie électrique transportée par des courants alternatifs de fréquence élevée est transformée en énergie mécanique (oscillations d'un système mécanique).

Les générateurs piézoélectriques

La piézoélectricité a été utilisée par le français Paul Langevin pour réaliser un générateur d'ultrasons dans lequel l'élément essentiel est constitué par une sorte de mosaïque de lamelles de quartz (minéral du groupe des silicates), d'orientation et d'épaisseur rigoureusement identiques, collées entre deux disques d'acier. L'ensemble est appelé un triplet. On relie les deux disques métalliques aux deux bornes d'une source de courant alternatif. Les lames de quartz présentent la propriété de se déformer à la même fréquence que celle de la tension qui leur est appliquée. Elles produisent des vibrations mécaniques qui sont transmises au milieu dans lequel se trouve l'appareil.

Les émetteurs magnétostrictifs

Les émetteurs magnétostrictifs constituent une application d'une propriété des corps ferromagnétiques qui consiste en une variation des dimensions du corps lorsque celui-ci est placé dans un champ magnétique variable (magnétostriction). Par exemple, on peut utiliser un empilement de tôles de nickel et le placer à l'intérieur de deux enroulements, l'un parcouru par un courant continu (pour obtenir un champ magnétique constant convenable), l'autre parcouru par un courant alternatif (pour produire un champ magnétique variable). Le champ résultant permet d'obtenir une contraction relative assez importante et donc une vibration d'amplitude assez grande. Ces émetteurs sont très robustes (fortes) mais ils ne permettent pas de produire des ultrasons de fréquence supérieure à 50 000 Hz.

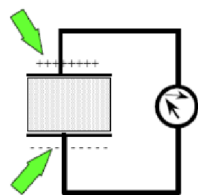
L'électrostriction

L'électrostriction est une propriété de tout matériau non-conducteur, ou diélectrique, qui consiste en une modification de sa forme sous l'effet d'un champ électrique appliqué. Elle est l'équivalent électrique de la magnétostriction. Alors l'électrostriction de certaines céramiques (titanate de baryum, zirconate de baryum ou de plomb) consiste en une variation des dimensions du corps lorsque celui-ci est placé dans un champ électrique variable. Donc l'utilisation de cette propriété permet d'obtenir des vibrations ultrasonores.

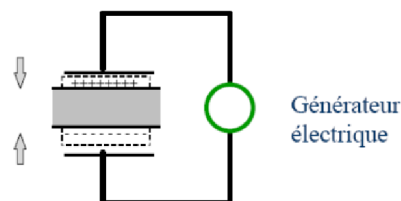
La détection des ultrasons

La détection et la mesure des ultrasons sont réalisées au moyen d'appareils divers. Les phénomènes piézoélectriques, magnétostrictifs et électrostrictifs étant réversibles, les dispositifs utilisés à l'émission peuvent constituer des récepteurs. Dans ce cas, les vibrations mécaniques engendrent une tension électrique de même fréquence que les ultrasons à détecter et c'est cette tension qui est étudiée. Les ultrasons exercent une pression de radiation qui devient appréciable quand l'énergie de rayonnement est suffisamment grande. La poussée qui est alors exercée sur une petite palette de surface connue peut être mesurée. Les ultrasons sont aussi détectés au moyen de différents dispositifs interférométriques ou d'appareils conçus pour étudier les ondes stationnaires.

1-Effet Piézoélectrique direct
(réception)



2-Effet Piézoélectrique inverse
(émission)



Principes de l'échographie

Le principe de l'échographie est assez proche du sonar (un appareil utilisant les propriétés particulières de la propagation du son dans l'eau pour détecter et situer les objets sous l'eau en indiquant leur direction et leur distance). Lors de cet examen d'imagerie dont les fréquences utilisées dépendent des organes ou des tissus biologiques à sonder entre 2 MHz et 15 MHz, on pose **une sonde** d'échographie, qui contient **un émetteur-récepteur** d'ultrason sur la peau du patient. Afin d'optimiser la pénétration des ondes ultrasonores à travers la peau et obtenir une image de bonne qualité, on applique **un gel** d'échographie dont la composition et la viscosité varient selon l'examen effectué.

Une fois dans le corps, ces ultrasons à haute fréquence se déplacent différemment en fonction

des tissus qu'ils traversent. Ils sont ensuite réfléchis et retournent vers l'émetteur. Ces informations sont analysées par un ordinateur afin de créer une image en noir et blanc de la région analysée. Les images sont actualisées plusieurs fois par seconde pour former une vidéo.

Au contraire de la radiographie, qui utilise des rayons X, l'échographie est un examen indolore et sans risque pour la santé. L'échographie a de nombreuses applications : observations des muscles, des organes profonds, de l'abdomen ou le fœtus lors d'une grossesse.

L'échographie consiste à émettre des ultrasons en direction des tissus et organes à observer, puis à recueillir et analyser les échos des ultrasons selon la distance et l'impédance des milieux sur lesquels ils ont rebondi.

Dans l'échographie classique, en deux dimensions (2D), un balayage (manuel, mécanique, électronique) permet d'émettre simultanément plusieurs lignes de tir, dans différentes directions. Un traitement informatique des échos recueillis permet de représenter les milieux traversés en fonction de leur impédance, pour recréer une image en deux dimensions représentant un plan de coupe de la zone analysée :

les milieux de faible impédance (écho faible) sont représentés en noir : ils peuvent correspondre à des milieux liquides ou des tissus mous,

les milieux de forte impédance (fort écho) sont représentés en blanc.

Plus récemment, l'échographie 3D a été développée et permet, comme son nom l'indique, d'obtenir une image tridimensionnelle. Dans ce cas, un balayage mécanique ou électronique permet d'accumuler les informations obtenues sur différents points d'échos depuis différents points d'émission. Leur traitement informatique permet de créer l'image 3D.

L'amélioration des sondes piézoélectriques et des capacités de calcul et d'acquisition permettent d'envisager une imagerie 4D, c'est-à-dire une 3D au cours du temps. De telles méthodes sont déjà utilisées dans des laboratoires de recherche, et leur développement pourrait prochainement offrir une méthode d'acquisition ultrarapide, permettant d'observer les organes ou le fœtus avec une précision inégalée.

L'échographie Doppler est quant à elle très utilisée dans l'examen non invasif (non chirurgical) des vaisseaux sanguins. Elle repose sur l'effet Doppler: lorsqu'une source d'onde est en mouvement (source mobile), la fréquence de l'onde qu'elle émet varie selon le sens et la vitesse de direction. Ce principe permet de mesurer la fréquence réfléchie et de la comparer à la fréquence émise, selon la vitesse de déplacement des globules rouges dans le vaisseau.

Par définition, on appelle fréquence Doppler la quantité:

$$\Delta f = f_{\text{source}} - f_{\text{récepteur}} = 2f_{\text{source}} \cdot \frac{v \cdot \cos \theta}{c}$$

Avec, v est la vitesse de la cible.

c est la célérité du signal ou l'onde acoustique dans les tissus biologiques.

θ est l'angle entre le vecteur de direction de l'onde sonore et le vecteur de la vitesse de la cible.

Les ultrasons thérapeutiques

Les ultrasons thérapeutiques utilisent des ondes de plus haute intensité, qui sont délivrées en continu en un point précis du tissu. Elles engendrent un échauffement thermique et des modifications locales (création de bulles de gaz, nécrose, coagulation) qui vont participer à l'effet thérapeutique recherché. Les ultrasons sont ainsi utilisés pour détruire des lésions bénignes ou malignes (tumeurs, calcifications, calculs...).

Ultrasons en laboratoire

(biologie, chimie, etc.): la sonication est l'utilisation d'ultrasons pour rompre les membranes cellulaires ou des agrégats moléculaires, pour nettoyer ou désinfecter du matériel, en utilisant un bain à ultrasons.

Ultrasons en kinésithérapie

Les ultrasons sont utilisés en kinésithérapie depuis des dizaines d'années. On les utilise dans les entorses fraîches, dans les blessures musculaires (élongation, déchirures, claquages), les pathologies des tendons et les tendinopathies, les bursites, les enthésopathies, les douleurs

articulaires, les douleurs cartilagineuses.

Ultrasons en esthétique,

Avec des ultrasons basse fréquence (avec ou sans cavitation c-à-d l'apparition de bulles formées à partir de gaz dissous ou de vapeur sous l'effet de variations de pression) ou haute fréquence pour permettre la vidange des adipocytes par combinaison des effets mécaniques et thermiques des ultrasons. L'application externe est réalisée sur la peau avec un gel conducteur d'ultrasons similaire à ceux utilisés lors des échographies.

bibitem Corinne Gautier, Service des EFCV - Hôpital Cardiologique, CHRU Lille.

bibitem T. Dufour, cours d'ondes et milieux biologiques-Soorbonne Université Paris, France.

bibitem Inserm la science pour la santé.