

# Module de Physique

[acoustique physique - ultrasons et applications médicales]

## Ondes sonores et ultrasonores

Introduction à l'acoustique physique et aux ultrasons  
(notions à retenir)

Pr. M. CHEREF

Département de Médecine Dentaire  
Faculté de Médecine – Université ALGER 1

# UTILISATION DES ULTRASONS

## THÉRAPEUTIQUE

EFFETS THERMIQUES ET MÉCANIQUES

## DIAGNOSTIC

ÉCHOGRAPHIE

## HISTORIQUEMENT

D'ABORD EN THÉRAPEUTIQUE

1<sup>ÈRE</sup> ACTION EN DIAGNOSTIC

(1942)

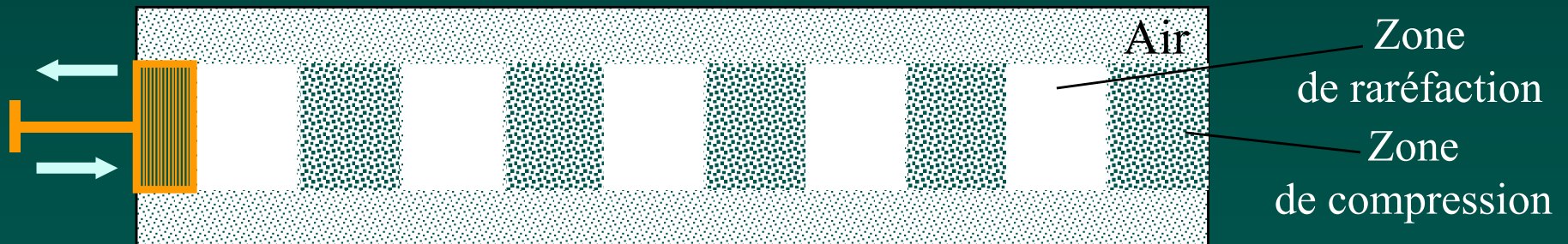
Une onde sonore ?

# II- Onde sonore

## GÉNÉRATION D'UNE ONDE SONORE



Mouvement alterné du piston établit une onde longitudinale

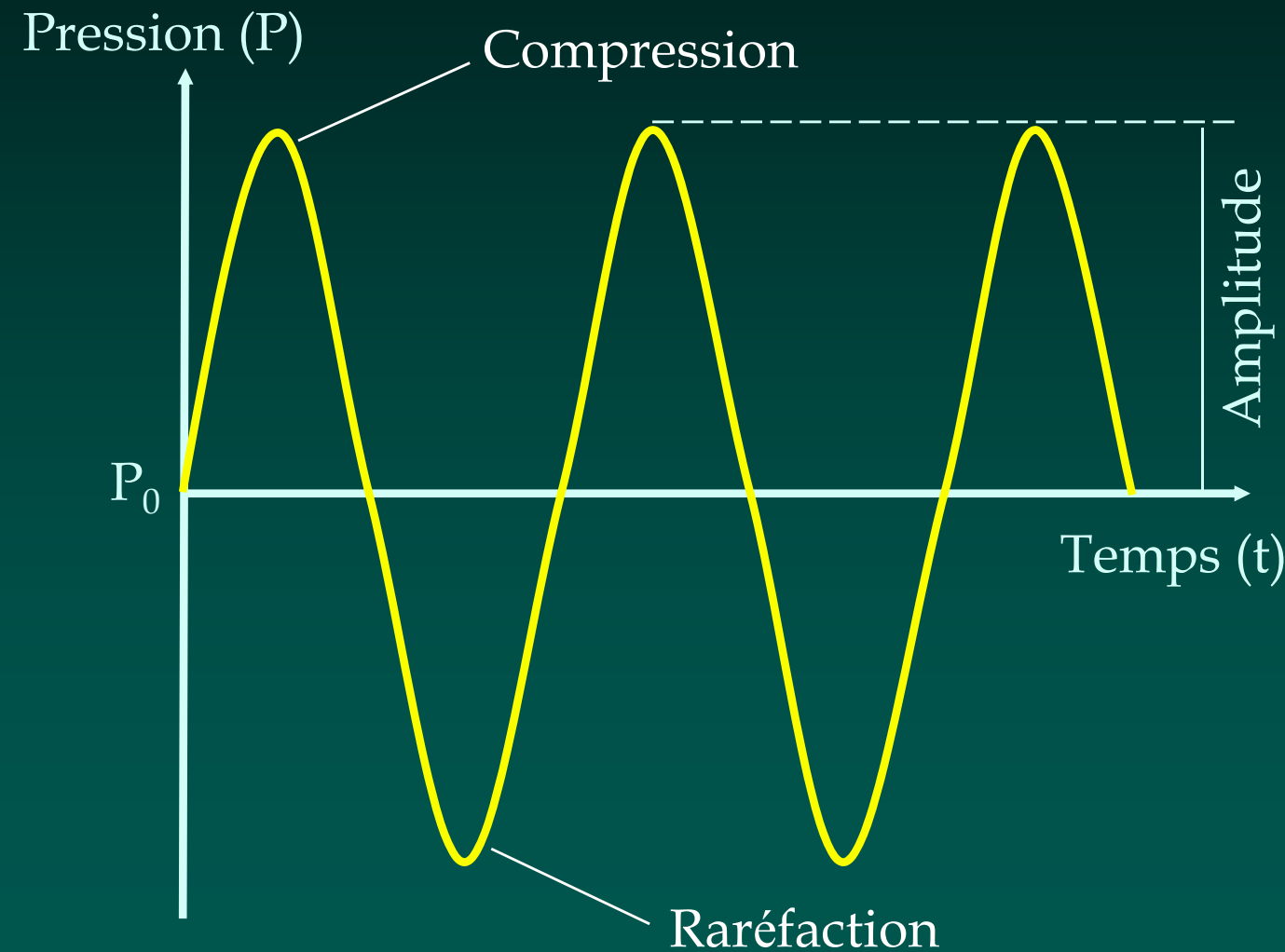


LA PROPAGATION DU SON DANS L'AIR S'EFFECTUE PAR LA MISE EN BRANLE SUCCESSIVE DES COUCHES D'AIR

Caractérisation d'une onde sonore ?

# II- Onde sonore : Caractérisation (1)

## ➤ Formalisme mathématique



ÉQUATION D'ONDE

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}$$

SOLUTION  
(Onde sphérique)

$$P(r, t) = P_0 \frac{1}{r} e^{-i(kr - \omega t)}$$

SOLUTION  
(Onde plane)

$$P(r, t) = P_0 e^{-i(kr - \omega t)}$$

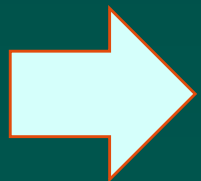
## II- Onde sonore : Caractérisation (3)

### ➤ Notion d'ondes longitudinales

VIBRATIONS SONORES



ONDES LONGITUDINALES



mouvements périodiques  
qui s'effectuent dans le sens de propagation

(exemple du ressort)

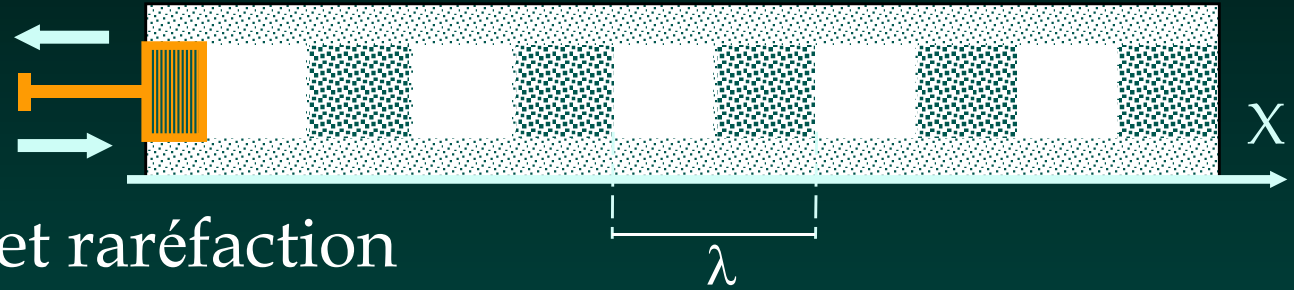
## II- Onde sonore : Caractérisation (6)

### ➤ Double périodicité (spatiale et temporelle)

#### ▪ Périodicité spatiale

- La longueur d'onde  $\lambda$  :

**Distance** entre compression et raréfaction



#### ▪ Périodicité temporelle

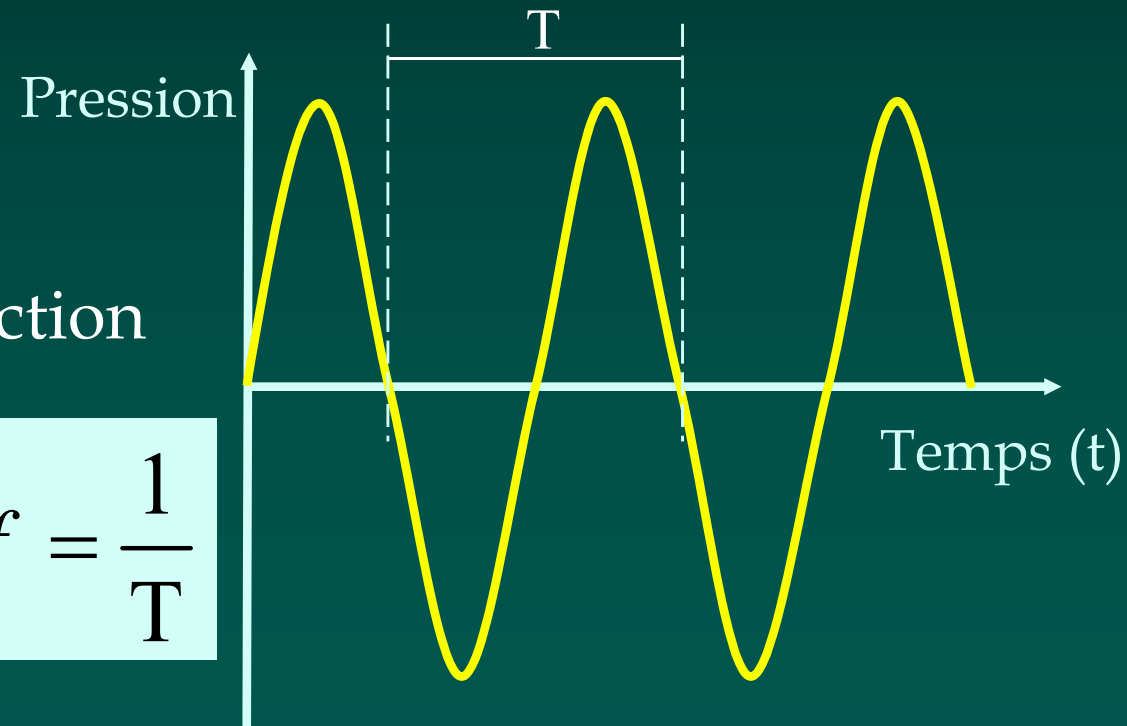
- La période T :

**Temps** entre compression et raréfaction

- La fréquence  $f$  :

**Nombre de fois** où l'onde oscille sur un cycle **chaque seconde**

$$f = \frac{1}{T}$$





# II- Onde sonore : Caractérisation (8)

## ➤ Phase $\varphi$ et Célérité $c$

- Notion de phase

- La phase  $\varphi$  :

- Retard** entre deux mouvements qui sont décalés dans le temps

- Célérité d'une onde

- La célérité  $c$  :

- Vitesse** à laquelle une onde se propage dans le milieu considéré  
( $c$  ne dépend que du milieu dans lequel l'onde se propage)

Exemple : milieu fluide

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

$\chi$  : coefficient de compressibilité

$E$  : module d'Young

$\rho$  : masse volumique

Exemple : milieu solide

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

## II- Onde sonore : Caractérisation (11)

### ➤ Vitesse vibratoire / célérité d'une onde

#### ▪ Vitesse vibratoire

La vitesse vibratoire (ou instantanée) est la dérivée (mathématique) par rapport au temps  $t$  de la fonction  $x(t)$  qui caractérise l'onde sonore :

$$v = dx(t) / dt = d(A \sin \omega t) / dt = A \omega \cos \omega t$$

#### ▪ Célérité d'une onde

le rapport de la distance entre deux points A et B vis-à-vis du temps mis par l'onde pour aller de A à B. si le milieu est isotrope, la célérité ne dépend que du milieu dans le quel se propage cette onde :

Exemple de l'air :  $c = 340$  m/s, de l'eau :  $1450$  m/s

## II- Onde sonore : Caractérisation (14)

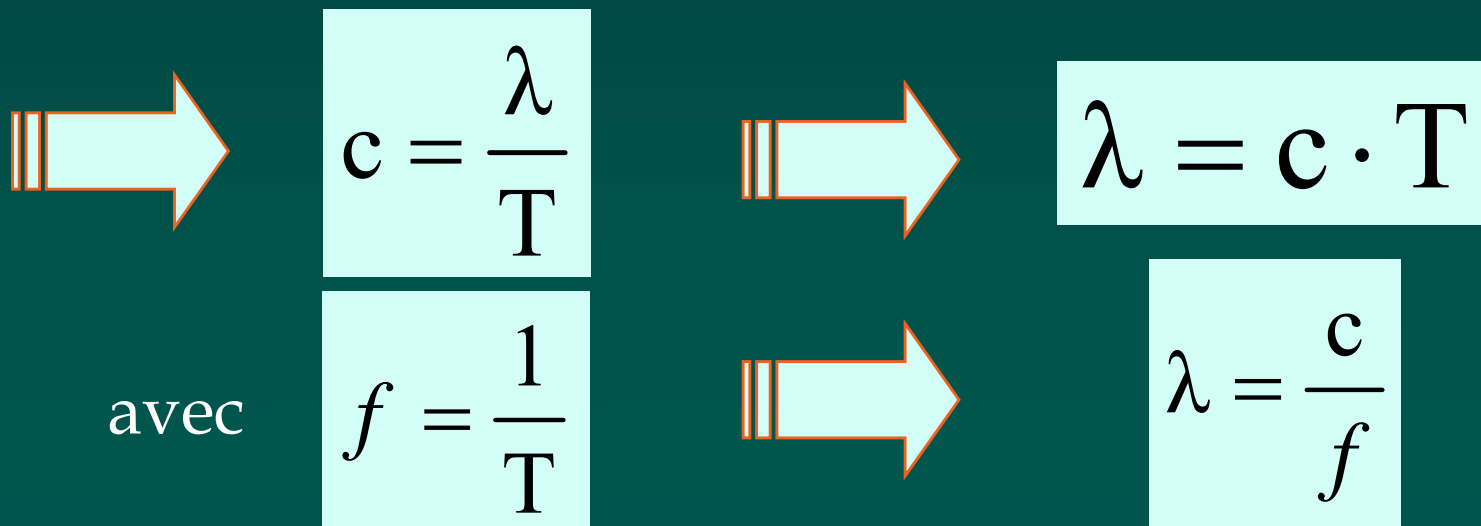
### ➤ Correspondance temporelle et spatiale

#### ▪ La longueur d'onde $\lambda$ :

- Distance entre deux points A et B dans un même état d'oscillation
- Distance parcourue (entre A et B) par l'onde en une période T

#### ▪ La célérité c :

- Vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré



The diagram illustrates the relationship between wave speed, wavelength, and period. It features three arrows pointing to the right, each with three vertical lines at its tail. The first arrow is associated with the equation  $c = \frac{\lambda}{T}$ . The second arrow is associated with the equation  $\lambda = c \cdot T$ . The third arrow is associated with the equation  $\lambda = \frac{c}{f}$ . The word "avec" is written below the first arrow, indicating that the second equation is derived from the first using the relationship between frequency and period.

avec  $c = \frac{\lambda}{T}$

$\lambda = c \cdot T$

$\lambda = \frac{c}{f}$

## II- Onde sonore : Caractérisation (18)

➤ La longueur d'onde  $\lambda$  : Caractéristique extrinsèque de l'onde

Exemple d'une Onde sonore de fréquence  $f = 1\text{kHz}$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

ou de période  $T = 10^{-3}\text{ s}$

$$\lambda = c \cdot T$$

Milieu	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Célérité $c$ (m/s)	Longueur d'onde $\lambda$ (m)
Air	1,2	330	0,33
Eau	1000	1480	1,48 (x 4,5)
Tissus mous	1050	1540	1,54 (x 4,66)
Os Crâne	1912	4080	4,08 (x 12,4)

$\lambda$  DÉPEND DU MILIEU DANS LEQUEL SE PROPAGE L'ONDE

# II- Onde sonore : Caractérisation (20)

## ➤ Impédance acoustique Z

- Grandeur particulièrement importante pour caractériser un milieu
- Dépend de la nature du milieu (masse volumique) et de la célérité de l'onde

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

$\rho$  : masse volumique du fluide

$c$  : célérité de l'onde dans le milieu considéré

$P$ : pression acoustique

$v$  : vitesse vibratoire

**IMPÉDANCE ACOUSTIQUE Z**



**RÉSISTANCE DES TISSUS AU PASSAGE DE L'ONDE (ULTRA)SONORE**

## Exemples d'Impédances acoustiques

Milieu	Z (kg/m <sup>2</sup> .s)
Air	0,0004
Poumon	0,26
Eau	1,5
Tissus mous	1,3 – 1,7
Squelette	3,8 – 7,4

## II- Onde sonore : Pression et Intensité (1)

PROPAGATION DE L'ONDE SONORE  
DANS LE MILIEU CONSIDÉRÉ

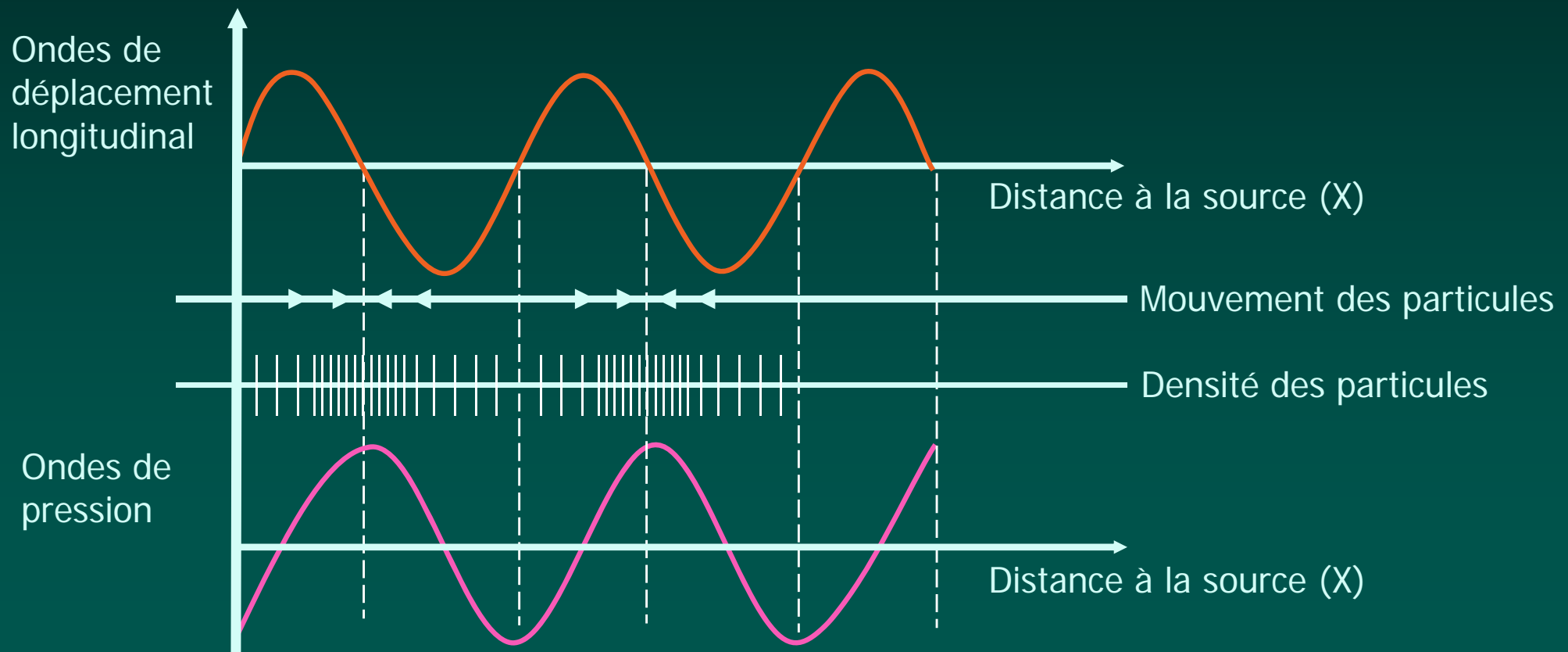


VARIATIONS DE LA PRESSION LOCALE  
ET  
TRANSPORT D'ÉNERGIE (VIBRATOIRE)

# II- Onde sonore : Pression et Intensité (2)

## ➤ Pression acoustique P

Exemple d'une onde sonore (son pur) dans un milieu fluide



## II- Onde sonore : Pression et Intensité (5)

### ➤ Pression acoustique P

- Traduit les variations de Pression autour de la pression  $P_0$  du milieu
- Conséquence aux phénomènes de compression et de raréfaction générés

Exemple : propagation d'une onde sonore dans un fluide

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

v : vitesse de déplacement (vitesse vibratoire)

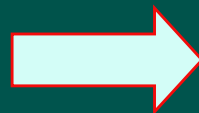
c : célérité dans le milieu considéré

$\rho$  : masse volumique du milieu considéré

P # [MPa]

+

GRANDES AMPLITUDES



PHÉNOMÈNE DE CAVITATION



## II- Onde sonore : Pression et Intensité (8)

### ➤ Puissance acoustique (1)

- Propagation de sons ou ultrasons  $\longrightarrow$  Propagation d'énergie acoustique
- Quantité d'énergie qui traverse une unité de surface dans une unité de temps

Dans le cas d'un « son pur »

$$W = v \cdot P$$

$v$  : vitesse de déplacement (vitesse vibratoire)

$P$  : Pression acoustique

- La mesure du niveau de  $W$  se fait toujours en référence à  $W_0$  ( $10^{-12}$  watt/m<sup>2</sup>)

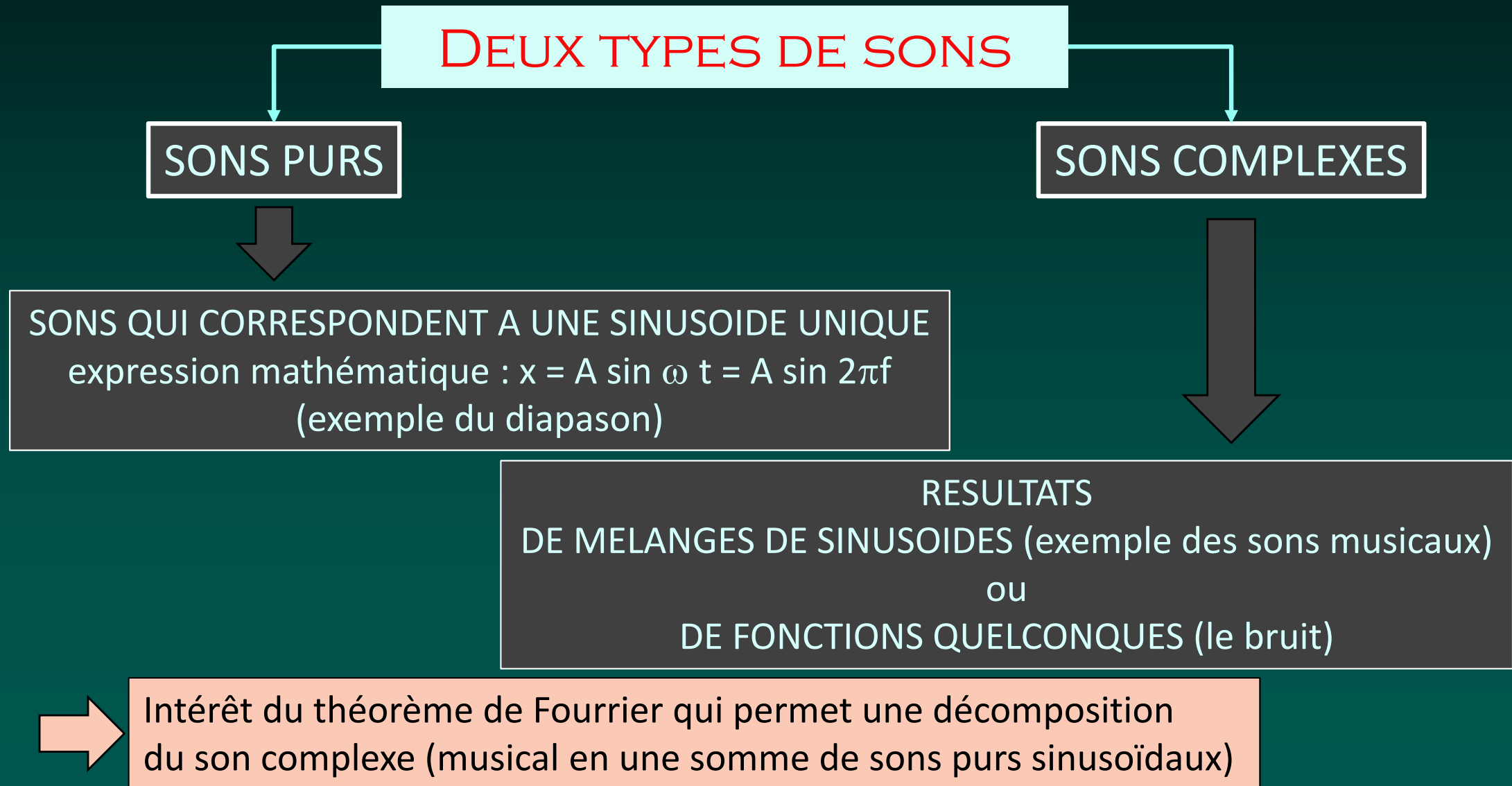
UTILISATION DU DÉCIBEL dB



$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{W}{W_0}$$

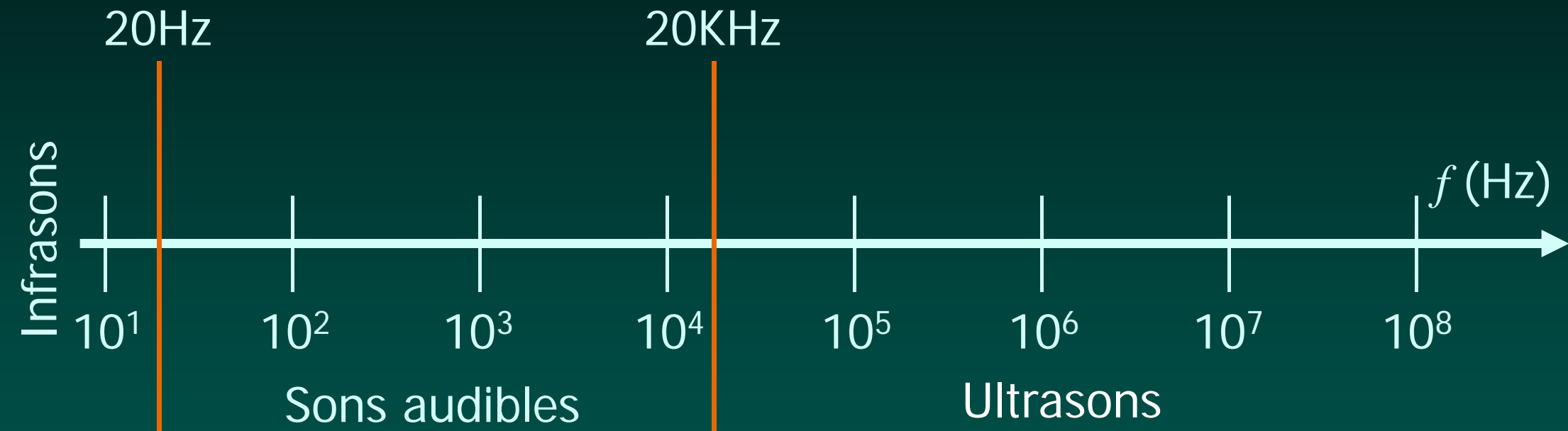
# III- Onde sonore : Classification des sons

## ➤ Classification qualitative (1)



# III- Onde sonore : Classification des sons

## ➤ Classification qualitative (2)

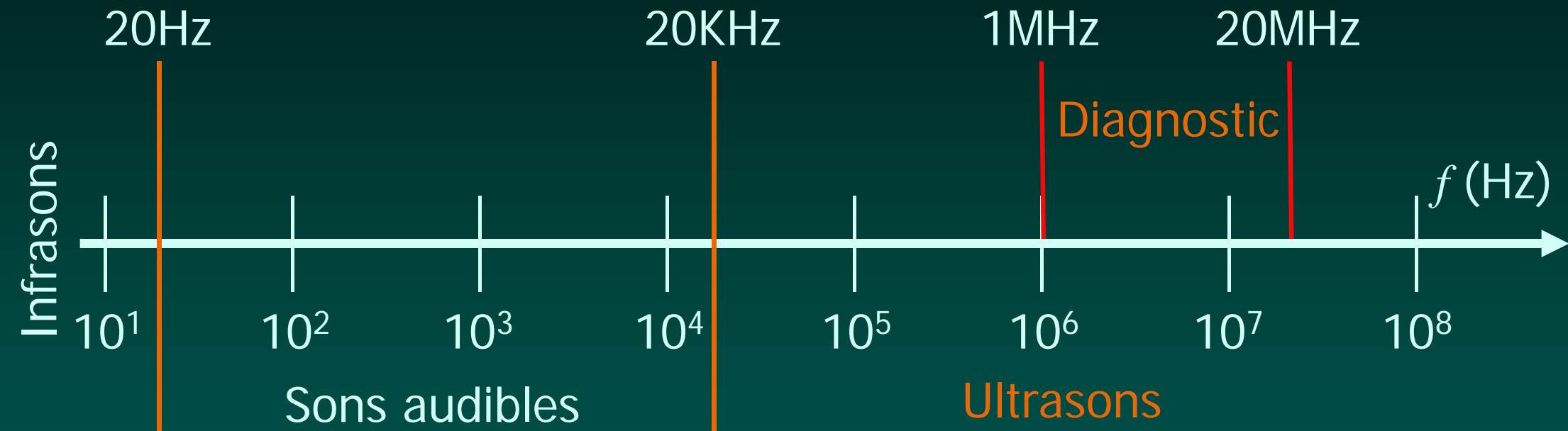


Remarque : pas de rigueur absolue sur les valeurs qui indiquent ces frontières :  
exemple de  $16\text{ Hz}$  plutôt que  $20\text{ Hz}$  dans certains ouvrages

Une onde ultrasonore ?

# IV- Ultrasons (1)

## CLASSIFICATION DES ONDES SONORES



UNE ONDE ULTRASONORE :  
UNE ONDE SONORE DE FRÉQUENCE  $f$  ÉLEVÉE

# IV- Ultrasons (2)

➤ Fréquence  $f$  - Longueur d'onde  $\lambda$

Milieu	Masse vol. (Kg/m <sup>3</sup> )	Célérité $c$ (m/s)
Air	1,2	330
Poumon	300	600
Eau	1000	1480
Tissus mous	1050	1540
Rein	1041	1565
Sang	1058	1560
Muscle	1068	1600
Os Crâne	1912	4080
PZT	7500	4000

Milieu	$f$ (MHz)	$\lambda$ (mm)
Air	1	0,33
Eau	1	1,48
Tissus mous	1	1,54
Os crâne	1	4,08

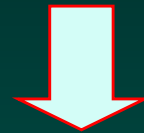
$f$	Son 1KHz	Ultrasons	
		1MHz	10MHz
$\lambda$	1,54 m	1,54 mm	0,154 mm

LE CHOIX DE LA FRÉQUENCE  $f$  DÉPENDRA DU TISSU À ÉTUDIER

# IV- Ultrasons (4)

## ➤ Directivité des Ultrasons

LA PROPAGATION DES ULTRASONS  
PRÉSENTE UN DEGRÉ DE DIRECTIVITÉ



DANS UN MILIEU HOMOGENÈME (EN L'ABSENCE D'OBSTACLES)  
LES ULTRASONS SE PROPAGENT EN LIGNE DROITE

DANS LE CADRE DU DIAGNOSTIC MÉDICAL  
DIRECTIVITÉ DES ULTRASONS : PROPRIÉTÉ ESSENTIELLE  
POUR LA DÉTECTION OU LA LOCALISATION D'OBSTACLES

# V- Interactions Ultrasons – milieux (6)

## MÉCANISMES RESPONSABLES DE L'ATTÉNUATION DU FAISCEAU ULTRASONORE

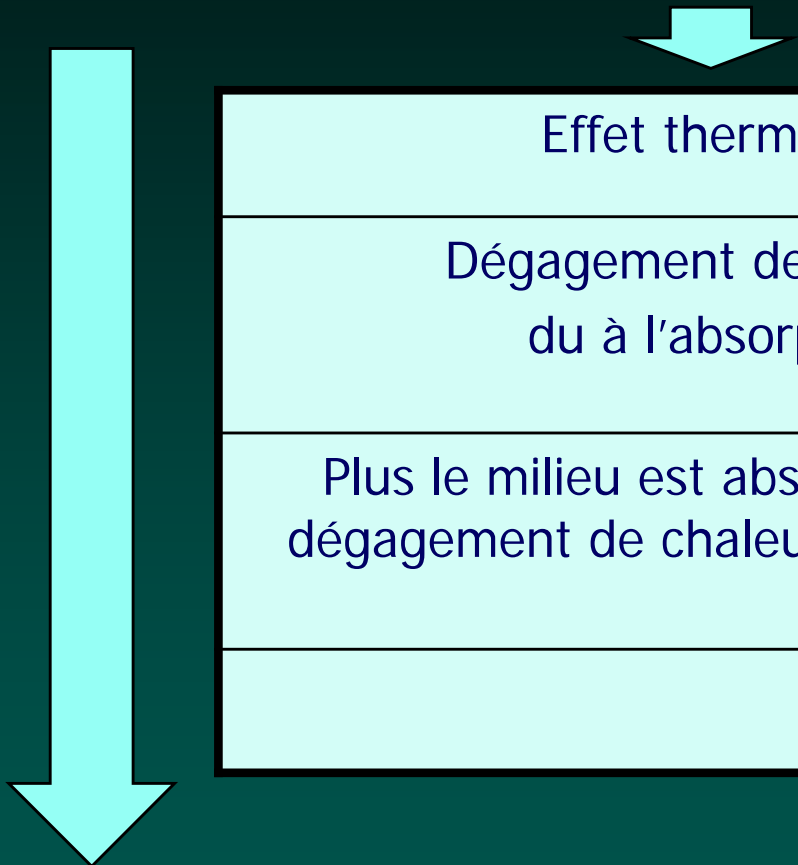
- Réflexion + Réfraction
- Diffusion
- Absorption

Tenant compte des phénomènes de Diffraction



# V- Interactions Ultrasons – milieux (10)

## ➤ effets biologiques



Effet thermique	Effet mécanique
Dégagement de chaleur du à l'absorption	Causé par les phénomènes de réflexion et réfraction au niveau des interfaces
Plus le milieu est absorbant plus le dégagement de chaleur est important	exemple du phénomène de cavitation (apparition de bulles formées à partir de gaz dissous ou de vapeur sous l'effet de variations de pression)
Utilisation en thérapeutique	

EN DIAGNOSTIC

IL EST CONSIDÉRÉ QUE CES EFFETS SONT NÉGLIGEABLES  
(PUISSANCES ULTRASONORES FAIBLES ET ONDES DE COURTE DURÉE)