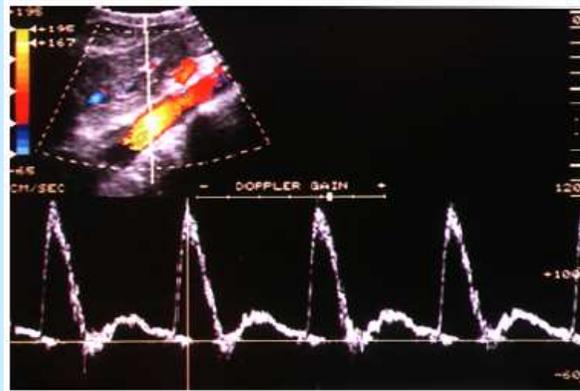


# Bases physiques des ultrasons (BPU)



Dr E. Garin  
MCU-PH,  
Service de médecine nucléaire  
Centre Eugène Marquis

# Plan du cours BPU

- 1. Généralités sur les phénomènes périodiques**
- 2. Ondes sonores**
- 3. Notion de diffraction**
- 4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction**
- 5. Notion d'absorption**
- 6. Effet Doppler-Fizeau**
- 7. Applications médicales des ultrasons**
- 8. Son : phénomène subjectif**

# Introduction

**Qu'est-ce qu'un son :**

**- Phénomène physique : vibration d'un milieu matériel se propageant de proche en proche = onde**

**\* mouvement vibratoire (en 1 point)**

**\* mouvement longitudinal (de propagation)**

**- Phénomène subjectif : sensation qu'en donne l'oreille**

**Les sons sont classés en fonction de la vitesse de propagation des vibrations dans le milieu et de la détection possible par l'oreille :**

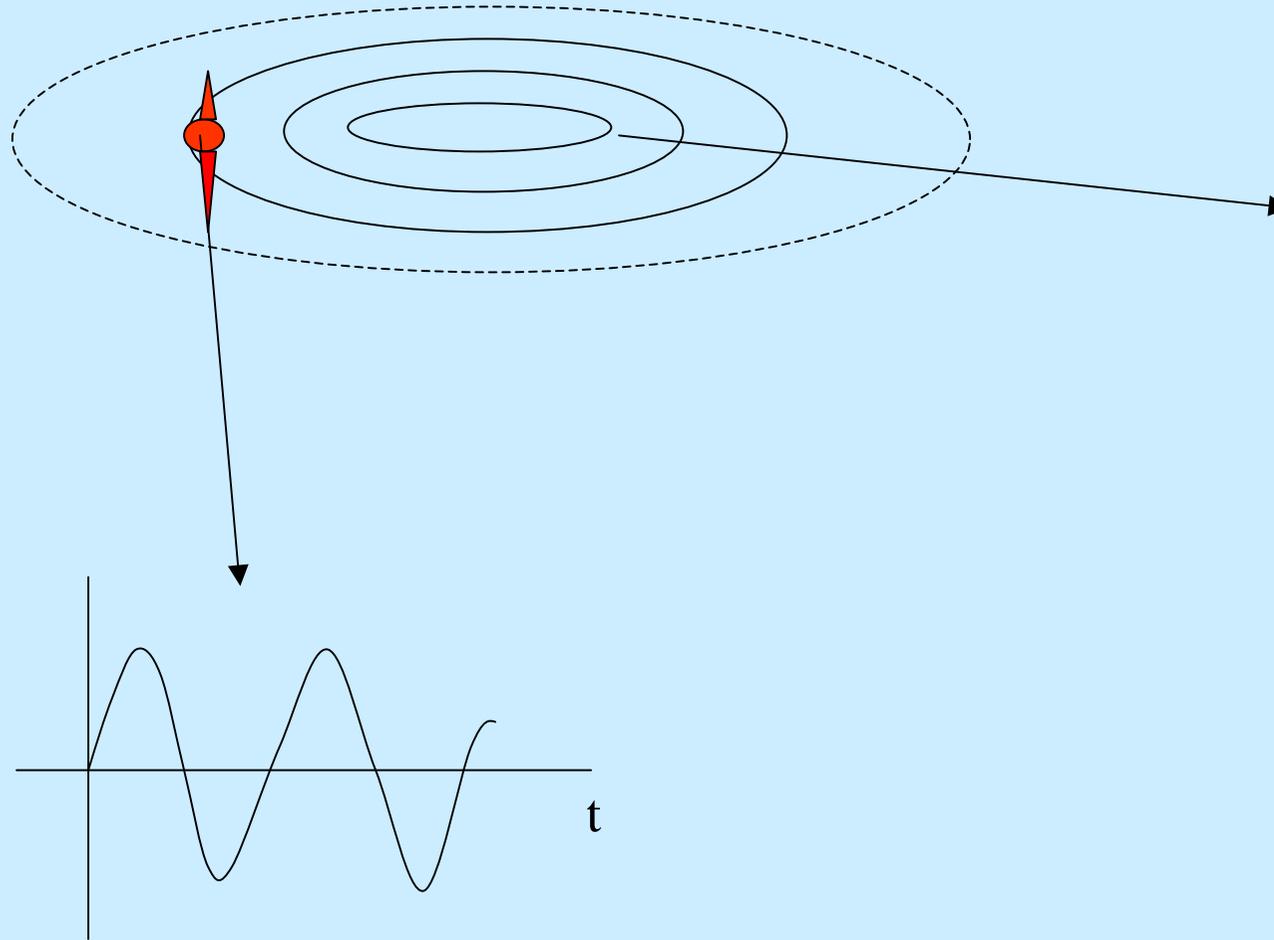
**- infra-sons, inaudibles, vitesse de propagation lente**

**- sons audibles, vitesse de propagation intermédiaire**

**- ultrasons, inaudibles, vitesse de propagation rapide**

**Le son est un phénomène périodique**

# Exemple d'une pierre lancée dans l'eau



# Introduction

Qu'est-ce qu'un son:

- **Phénomène physique: vibration d'un milieu matériel se propageant de proche en proche = onde**

\* mouvement vibratoire (en 1 point)

\* mouvement longitudinal (de propagation)

- **Phénomène subjectif : sensation qu'en donne l'oreille**

**Les sons sont classés en fonction de la vitesse de propagation des vibrations dans le milieu et de la détection possible par l'oreille:**

- infra-sons, inaudibles, vitesse de propagation lente
- sons audibles, vitesse de propagation intermédiaire
- ultrasons, inaudibles, vitesse de propagation rapide

**Le son est un phénomène périodique**

# Plan du cours

- 1. Généralités sur les phénomènes périodiques**
2. Ondes sonores
3. Notion de diffraction
4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction
5. Notion d'absorption
6. Effet Doppler-Fizeau
7. Applications médicales des ultrasons
8. Son : phénomène subjectif

# 1. Généralités sur les phénomènes périodiques

## 1.1. Définitions

- 1) Période
- 2) Fréquence
- 3) Elongation
- 4) Amplitude
- 5) Vitesse du mouvement vibratoire
- 6) Vitesse de propagation

## 1. 2. Phénomènes sinusoïdaux

## 1.1. Définitions

Un phénomène périodique est un phénomène qui se reproduit dans le temps en restant identique à lui même.

Il est caractérisé par différents paramètres :

### La période T (en s):

C'est le temps au bout duquel le phénomène se reproduit

### La fréquence $\nu$ :

C'est le nombre de période T par unité de temps

On a :

$$\nu = 1/T$$

unité = hertz, (Hz), = s<sup>-1</sup>

#### **L'élongation «u »:**

Elle correspond au mouvement « u » d'une particule en un point donné x du milieu

#### **L'amplitude A:**

C'est la valeur maximale de l'élongation

On a:  $\mathbf{u}_{(x,t)} = \mathbf{A}f(t)$

#### **La vitesse et l'accélération du mouvement vibratoire :**

Ce sont la vitesse « v » et l'accélération «  $\gamma$  » du déplacement d'un point du milieu lors du mouvement vibratoire

On a :  $\mathbf{v} = \mathbf{du/dt} = \mathbf{Af'(t)}$

$$\mathbf{\gamma = dv/dt = d^2u/dt^2}$$

#### **La vitesse de propagation ou célérité c :**

C'est la vitesse de déplacement de l'onde dans le milieu

## 1.2. Phénomènes sinusoïdaux

**Ce sont les phénomènes vibratoires les plus simples et les plus fréquents**

Ils répondent à l'équation suivante:

$$U_{(x,t)} = A \sin(\omega t),$$

avec  $u$  = élongation

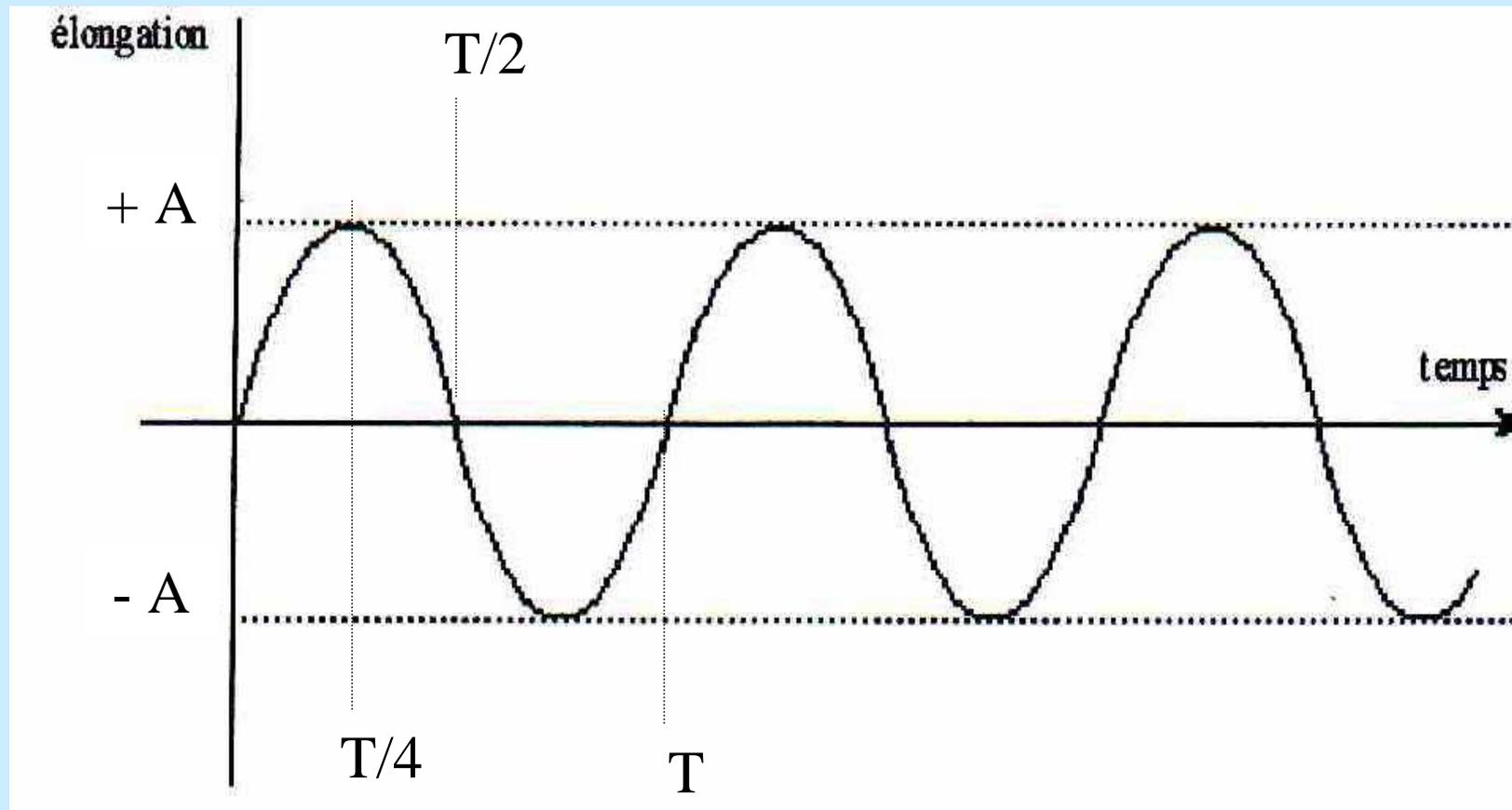
$A$  = amplitude

$\omega$  = pulsation du mouvement,  
exprimée en radien  $s^{-1}$

La période de la fonction sinus est  $2\pi$ , la période  $T$  du mouvement sinusoïdal est telle que :

$$\omega T = 2\pi \text{ d'ou : } \omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$$

Représentation graphique de la fonction sinusoidale:



Etat vibratoire en un point x en fonction du temps

**La vitesse  $v$  du mouvement vibratoire sinusoidal peut se calculer**

$$v = du/dt \text{ et } u = A \sin \omega t$$

$$v = d(A \sin (\omega t))/dt \quad \text{comme } (\sin t)' = \cos t, \text{ et } (\sin \omega t)' = \omega \cos \omega t$$

Par ailleurs,  $\cos t = \sin (t + \pi/2)$

$$v = A\omega \cos \omega t = A\omega \sin (\omega t + \pi/2)$$

Comme  $\omega T = 2\pi$ ,  $\pi = \omega T/2$  donc

$$v = A\omega \sin \omega(t + T/4)$$

**L'accélération  $\gamma$  du mouvement vibratoire sinusoidal peut se calculer**

$$\gamma = dv/dt$$

$$\gamma = d(A\omega \cos \omega t)/dt, \quad \text{comme } (\cos t)' = -\sin t$$

$$\gamma = -A\omega^2 \sin \omega t = -\omega^2 u$$

Comme  $\sin (t + \pi) = -\sin t$

$\gamma = A\omega^2 \sin (\omega t + \pi)$  donc

$$\gamma = A\omega^2 \sin \omega (t + T/2)$$

## **Notion de phase et de déphasage**

Le mouvement  $u = A \sin \omega t$  passe par la valeur 0 au temps  $t = 0$  par choix arbitraire de l'origine des temps

Si un deuxième mouvement  $u'$  parfaitement identique au premier est généré avec un décalage dans le temps  $\varphi$ , alors ce mouvement s'écrit :

$$U' = A \sin (\omega t + \varphi)$$

Si  $\varphi$  est positif on parle d'avance de phase

Si  $\varphi$  est négatif on parle de retard de phase

Si  $\varphi = 0$  ou  $k2\pi$  les mouvements sont en phase ou synchrones

Si  $\varphi = \pi$  ou  $(2k + 1) \pi$  les mouvements sont en opposition de phase

Si  $\varphi = \pi/2$  ou  $(2k + 1) \pi/2$  les mouvements sont en quadrature

**Valeur moyenne de l'élongation  $\bar{U}$  :**

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T A \sin \omega t \, dt$$

Comme la primitive de  $\sin \omega t = -(\cos \omega t)/\omega$

$$\bar{U} = A/\omega T [-\cos \omega t]_0^T = A/\omega T [-\cos \omega T + \cos 0],$$

Sur une période

$$\bar{U} = 0$$

Sur une demie période

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} A \sin \omega t \, dt = \frac{2A}{\omega T} [-\cos \omega t]_0^{T/2}$$

$$\bar{U} = \frac{2A}{\omega T} [-\cos \omega T/2 + \cos 0], \quad \text{comme } \omega T = 2\pi$$

$$\bar{U} = 2A/\pi$$

# Plan du cours BPU

1. Généralités sur les phénomènes périodiques
2. **Ondes sonores**
3. Notion de diffraction
4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction
5. Notion d'absorption
6. Effet Doppler-Fizeau
7. Applications médicales des ultrasons
8. Son : phénomène subjectif

## **2. Les ondes sonores**

**2. 1. Généralités**

**2. 2. Célérité du son**

**2. 3. Longueur d'onde**

**2. 4. Pression acoustique**

**2. 5. Flux d'énergie et de puissance**

**2. 6. Densité d'énergie et de puissance**

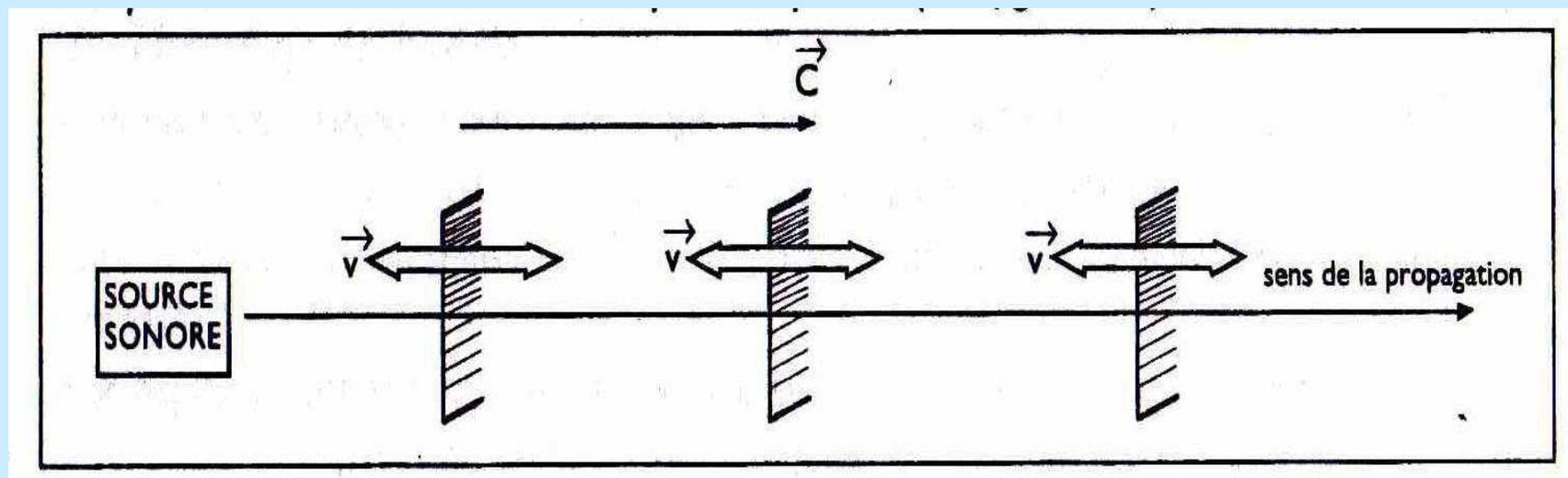
**2. 7. Notion de décibels absolus et relatifs**

## 2. 1. Généralités

L'onde sonore correspond au mouvement (ébranlement) des particules, constituant le milieu de propagation, dans la direction de propagation de l'onde

C'est une onde longitudinale : le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde

En l'absence d'obstacle, l'ébranlement se propage en ligne droite



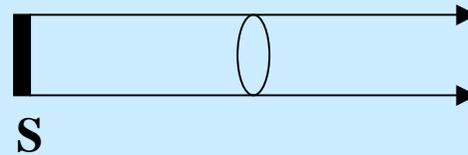
La propagation d'un son s'accompagne d'une ondulation des particules du milieu traversé autour d'un plan d'équilibre

En l'absence d'obstacle, l'ébranlement se propage en ligne droite

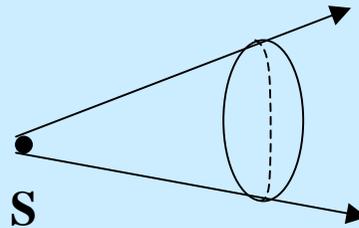
La direction de propagation est le rayon sonore

Les rayons issus d'une même source forment un faisceau sonore qui peut être :

- parallèle



- divergent



Les points présentant le même état vibratoire (c'est-à-dire atteints par l'onde au même instant) sont sur des surfaces appelées surfaces d'ondes, elles sont :

- perpendiculaires au rayon sonore
- planes en cas de faisceau parallèle
- sphériques en cas de faisceau divergent

Pour un son pur, le mouvement est sinusoïdal

$$\Rightarrow u = A \sin \omega t \text{ ou } u = A \sin 2\pi\nu t$$

Pour un son complexe le mouvement est soit périodique et non sinusoïdal soit non périodique (bruit)

Théorème de Fourier

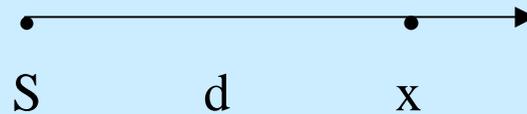
Toute fonction périodique peut être représentée sous la forme d'une somme de fonction sinusoïdales de fréquences multiples d'une fréquence  $\nu$  dite « fréquence fondamentale »

$$\Rightarrow u = A_1 \sin (2\pi\nu t + \varphi_1) + A_2 \sin (2\pi 2\nu t + \varphi_2) + A_3 \sin (2\pi 3\nu t + \varphi_3) + \dots$$

## 2. 2. Célérité du son

La propagation du son n'est pas instantanée : la vibration partie de la source « S » atteint un point « x » au temps « t ».

Le rapport « d/t » définit la célérité « c » de l'ébranlement



C dépend du milieu dans lequel se propage l'ébranlement sonore

$$C = \sqrt{\text{raideur} / \rho}$$

Avec: raideur= grandeur physique caractérisant la force de rappel exercée par le milieu pour ramener à sa position d'équilibre tout élément ayant été déplacé,  $\rho$  = masse volumique

$C = 344 \text{ ms}^{-1}$ , dans l'air sous 1ATM à  $20^\circ\text{c}$

$C = 1430 \text{ ms}^{-1}$ , dans l'eau à  $17^\circ\text{c}$

$C = 5000 \text{ ms}^{-1}$ , dans l'aluminium à  $20^\circ\text{c}$

## **2. 3. Longueur d'onde**

C'est la distance parcourue par l'onde en une période

$$\lambda = cT, \text{ en m}$$

La longueur d'onde est fonction du milieu dans lequel se propage l'onde sonore

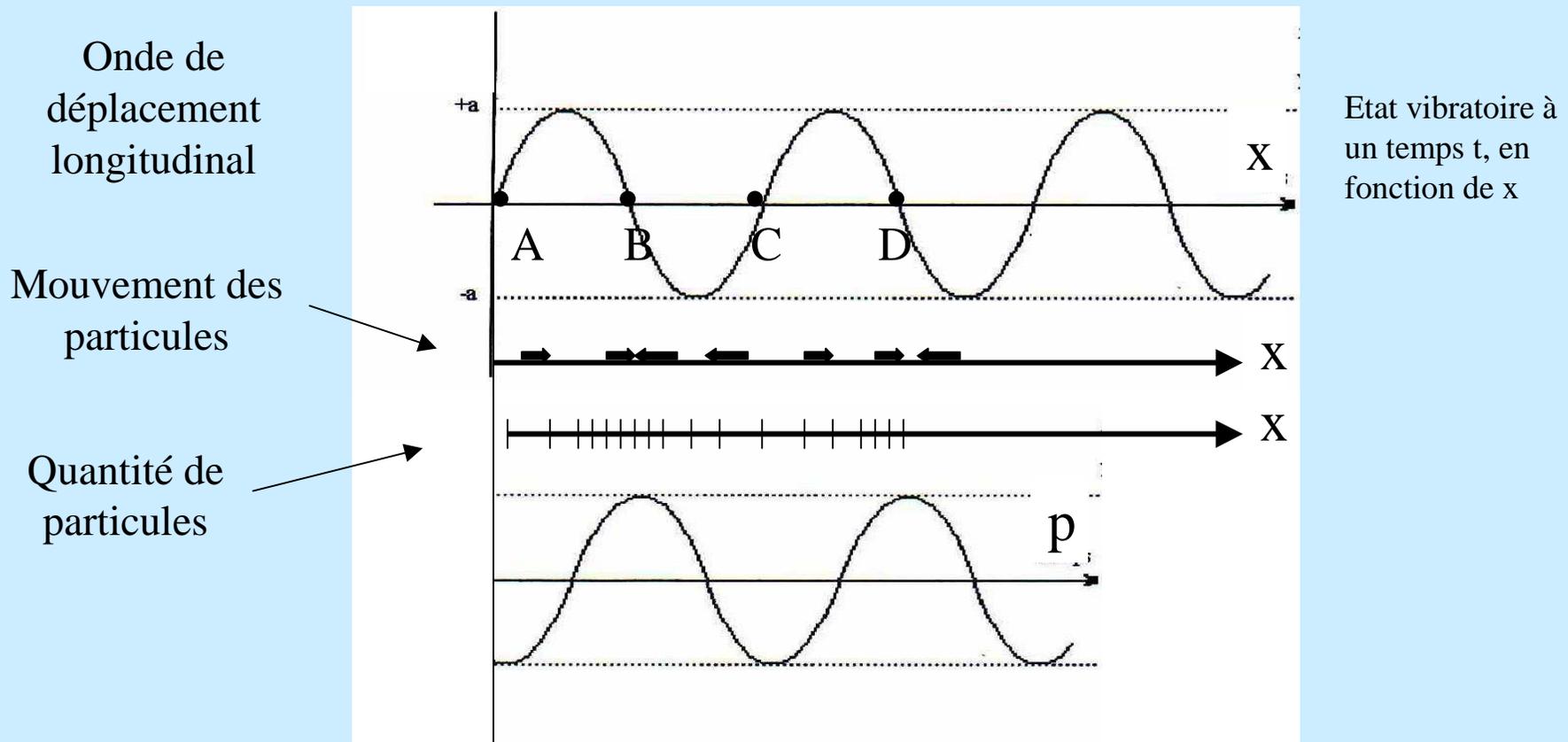
Tous les points séparés les uns des autres par une distance multiple de  $\lambda$  sont en phase

## 2. 4. Pression acoustique

Les particules situées entre A et B ont un déplacement + (elles s'éloignent de la source), entre B et C un mouvement - (elles se rapprochent de la source).

Il y a donc une accumulation de particules et surpression en B et raréfaction en A et C.

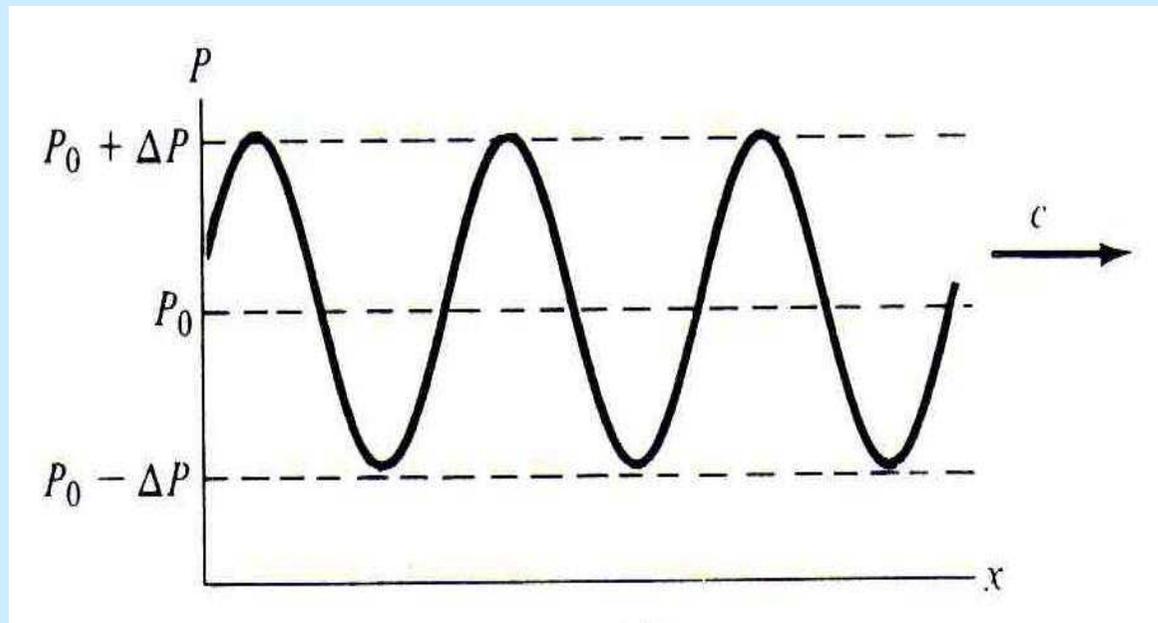
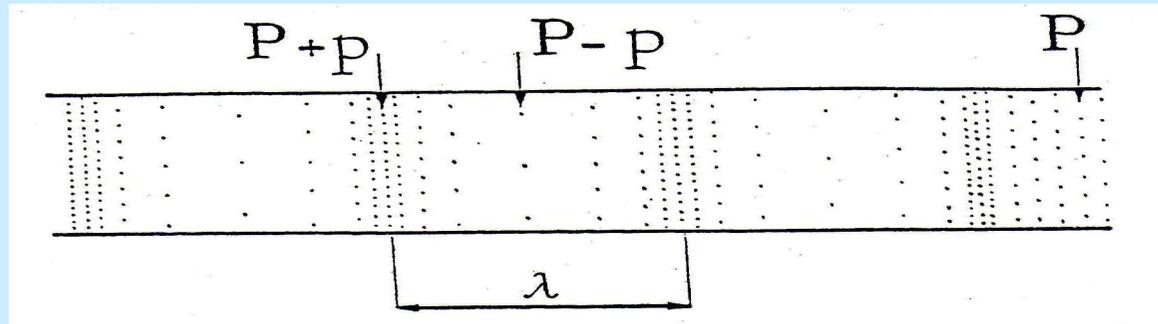
Ces variations de pression constituent la pression acoustique « p »



## 2. Les ondes sonores

## 4. Pression acoustique

En chaque point,  $P = P_{\text{atm}} + p$  et  $p \ll P_{\text{atm}}$



En cas de propagation libre sans obstacle la pression acoustique « p » est définie par :

$$p = v \rho c$$

avec : p en P

v = vitesse

$\rho$  = masse volumique

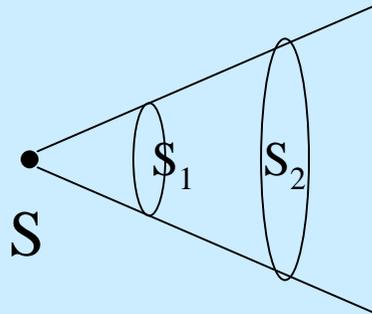
c = célérité

Pour des sons très intenses p peut entraîner une cavitation

La pression acoustique est en avance de T/4 sur le déplacement des particules

P varie de  $20 \cdot 10^{-5}$  à 20 Pa

## 2. 5. Flux d'énergie et de puissance



Puisque les particules de l'espace sont mises en mouvement elles reçoivent de l'énergie.

La surface  $S_1$  coupant le faisceau sonore reçoit une énergie appelée flux d'énergie. Si on considère la quantité d'énergie reçue par unité de temps on parle de flux de puissance.

En l'absence d'absorption par le milieu traversé, toute l'énergie transmise par  $S$  reste dans le faisceau et  $S_2$  reçoit un flux d'énergie identique à  $S_1$ , le flux est dit conservatif.

## 2. 6. Densité d'énergie et de puissance

La densité d'énergie est la quantité d'énergie reçue par unité de surface.

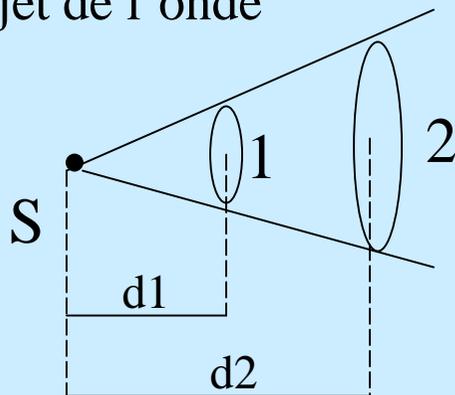
La densité de puissance est la quantité de puissance reçue par unité de surface.

En acoustique, la densité de puissance s'appelle puissance surfacique, en  $Wcm^{-2}$

L'énergie est répartie sur l'ensemble du front d'onde :

- Si l'onde est plane (faisceau parallèle) la densité d'énergie par unité de surface est constante sur le trajet du faisceau sonore.

- Si l'onde est sphérique (faisceau divergent) la densité de puissance se répartie sur une calotte sphérique, elle varie avec l'inverse du carré de la distance le long du trajet de l'onde



$$W_2/W_1 = d_1^2/d_2^2$$

On montre que :

$$l'\text{énergie acoustique } w = v p \cos \varphi$$

Avec  $\varphi$  = déphasage entre  $v$  et  $p$  introduit par un obstacle

En l'absence d'obstacle :

$$w = v p$$

## 7. Notion de décibels absolus et relatifs

Le domaine de variation des puissances surfaciques pour les sons audibles peut varier de 1 à  $10^{12}$  environ

Pour comparer entre eux deux sons on se sert d'une échelle logarithmique

Pour mesurer l'intensité (ou puissance surfacique) d'un son en dB absolus on prend comme référence la puissance surfacique  $w_0$  correspondant au seuil de l'audition à 1000Hz:

$$W_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2} = 10^{-16} \text{ Wcm}^{-2}$$

L'intensité I d'un son est alors:

$$I \text{ Bel} = \log_{10} w/w_0$$

$$I \text{ dB} = 10 \log_{10} w/w_0$$

Applications numériques :

1) Un son de 3 dB a quelle puissance surfacique?

$$3\text{dB} = 10 \log_{10} w/w_0$$

$$\log_{10} w/w_0 = 0.3 \Rightarrow w/w_0 = 10^{0.3} = 2$$

$$w = 2 w_0 = 2 \cdot 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$$

2) Un engin sonore émet un son de 20 dB, quelle est en dB l'intensité du son émis par 10 engins?

$$I_1 = 10 \log_{10} w_1/w_0 = 20$$

Pour un engin la puissance surfacique est  $w_1$ , pour 10 engins identiques la puissance surfacique totale est  $10w_1$

$$I_{10} = 10 \log_{10} 10w_1/w_0 \quad (\log(A \cdot B) = \log A + \log B)$$

$$I_{10} = 10 \log_{10} 10 + 10 \log_{10} w_1/w_0$$

$$I_{10} = 10 + 20 = 30\text{dB}$$

Si on calcul l'intensité en dB d'un son à partir de sa pression acoustique « p » on a :

$$w/w_0 = (p^2/\rho c) \cdot (\rho c/p_0^2) \text{ car } w = vp, p = v\rho c \text{ et } v = p/\rho c$$

$$w/w_0 = (p/p_0)^2$$

$$\log_{10} w/w_0 = 2 \log_{10} p/p_0$$

$$\text{Donc } IdB = 20 \log_{10} p/p_0 \text{ et } p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

On a ainsi défini les dB absolus donnant l'intensité d'un son par rapport à une référence universelle  $w_0$  ou  $p_0$

On peut aussi calculer l'intensité relative d'un son 2 par rapport à un son 1 (on prend le son 1 comme référence) :

$$I_{2/1} = 10 \log_{10} w_2/w_1$$

$$I_{2/1} = 10 \log_{10} (w_2/w_0 \cdot w_0/w_1)$$

$$I_{2/1} = 10 (\log_{10} w_2/w_0 - \log_{10} w_1/w_0)$$

$$I_{2/1} = I_2 \text{ dB} - I_1 \text{ dB}$$

L'intensité relative de 2 sons = la différence de leurs intensités absolues

Ex : un son de 25 dB absolus est de 10dB supérieur à un son de 15 dB

Quelques valeurs pour se repérer :

0 dB = limite d'audibilité

20 dB = chuchotement

50 à 60 dB = conversation normale

80 dB = rue bruyante

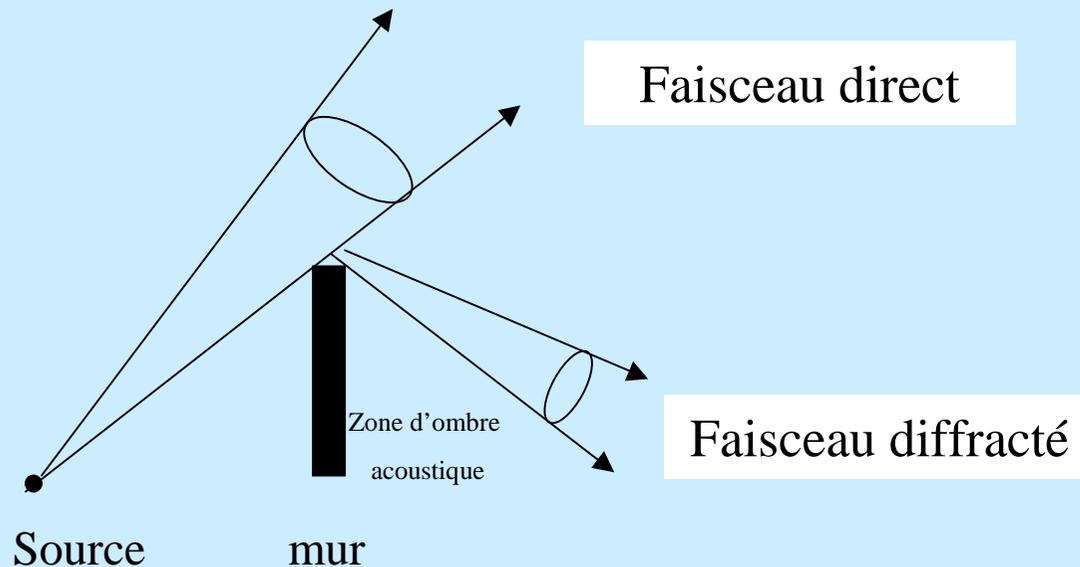
130 à 140 dB = réacteur d'avion

# Plan du cours BPU

1. Généralités sur les phénomènes périodiques
2. Ondes sonores
- 3. Notion de diffraction**
4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction
5. Notion d'absorption
6. Effet Doppler-Fizeau
7. Applications médicales des ultrasons
8. Son : phénomène subjectif

### 3. Notion de diffraction

En l'absence d'obstacle le son se propage en ligne droite.  
L'expérience montre qu'un son peut contourner un obstacle (on entend les sons émis derrière un mur) : c'est la diffraction



La diffraction est due au fait que chaque particule vibrante se comporte comme une source sonore

### 3. Notion de diffraction

L'importance de la diffraction pour un son est fonction de sa longueur d'onde  $\lambda$  et de la taille de l'objet diffractant,

- si taille  $\ll \lambda$  la diffraction est très importante et l'obstacle ne fait pas d'ombre acoustique (grillage)
- si taille  $\gg \lambda$ , la diffraction est négligeable : ombre acoustique importante

Dans l'air:

$\nu$ (Hz)	$\lambda$ (cm)
16	20.6
200	16.5
2000	1.65

Les sons plus aigus ( $\nu$  grande,  $\lambda$  petite) sont moins diffractés par un mur donc moins audibles de l'autre côté du mur

# Plan du cours BPU

1. Généralités sur les phénomènes périodiques
2. Ondes sonores
3. Notion de diffraction
- 4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction**
5. Notion d'absorption
6. Effet Doppler-Fizeau
7. Applications médicales des ultrasons
8. Son : phénomène subjectif

# **4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction**

**4. 1. Propagation d'un son/impédance**

**4. 2. Réflexion/transmission**

### 4. 1. Impédance

La notion d'impédance traduit la proportionnalité entre une fonction d'excitation et l'effet qu'elle produit.

Dans le cas de la propagation d'une onde dans un milieu elle représente l'aptitude du milieu à transmettre l'énergie transportée par l'onde.

$$Z = \sqrt{\text{raideur} \cdot \rho}, \quad \text{et comme } c = \sqrt{\text{raideur}/\rho},$$

$$Z = \rho c, \quad \text{en kgm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ ou rayls}$$

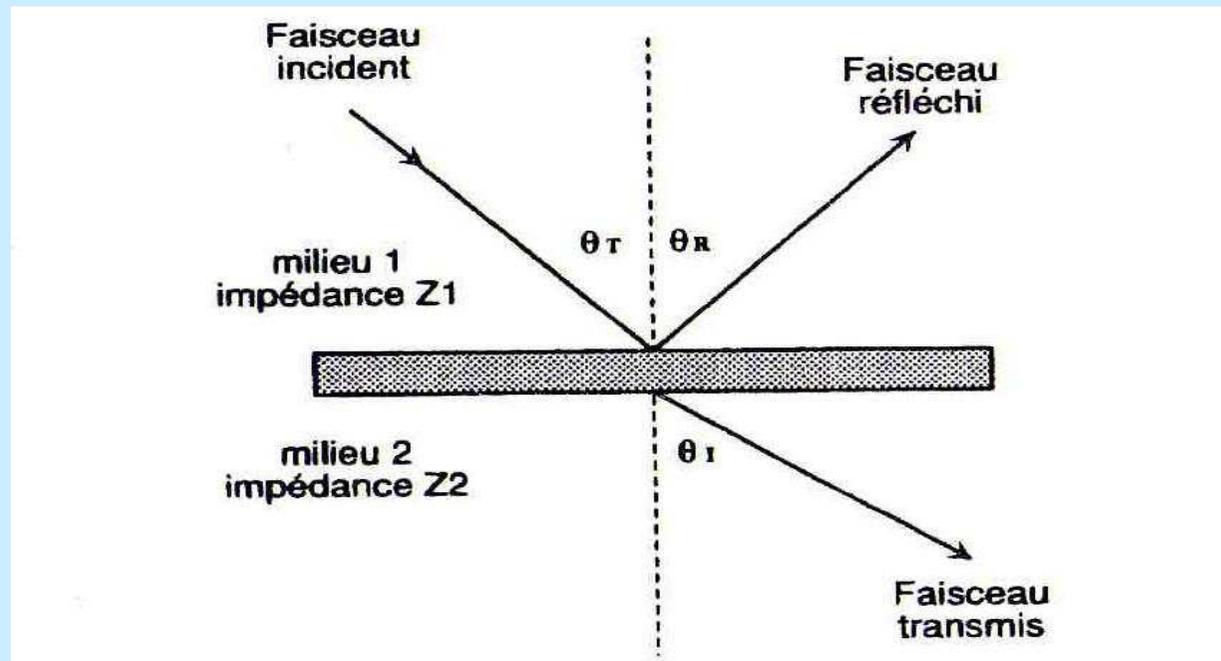
On remarque que  $Z$  est indépendante de la fréquence  $\nu$

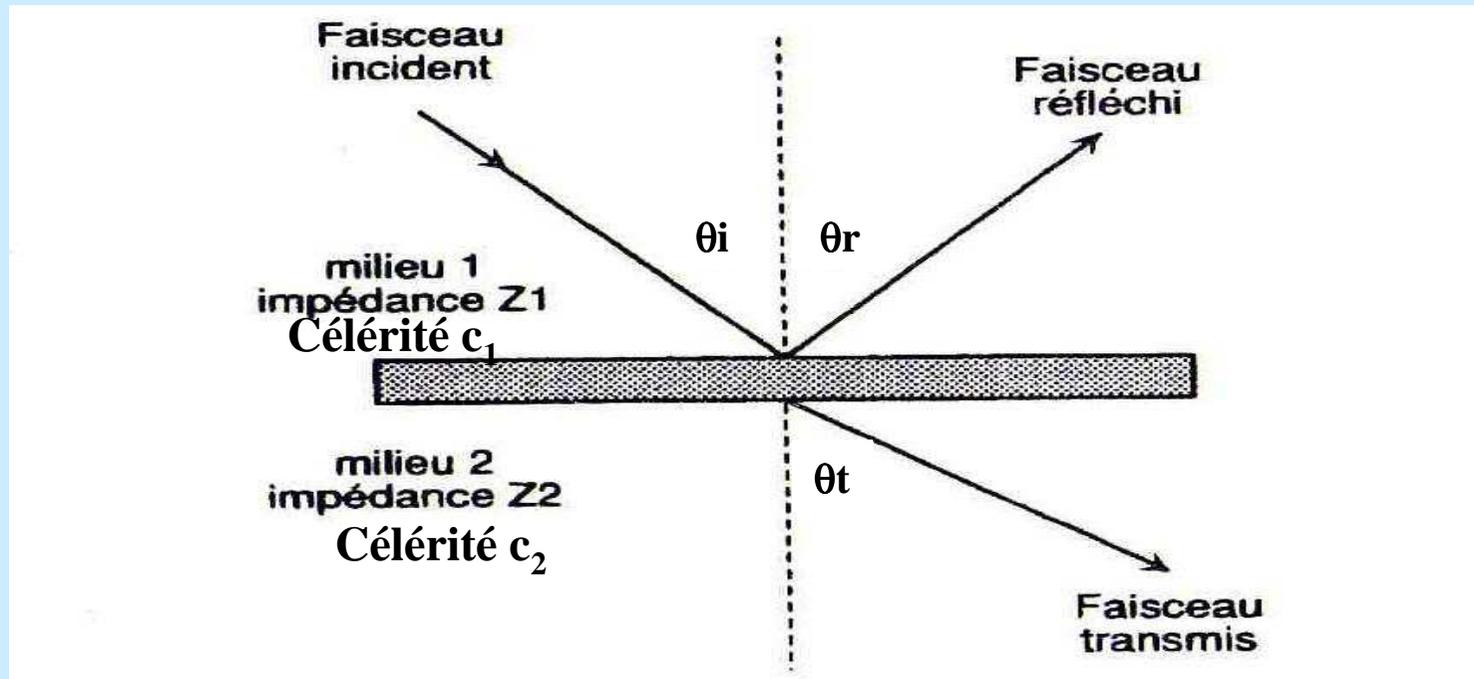
$Z$  fait référence à une « résistance » du milieu matériel à la propagation des ondes sonores.

Plus  $Z$  est élevée et plus la variation de pression acoustique  $p$  doit être grande pour obtenir un déplacement équivalent des particules.

## 4. 2. Réfraction/Réflexion

Lorsqu'une onde sonore provenant d'un milieu matériel M1 traverse une interface séparant ce milieu matériel M1 d'un deuxième milieu matériel M2, on observe qu'une partie de l'onde sonore est réfléchie vers le milieu M1 et qu'une autre partie est transmise au milieu M2 avec un angle différent, le faisceau transmis est appelé faisceau réfracté





Il existe une relation entre les angles des différents faisceaux (relations de Snell, identiques aux loi de Descartes en optique) :

$$\theta_i = \theta_r \text{ et } \sin \theta_i / c_1 = \sin \theta_t / c_2$$

Si  $\theta_i$  et  $\theta_t$  sont petit ( $<10^\circ$ ),  $\sin \theta = \theta$  et on a alors  $\theta_i \cdot c_2 = \theta_t \cdot c_1$

## 4. Propagation

## 2. Réflexion/Réfraction

L'énergie du faisceau incident se divise entre le faisceau réfléchi et le faisceau transmis.

Le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente s'appelle le coefficient de réflexion R

R dépend de l'angle d'incidence, si  $\theta_i$  est proche de  $90^\circ$  (faisceau incident tangentiel à l'interface) alors R est maximum (tout le faisceau est réfléchi, il n'y a pas de transmission)

Pour une incidence normale (perpendiculaire à l'interface)

On a:

$$R = [(Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2)]^2$$

Remarque:

- c'est cette propriété de réflexion des ultrasons qui est exploitée en imagerie avec l'échographie
- Si  $Z_1$  et  $Z_2$  sont proches le faisceau est principalement transmis
- Si  $Z_1$  et  $Z_2$  sont très différents le faisceau est principalement réfléchi

- Si  $Z_1$  et  $Z_2$  sont proches le faisceau est principalement transmis
- Si  $Z_1$  et  $Z_2$  sont très différents le faisceau est principalement réfléchi

On peut imaginer des adaptateur d'impédance permettant au son de passer d'un milieu à un autre milieu d'impédance très différente : ex : oreille moyenne

Le rapport entre l'énergie transmise et l'énergie incidente s'appelle le coefficient de transmission T

On a:

$$T = 4 Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2$$

Par ailleurs,

$$R + T = 1$$

Remarques : ces deux formules donnant R et T sont symétriques, elles caractérisent l'interface quel que soit le sens de propagation de l'onde

# Plan du cours BPU

1. Généralités sur les phénomènes périodiques
2. Ondes sonores
3. Notion de diffraction
4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction
- 5. Notion d'absorption**
6. Effet Doppler-Fizeau
7. Applications médicales des ultrasons
8. Son : phénomène subjectif

# 5. Notion d'absorption

En réalité le milieu de propagation absorbe une certaine quantité d'énergie par 3 mécanismes

- viscosité: frottement des molécules les unes contre les autres
- dissipation thermique (cession de chaleur aux particules voisines)
- diffusion sur des sphères petites par rapport à  $\lambda$  (absorption de l'onde qui est diffusée dans toutes les directions)

On définit la loi d'atténuation :

$$E = E_0 e^{-\alpha x}$$

Avec  $E$  = énergie à la profondeur  $x$

$E_0$  = énergie initiale du faisceau

$\alpha$  = coefficient d'atténuation par absorption ou pouvoir de pénétration,  $m^{-1}$

$\alpha$  caractérise la capacité du milieu à absorber l'énergie du faisceau, il est proportionnel au carré de la fréquence  $\nu$ , dépend du milieu, et de la célérité

$$\alpha = \eta (2\pi\nu)^2 / 2\rho c^3 \text{ avec } \eta = \text{viscosité (Pa s)}, \nu = \text{fréquence (Hz)}, \rho = \text{masses volumique (kg m}^{-3}\text{)}$$

➔ l'absorption est d'autant plus grande que la fréquence est élevée (sons aigus)

# Plan du cours BPU

1. Généralités sur les phénomènes périodiques
2. Ondes sonores
3. Notion de diffraction
4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction
5. Notion d'absorption
- 6. Effet Doppler-Fizeau**
7. Applications médicales des ultrasons
8. Son : phénomène subjectif

## 6. Effet Doppler-Fizeau

Définition : il s'agit d'une modification de fréquence lorsque la source et/ou le récepteur sont en mouvement

Soit une source  $S$  immobile émettant un son pur de fréquence  $\nu$ . Un observateur immobile reçoit ce son à la fréquence  $\nu$ .

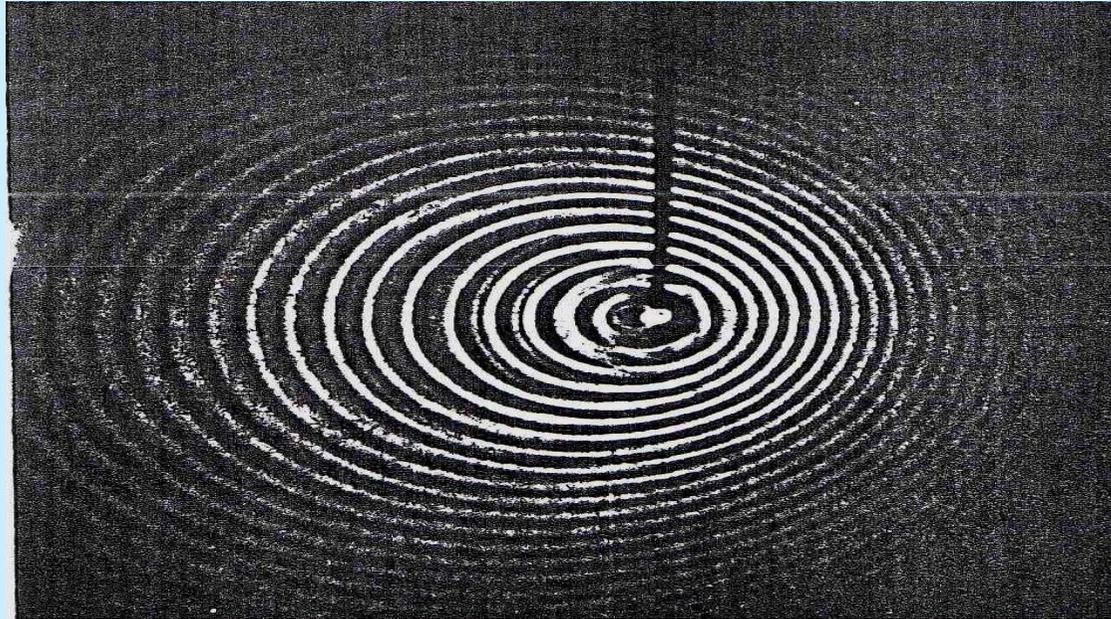
Si la source est mobile par rapport à un observateur fixe, ou que l'observateur est mobile par rapport à la source, la fréquence reçue par l'observateur  $\nu'$ , est différente de la fréquence  $\nu$  émise par la source

Ex de l'observateur sur un circuit de F1:

A vitesse constante la F1 émet un son constant de fréquence  $\nu$  constante

L'observateur perçoit un son aigu quand la voiture se rapproche et un son grave quand la voiture est passée devant lui et qu'elle s'éloigne

## 6. Effet Doppler-Fizeau

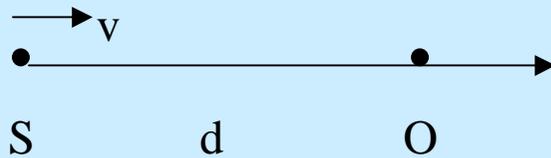


Influence du mouvement de la source dans  
une cuve à ondes

## 6. Effet Doppler-Fizeau

$c$

1<sup>er</sup> cas : source mobile/observateur immobile



Par convention  $v$  est positive de S vers O

La fréquence observée  $\nu'$  est reliée à la fréquence d'émission  $\nu$  par la formule

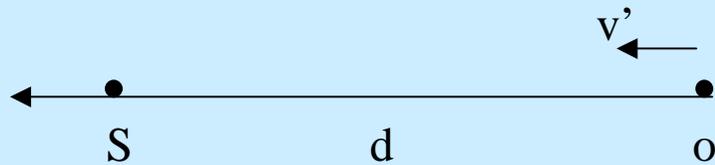
$$\nu' = \nu (c / (c - v))$$

Si  $v$  est  $< 0$  (source qui s'éloigne)  $\nu' < \nu$

Si  $v$  est  $> 0$  (source qui se rapproche)  $\nu' > \nu$

## 6. Effet Doppler-Fizeau

2<sup>ème</sup> cas : source immobile/observateur mobile



Par convention  $v'$  est négative si l'observateur se rapproche de la source

La fréquence observée  $\nu'$  est reliée à la fréquence d'émission  $\nu$  par la formule

$$\nu' = \nu (c - v')/c$$

Si  $v'$  est  $<0$  (observateur qui se rapproche)  $\nu' > \nu$

Si  $v'$  est  $>0$  (observateur qui s'éloigne)  $\nu' < \nu$

## 6. Effet Doppler-Fizeau

3<sup>ème</sup> cas de figure : la source et l'observateur sont mobiles

$$v' = v (c - v') / (c - v)$$

Quand ils se rapprochent  $v' > v$

Quand ils s'éloignent  $v' < v$

Cet effet Doppler-Fizeau est utilisé en médecine pour mesurer les vitesses d'écoulement du sang

## 6. Effet Doppler-Fizeau

**A N** : deux voitures roulent dans le même sens l'une à 72km/h, l'autre à 108km/h,

Avant de doubler la plus rapide klaxonne ( $\nu = 300\text{Hz}$ ).

Calculer la fréquence perçue par les passagers de la voiture qui se fait doubler.

Source = voiture roulant à 108km/h  $\Rightarrow v = 30\text{m/s}$

Observateurs mobiles à 72km/h  $\Rightarrow v' = 20\text{ m/s}$

Avant le dépassement :

*La source se rapproche de l'observateur  $\Rightarrow v > 0$*

*L'observateur s'éloigne de la source  $\Rightarrow v' > 0$*

$$\nu' = \nu (c - v') / (c - v) = 300 (340 - 20) / (340 - 30) = 309.6\text{ Hz}$$

Au moment du dépassement  $\nu' = \nu$

Après le dépassement

*La source s'éloigne  $\Rightarrow v < 0$ , et l'observateur se rapproche  $\Rightarrow v' < 0$*

$$\nu' = \nu (c - v') / (c - v) = 300 (340 + 20) / (340 + 30) = 291.9\text{ Hz}$$

# Plan du cours BPU

1. Généralités sur les phénomènes périodiques
2. Ondes sonores
3. Notion de diffraction
4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction
5. Notion d'absorption
6. Effet Doppler-Fizeau
- 7. Applications médicales des ultrasons**
8. Son : phénomène subjectif

## **7. Applications médicales des ultrasons**

### **7. 1. Définition**

### **7. 2. Rappels physiques sur les ultrasons**

### **7. 3. Production des ultrasons**

### **7. 4. Effets biologiques des ultrasons**

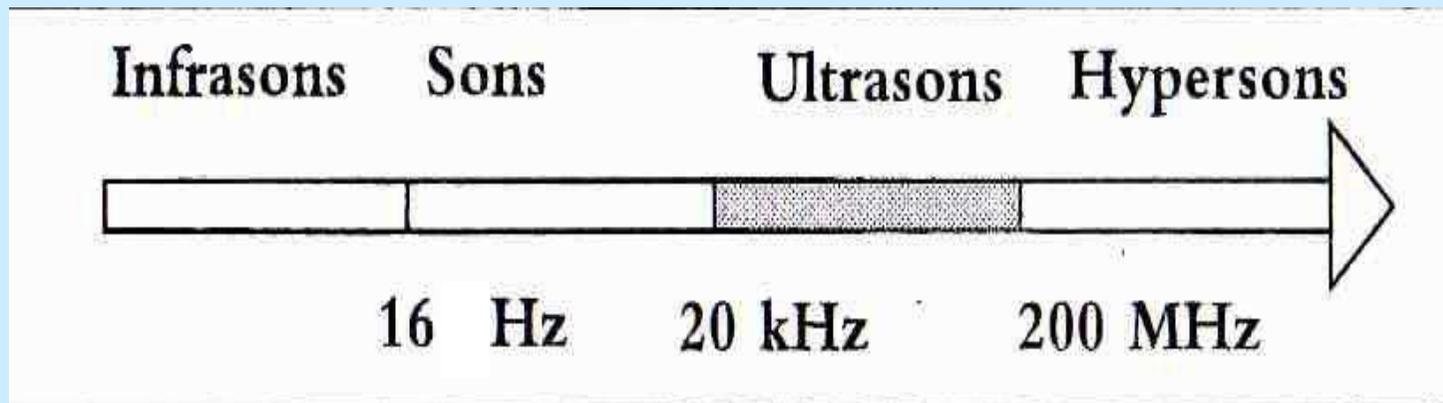
### **7. 5. Applications diagnostiques**

### **7. 6. Applications thérapeutiques**

## 7. 1. Définition

Les ultrasons sont des ondes sonores longitudinales de haute fréquence

A l'exception de leurs fréquences élevées, ils ne diffèrent en rien, d'un point de vue physique, avec les ondes acoustiques de fréquences audibles



Remarque : les fréquences utilisées en médecine sont comprises entre 1 et 30 MHz

## 7.2 . Rappels physiques sur les ultrasons

Rappeler les principales définitions et lois utiles pour la compréhension de l'utilisation des ultrasons dans le domaine médical

Fréquence :  $\nu = 1/T,$  en Hz

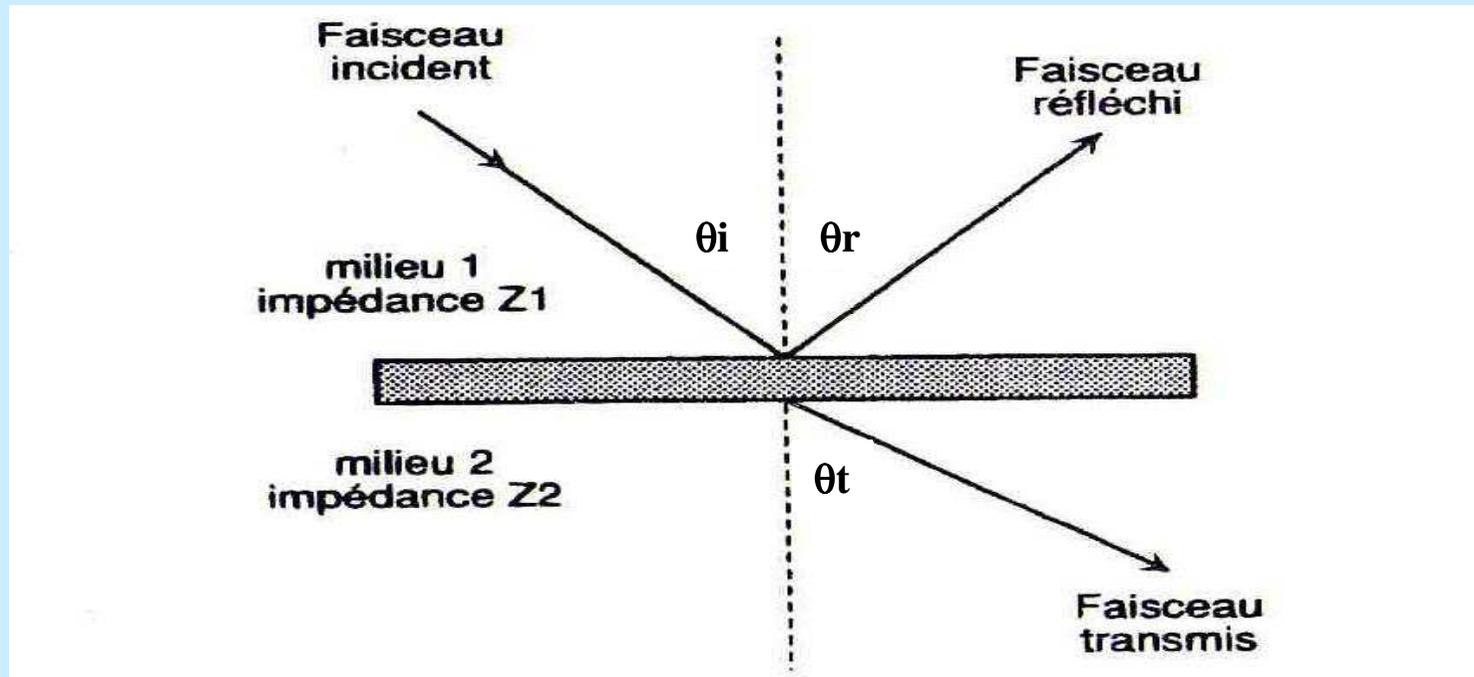
Célérité :  $c = \sqrt{\text{raideur}/\rho}$  en  $\text{m s}^{-1}$

Longueur d'onde :  $\lambda = cT = c/\nu,$  en m

Pression acoustique:  $p = \nu\rho c,$  en Pa

Puissance surfacique:  $w = \nu p = p^2/\rho c$  en  $\text{Wm}^{-2}$

Impédance :  $Z = \rho c,$  en  $\text{kgm}^{-2} \text{s}^{-1}$  ou rayls



### Réflexion/réfraction

Relation entre les angles:

$$\theta_i = \theta_r \text{ et } (\sin \theta_i) / c_1 = (\sin \theta_t) / c_2$$

Coefficient de réflexion :

$$R = [(Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2)]^2$$

Coefficient de transmission :

$$T = 4 Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2$$

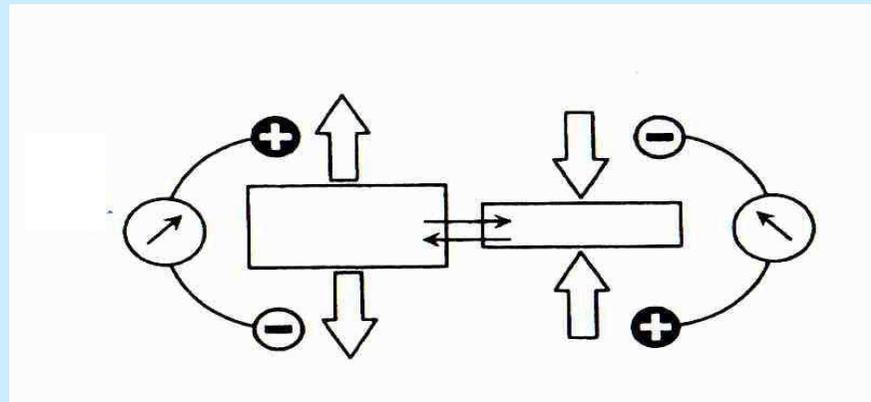
### 7. 3. Production des ultrasons

#### Utilisation de l'effet piézo-électrique:

Si on taille dans un quartz une lamelle et que l'on recouvre ses faces par une électrode avec différence de potentiel alternative, on constate que la lamelle subit une contraction et une dilatation synchrone de la variation électrique engendrant des ultrasons selon la fréquence électrique

Cet effet est réversible : si on comprime le quartz, il apparaît une différence de potentiel

Le même élément peut ainsi être à la fois émetteur et récepteur



## **7.4. Effets biologiques des ultrasons**

Mécanismes physiques des effets biologiques des ultrasons

### Effets thermiques

Une certaine quantité d'énergie du faisceau ultrasonore est absorbée par le milieu et transformée en chaleur.

L'élévation thermique est proportionnelle à l'intensité (puissance surfacique) du faisceau et à la durée d'exposition

### Effets mécaniques

Micro-courant : les modifications de pression du milieu peuvent entraîner l'apparition de courants de fluides

Cavitation : apparition de bulles formées à partir de gaz dissous ou de vapeur sous l'effet des variations de pressions dues à l'onde ultrason. La cavitation survient pour des valeurs élevées d'intensité. A des niveaux d'intensité très élevés des ultrasons la cavitation peut être responsable d'une dissociation de l'eau avec production de radicaux libres H et OH (effondrement des bulles et hyperthermie)

Ces effets biologiques surviennent pour des intensités très supérieures à celles utilisées dans le domaine diagnostique

Ils peuvent se produire pour des intensités  $> 1 \text{ Wcm}^{-2}$

Les appareils utilisés en diagnostique ont des intensités max de  $0.01 \text{ Wcm}^{-2}$  à 2MHz

Contrairement aux radiations ionisantes, qui peuvent avoir des effets biologiques même à faibles doses, les ultrasons sont parfaitement inoffensifs en dessous de  $1 \text{ Wcm}^{-2}$

## 7. 5. Applications diagnostiques : échographie

C'est l'utilisation des propriétés de réflexion/transmission des ultrasons par les différents tissus de l'organisme

Les différents tissus présentent des célérités variables

Milieu (à 37°)	Célérité (ms <sup>-1</sup> )
Eau	1 480
Tissus mous	1 540
Foie	1 550
Rein	1 560
Muscle	1 600
os	3 000

Les différents tissus présentent des impédances différentes : il y a donc des interfaces sur lesquelles l'onde ultrasonore peut se réfléchir

Utilisation d'une sonde constituée de cristaux piézo-électriques permettant l'émission d'une onde ultrasonore et le recueil des ondes réfléchies

milieu	Z (kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) . 10 <sup>6</sup>
Eau	1.5
Tissus mous	1.3 à 1.7
Squelette	3.8 à 7.4
Poumons	0.26
Air	0.0004

Il est nécessaire d'avoir une réflexion pour pouvoir enregistrer le signal (recueillir le faisceau réfléchi) mais il est également nécessaire d'avoir une transmission pour que le faisceau incident puisse pénétrer en profondeur

interface	Coef de réflexion R
Eau/air	0.9989
Eau/os	0.2899
Tissus adipeux/reins	0.0083

On remarque que le coefficient de réflexion eau/air est très élevé:

- nécessité d'éviter toute interposition d'air entre la sonde et le patient (utilisation de gel)
- impossibilité d'explorer les organes creux, poumons en particulier

*7. Applications médicales des ultrasons*

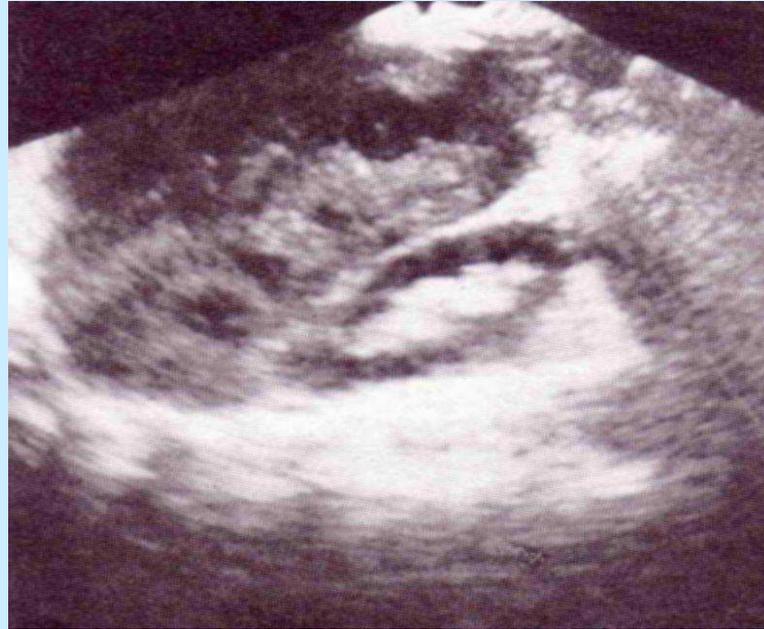


Foie, normal

*5. Applications diagnostiques*



Aorte abdominale

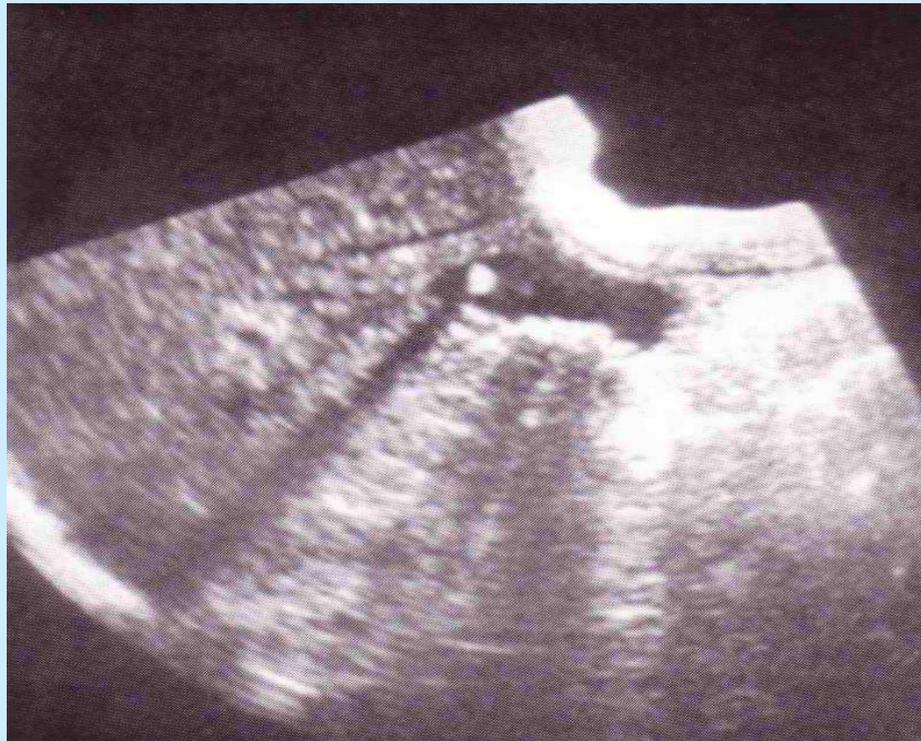


Métastases hépatiques :  
lésions hypoéchogènes

## **Cône d'ombre/ renforcement postérieur**

Cône d'ombre = zone vide d'écho en arrière d'une structure très réfléchissante (ex calcul)

Renforcement postérieur : renforcement des échos en arrière d'une zone peu réfléchissante (liquide, kyste)



Lithiases vésiculaires multiples

## 7. 5. Applications diagnostiques : doppler

L'effet doppler est utilisé pour mesurer la vitesse du sang

Les globules rouges présents dans le sang se déplacent et servent d'interface pour réfléchir le faisceau ultrasonore.

Il se produit alors une modification de fréquence du faisceau réfléchi :

$$v_r = v_0 + \Delta v$$

La différence de fréquence est positive si le sang se rapproche de la source et négative s'il s'éloigne.

Si le sang se déplace dans le même axe que le faisceau, on a:

$$\Delta v = 2 v \cdot v_0 / c \quad \text{ou } v = \text{vitesse de déplacement du sang}$$

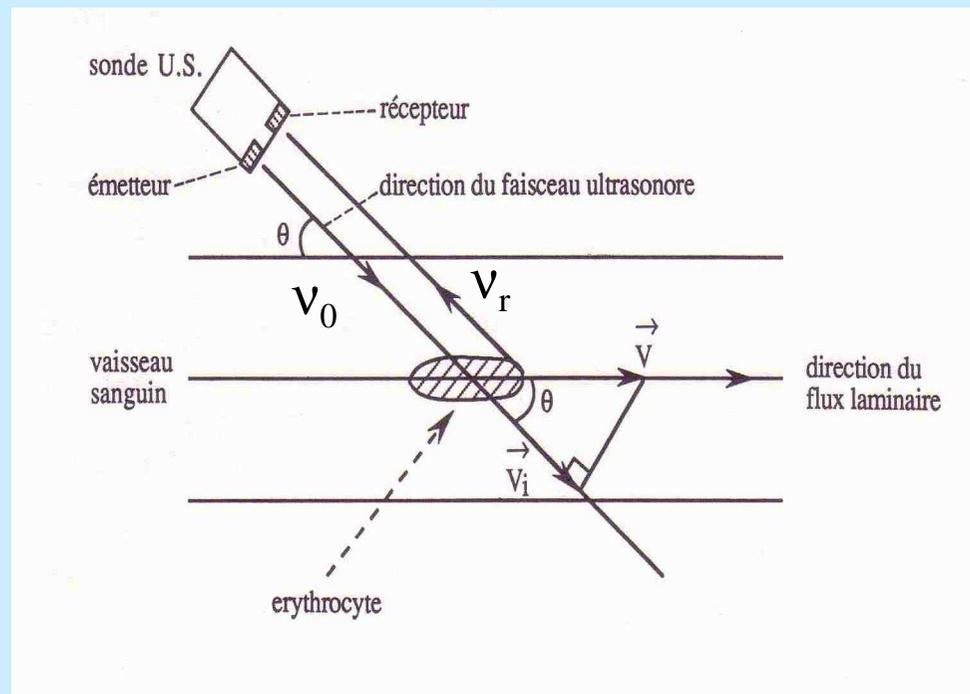
Le plus souvent le sang se déplace dans un axe différent du faisceau

$$\Delta v = 2 v \cdot \cos \theta \cdot v_0 / c$$

où  $v$  = vitesse de déplacement du sang

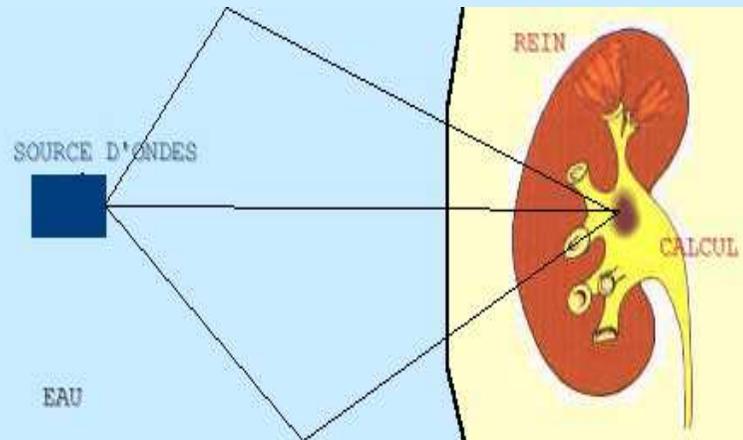
$\theta$  = angle formé entre le faisceau et

la direction d'écoulement du sang



## Lithotripsie extracorporelle

But = pulvérisation de calculs par une onde ultrasonore sur une durée de 30 à 60 mn



# Plan du cours BPU

1. Généralités sur les phénomènes périodiques
2. Ondes sonores
3. Notion de diffraction
4. Propagation d'un son/Notion de réflexion et réfraction
5. Notion d'absorption
6. Effet Doppler-Fizeau
7. Applications médicales des ultrasons
8. **Son : phénomène subjectif**

## 8. Son : *phénomène subjectif*

Le son, message physique objectif, est transformé par le système auditif en un message sensoriel  $\pm$  subjectif.

Cependant certains paramètres permettent de caractériser ce message sensoriel :

- la tonie
- la sonie
- le timbre

## 8. Son : phénomène subjectif

### La tonie :

La tonie correspond à la hauteur du son, qualité physiologique faisant dire que le son est  $\pm$  grave ou aigu

La tonie est principalement liée à la fréquence  $\nu$  du son.

$\Delta\nu$  est la variation minimale de fréquence, appelée seuil liminaire, pour que les sons de fréquence  $\nu$  et  $\nu + \Delta\nu$  soient perçus comme variations de hauteurs différentes

On a observé que :

- $\Delta\nu/\nu$ , seuil différentiel relatif de fréquence, est constant pour une gamme de fréquences allant de 500 à 7000Hz

Cette loi  $\Delta\nu/\nu = \text{constante}$  s'appelle loi de Weber

$\Delta\nu/\nu = 0.2$  à  $0.3\%$  en fonction des individus (1‰, entraînement)

- chaque variation de hauteur  $H$ , correspondant à une variation de fréquence liminaire, est constante = hypothèse de Fechner

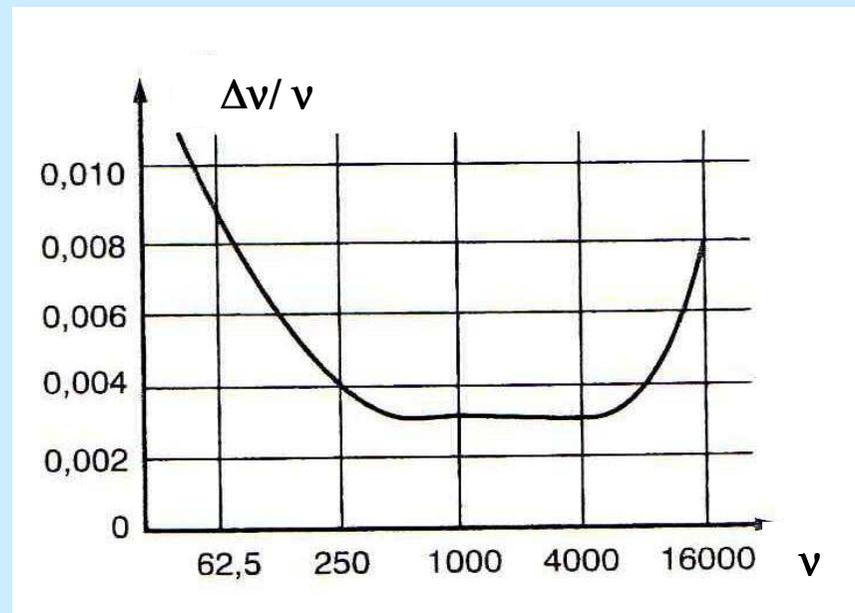
## 8. Son : phénomène subjectif

L'application de ces deux lois, appelée loi de Weber-Fechner permet de définir la différence de hauteur  $\Delta H$  perçue entre deux sons de fréquence  $\nu_1$  et  $\nu_2$

Entre 500 et 7000Hz

$$\Delta H = H_2 - H_1 = 1000 \log_{10}(\nu_2 / \nu_1),$$

Et  $\Delta H$  est exprimé en savart (s)



Variation du seuil différentiel relatif en fonction de la fréquence

## 8. Son : phénomène subjectif

### La sonie :

La sonie est une qualité physiologique faisant dire que le son est  $\pm$  fort  
Elle est principalement liée à l'intensité  $I$  de l'onde sonore

$\Delta I$  est la variation minimale d'intensité, appelée seuil liminaire, pour que les sons d'intensité  $I$  et  $I + \Delta I$  soient perçus comme de forces différentes

On constate que:

- La loi de Weber n'est pas vérifiée pour la sonie :  $\Delta I / I$  varie en fonction de l'intensité

$\Delta I / I = 10\%$  pour des sons  $< 20\text{dB}$  et  $\Delta I / I = 1\%$  pour  $I > 100\text{dB}$

- L'hypothèse de Fechner n'est pas vérifiée : chaque variation de force, correspondant à une variation d'intensité liminaire, varie avec l'intensité

## 8. Son : phénomène subjectif

L'intensité d'un son en dB ne représente pas directement la sensation de force : un son de 10dB est bien perçu à 1000Hz mais est inaudible à 125Hz

Nécessité de définir une unité physiologique d'intensité = le phone

Par convention :

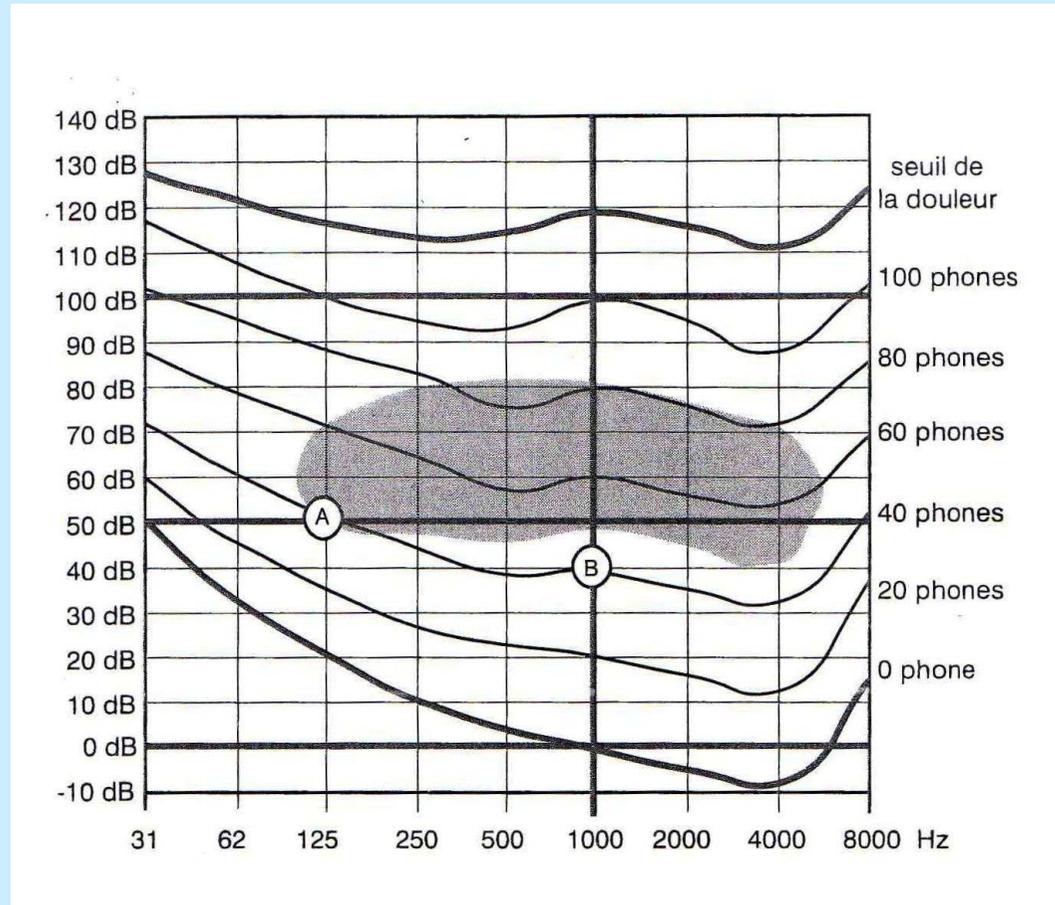
Un son de X dB à 1000Hz a un niveau de X phones

Un son de X phones provoque, quelle que soit sa fréquence, une sensation de force (ou sonie) correspondant à celle d'un son de X dB à 1000Hz

Quelle que soit la fréquence d'un son, le seuil absolu de l'audition est de 0 phone et le seuil douloureux est de 120 phones

## 8. Son : phénomène subjectif

### Courbes isosoniques de Fechner et Munson



Le son A de 125 Hz et d'intensité 50dB donne la même impression de force que le son B de 1000Hz et d'intensité 40dB

## 8. Son : *phénomène subjectif*

### **Le timbre**

Qualité d'un son qui permet de reconnaître deux sons de même hauteur et de même sonie

Ex : deux sons identiques émis par des instruments de musique différents

-----

-----

-