

*Tours Nov. 2016*  
*DIU Echo Région OUEST*



**Tronc commun**

# ***PHYSIQUE ACOUSTIQUE***

**Pr Frédéric PATAT**  
**Biophysique Médicale et Med. Nucléaire**  
**CIC - Innovation Technologique 1415**  
**INSERM U930 – Université F. Rabelais**  
**Hôpital BRETONNEAU - CHRU de Tours**

# Objectifs du cours

- Donner une intuition des phénomènes fondamentaux
- Concepts acoustiques pour écho
- Définitions indispensables
- Outils pour conduire un réglage de qualité
- Outils pour discuter technologie avec constructeurs



# Plan de l'exposé

- Ondes acoustiques - principes
- Ondes acoustiques - paramètres
- Interfaces
- Atténuation et dB
- Sémiologie physique et artéfacts
- Historique et conclusion

# ECHO...GRAPHIE

**La nymphe Echo, fut condamnée  
par Héra à répéter les derniers mots qu'elle entendait.**

**Puis amoureuse de Narcisse, elle dépérit, s'effaça**

**Seule sa voix subsiste....**





# ONDES ACOUSTIQUES

## Principes



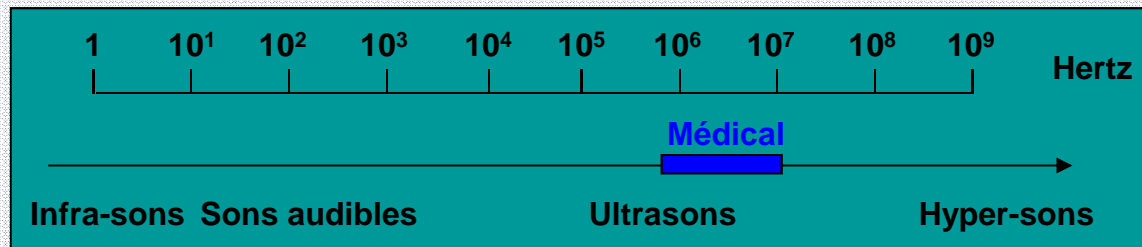


# Ondes acoustiques ?

- Déplacement de matière
- Au sein d'un milieu matériel
- Moyenne nulle
- Mettant en jeu : Elasticité et Inertie



## Définition du son: Propagation de mouvements au sein de la matière Existent à différentes échelles de temps et d'amplitude



Tremblements de terre : 0.1 to 1 Hz

amplitudes in cm

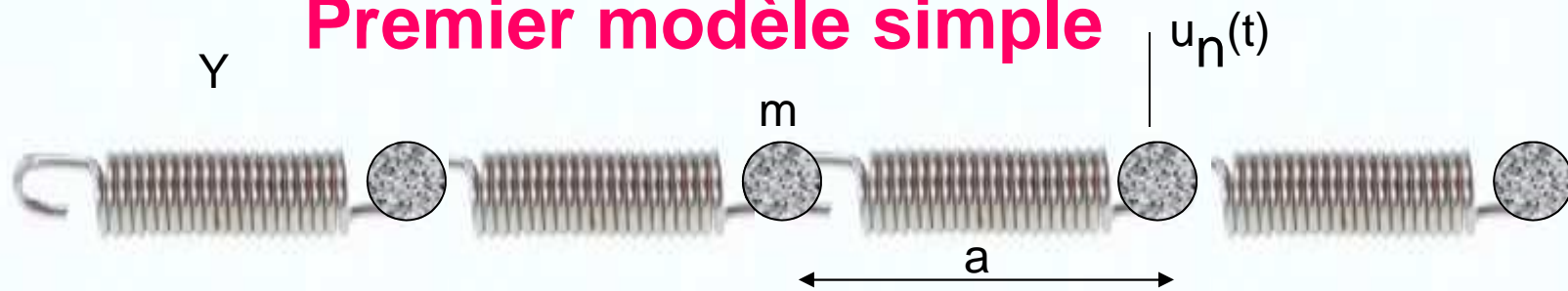
Sons audibles : 20 to 20 kHz

amplitudes in nm

Ultrasons : 2 to n. 100 MHz

amplitudes in A

## Premier modèle simple



Sur une masse :

$$F_n = Y \cdot [(u_{n+1} - u_n) - (u_n - u_{n-1})]$$

Alors

$$m \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} = Y \cdot (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1})$$



A la limite où  $a \longrightarrow 0$

$$u_{n+1} - 2.u_n + u_{n-1} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2}$$

Alors :

$$\frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} = \frac{Y.a}{m/a} \cdot \frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2} = \frac{C}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2}$$

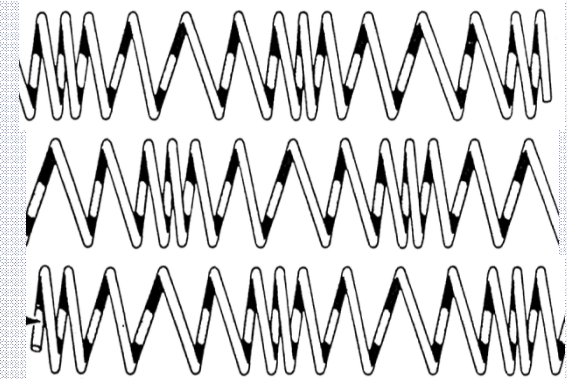
**La signature de la propagation : la dérivée seconde en temps  
proportionnelle à la dérivée seconde en espace.**



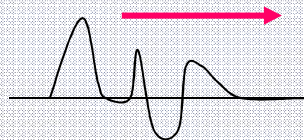
**En autres termes :**

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} - c \cdot \frac{\partial u}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + c \cdot \frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0$$

**Montre 2 solutions independantes :**

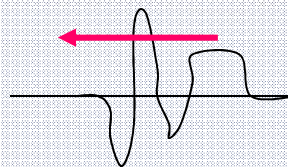


Vers les x positifs :



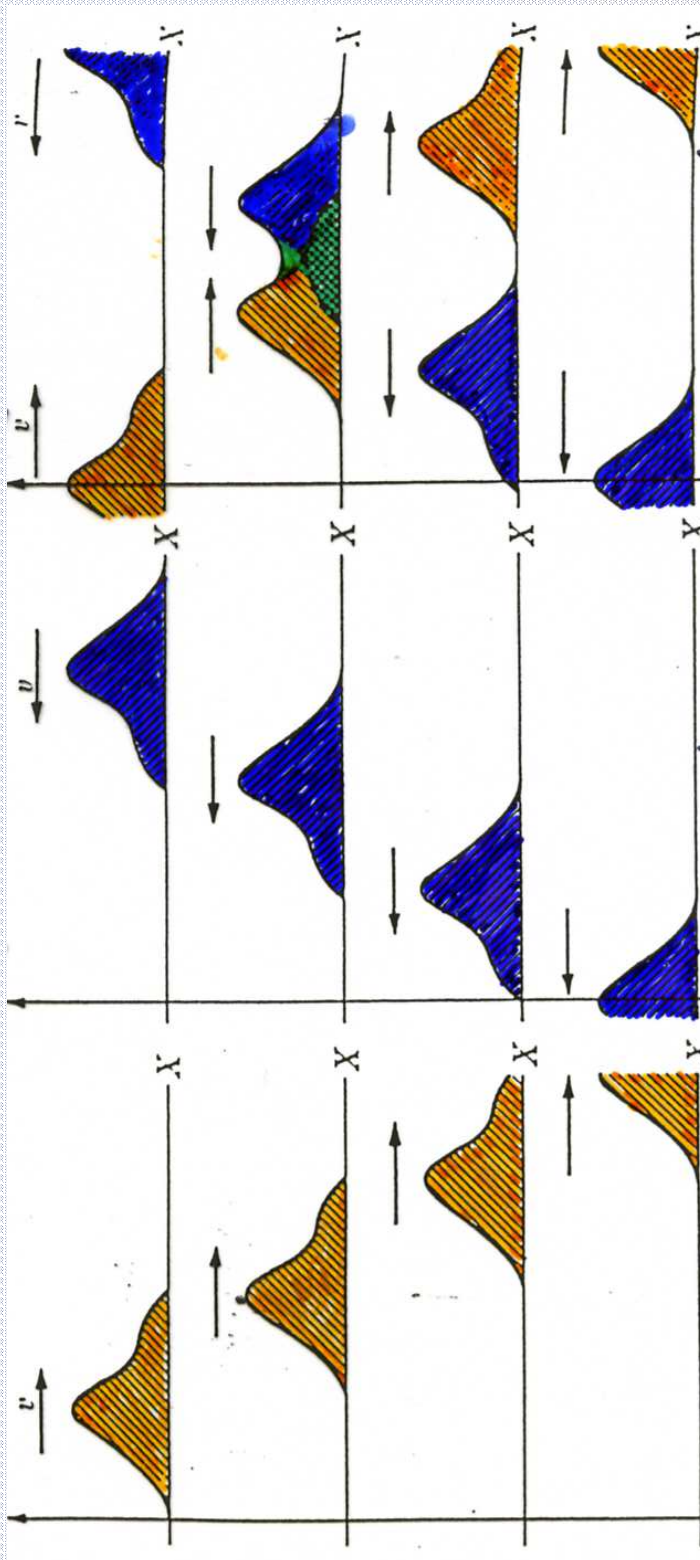
$$u^+(x, t) = g(x - ct)$$

Vers les x négatifs:



$$u^-(x, t) = h(x + ct)$$

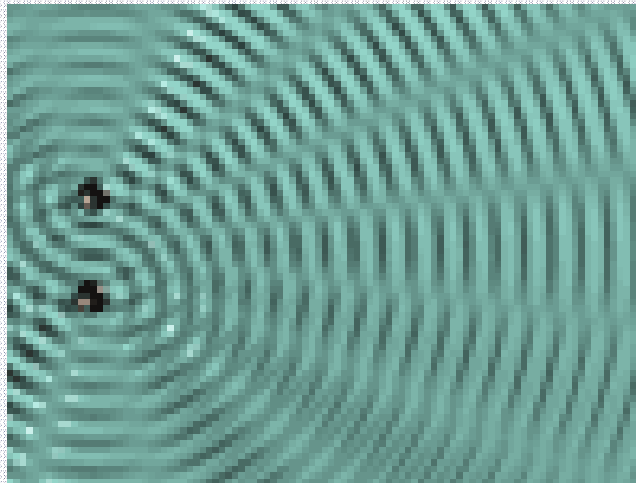






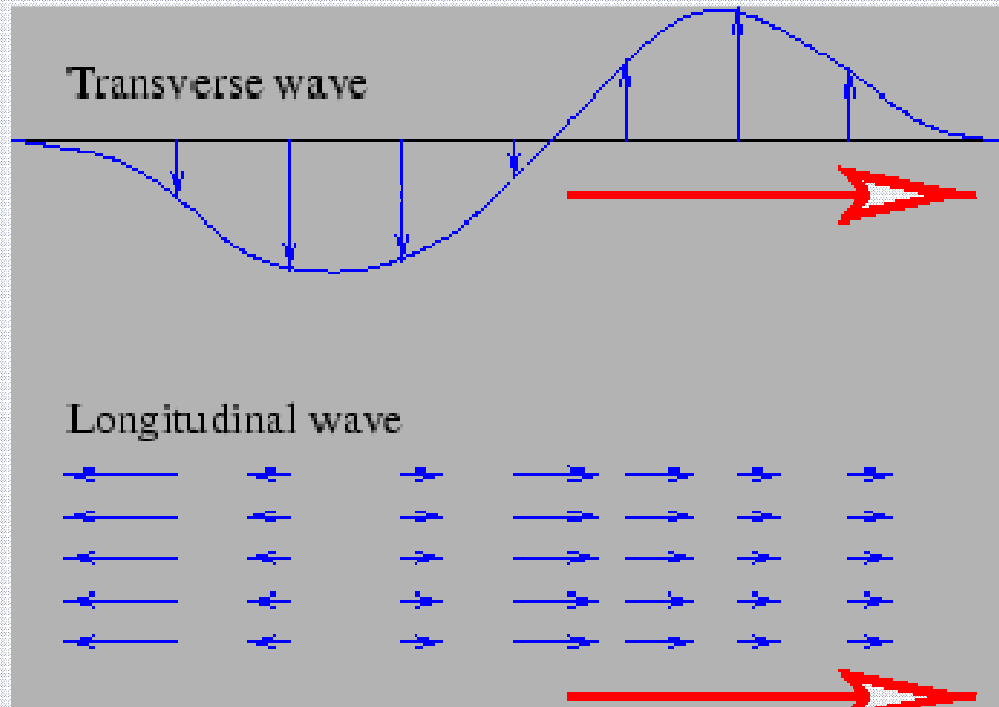
$$c^2 = C/\rho$$

**La célérité au carré est égale à la raideur élastique divisée par la masse volumique**





## 2 types d'ondes



**Tranverse**

**Longitudinale**



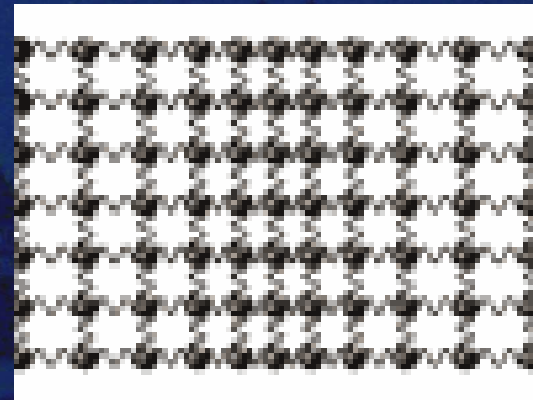
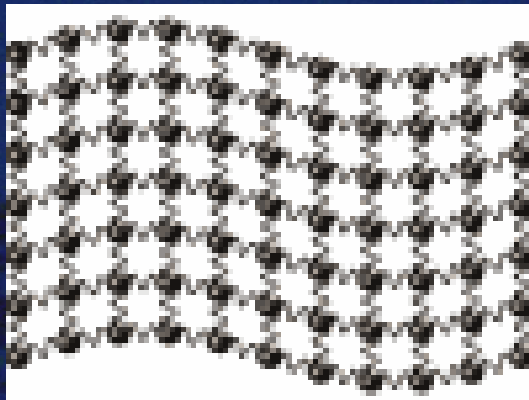
Mouvement des particules



Direction de propagation

## Différents types d'onde ;

Onde transversale (cisaillement) ou onde longitudinale (compression)





# ONDES ACOUSTIQUES

## Paramètres





**Célérité d'une onde = Vitesse de propagation = c**

$$c^2 = \text{Raideur} / \text{Inertie} = \text{Coef élastique} / \rho$$

$\rho$  = masse volumique

$$\text{Air} : c = 340 \text{ m/s} = 1250 \text{ km / h}$$

Dépend ( peu) de la température

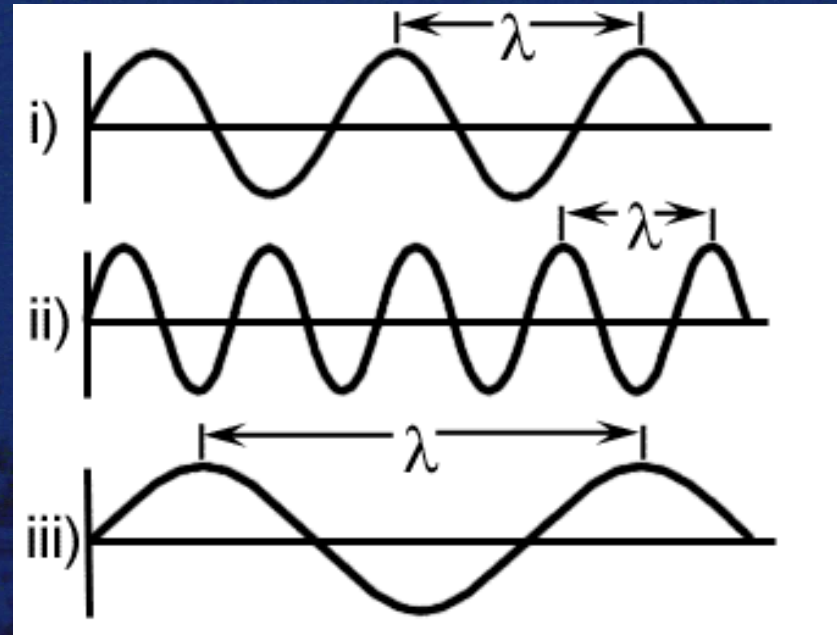
$$\text{Eau} : c = 1500 \text{ m/s (très peu compressible mais dense)}$$

Dépend peu de la température

**Célérité dans les tissus mous voisine de 1540 m/s**



## Ondes périodiques ou continues



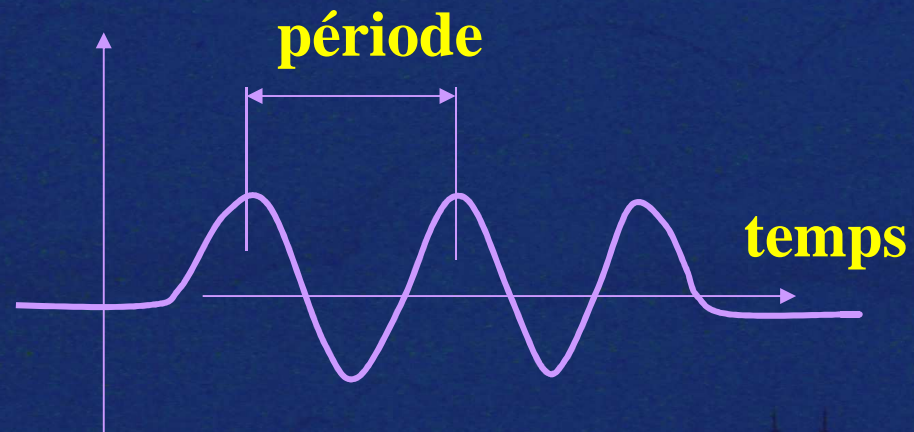
Fréquence  $f$  : Combien de crêtes par secondes ?

En Hertz, ou kHz ou MHz ( $10^6$  Hz)

Période  $T$  : Durée d'un cycle en s, ms ou  $\mu$ s

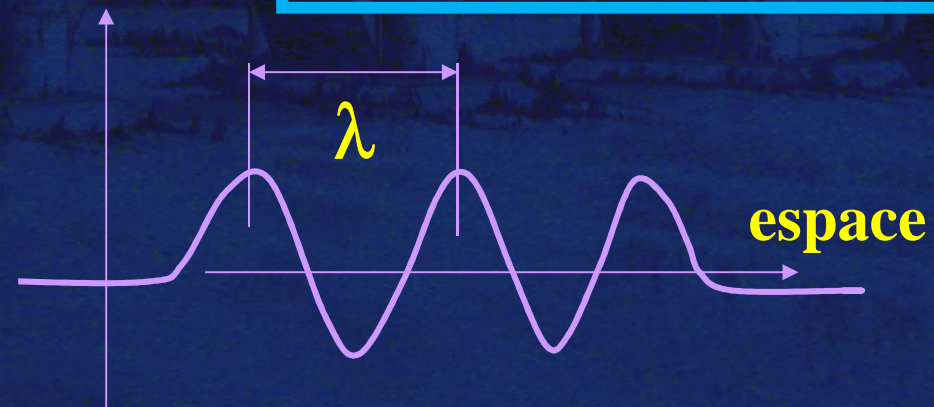


Ondes :



Variations de la pression, du déplacement, de la vitesse

$$\text{longueur d'onde} = \lambda = c / f = c \cdot T$$





La longueur d'onde est l'échelle de référence pour tous les phénomènes acoustiques : les ordres de grandeur :

1 MHz : 1,5 mm

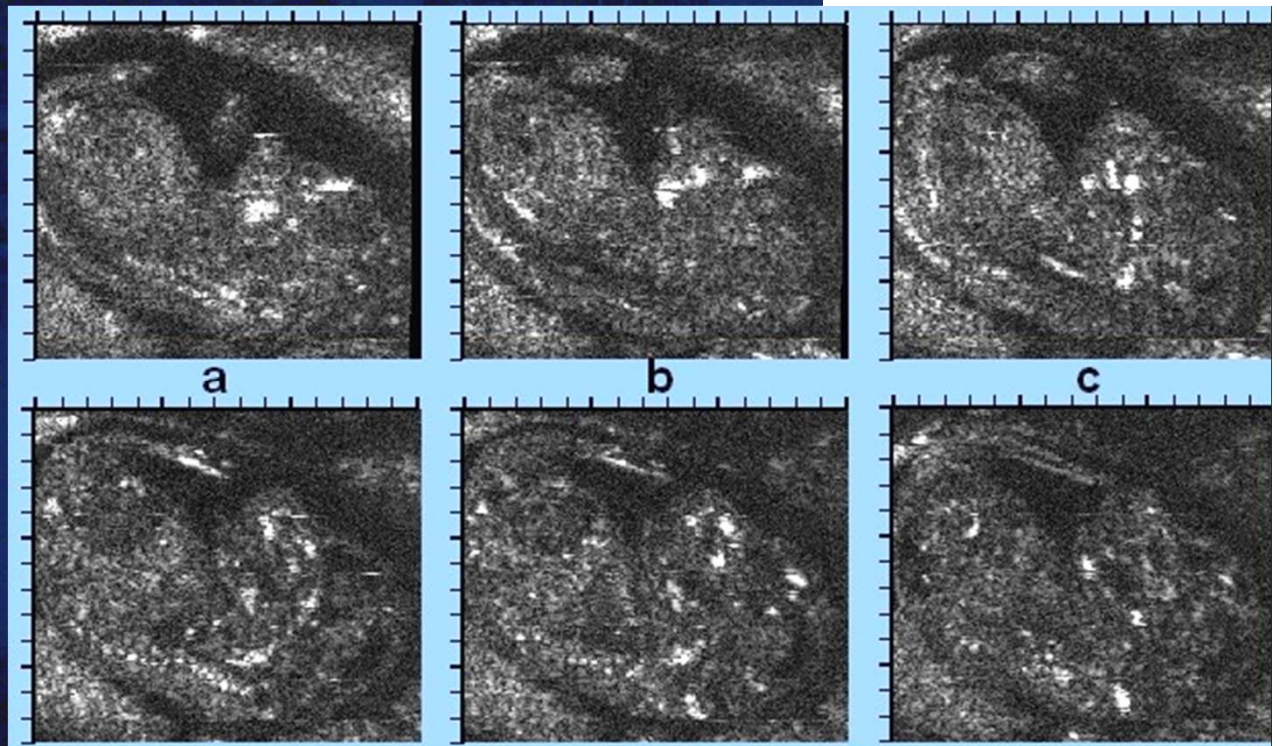
3 MHz : 0,5 mm

5 MHz : 0,3 mm

15 MHz : 0,1 mm

50 MHz : 0,03 mm

3D of mouse embryo, ED 14.5





## Valeur de la longueur d'onde dans les tissus mous

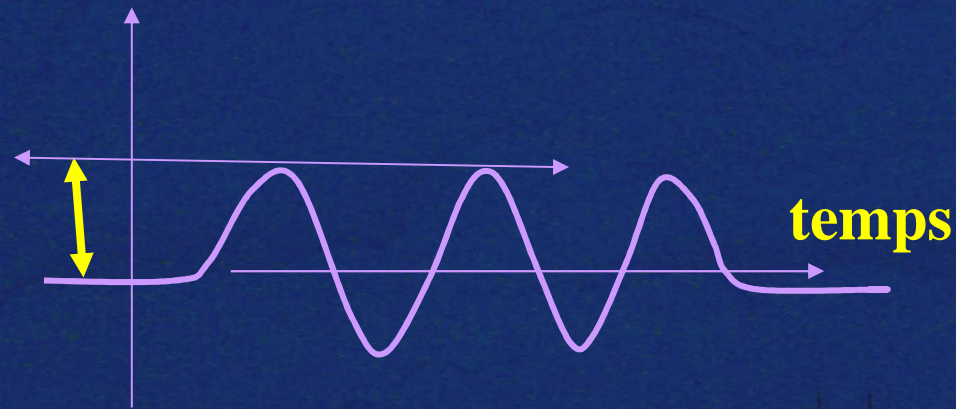
$$\lambda \text{ en mm} = 1,5 / f \text{ en MHz}$$

$$\text{Ex 5 MHz : } \lambda = 0,3 \text{ mm}$$



**Ondes :**

**Amplitude**



**S'exprime en pression, déplacement, vitesse**

**Unités : Pascal, m, m/s ou dérivées**



## La relation pression - vitesse dans une onde

$p(x,t)$  est proportionnelle à  $V(x,t)$

Le coefficient de proportionnalité est  $Z = \rho \cdot c$

$Z$  est appelée impédance acoustique



**L'impédance est simplement le produit de la masse volumique par la vitesse du son :**

$$Z = \rho_0 . c$$

Unité :  $1 \text{ kg.m}^{-3}.\text{m.s}^{-1} = 1 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} = 1 \text{ Ra}$

Lord Rayleigh : 1842 - 1919

*Theory of Sound* : published in two volumes during 1877-1878

$$\text{Z air} = 1.2 \times 344 = 412 \text{ Ra}$$

$$\text{Zeau} = 1000 \times 1500 = 1.5 \text{ MRa}$$

# Un parallèle utile

## Electricité

$U$  la tension électrique

$I$  le courant électrique

$\Pi$  la puissance électrique

$R$  l'impédance électrique

## Acoustique

$p$  la pression

$v$  la vitesse des particules fluides

$\Pi$  la puissance surfacique = intensité acous.

$Z$  l'impédance acoustique

## Oscillation en sinus

$I_p$  amplitude du courant

$U_p$  amplitude de tension

$v_p$  amplitude de vitesse particulaire

$p_p$  amplitude de pression



## Un parallèle utile

**Electricité**

$$U = R.I$$

$$\Pi = U.I$$

**Acoustique**

$$p = Z . v$$

$$\Pi = p . v$$

————— **Oscillation en sinus** —————

$$\Pi = \frac{1}{2} R . I_p^2$$

$$\Pi = \frac{1}{2} U_p^2 / R$$

$$\Pi = \frac{1}{2} Z . v_p^2$$

$$\Pi = \frac{1}{2} p_p^2 / Z$$

# INTENSITE ACOUSTIQUE

L' intensité acoustique I se calcule selon :

$$I = p^2 / 2 Z ( W.m^{-2} )$$

soit aussi :

$$I = v^2 / 2 Z$$

$$\text{car } p = Z \cdot v$$

I : Intensité est la puissance qui traverse chaque unité de surface



## Ultrasons en Imagerie:

Le corps humain proche de l'eau sauf gaz et os

$$I = 100 \text{ mW/cm}^2 = 10^3 \text{ W/m}^2$$

$$\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad c = 1540 \text{ m/s} \quad Z = 1.54 \text{ Ra}$$

$$p = 0.55 \cdot 10^5 \text{ Pascal} : \text{demie atmosphere!} \quad v = 3.7 \text{ cm/s}$$

$$\text{Si } f = 5 \text{ MHz} \quad \lambda = 0.3 \text{ mm}$$

$$u = v/w = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ Angstr\o{e}m}$$

$$\gamma = v \cdot \omega = 1.1 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-2} : 10^5 \text{ fois } g !!$$



# ONDES ACOUSTIQUES

The background of the slide is a dark, atmospheric painting. It depicts a city at night, with a large, illuminated cathedral or church with multiple spires as the central focus. The city is reflected in a body of water in the foreground. The overall color palette is dark, with some highlights from the city lights and the moon or stars in the sky.

Interfaces

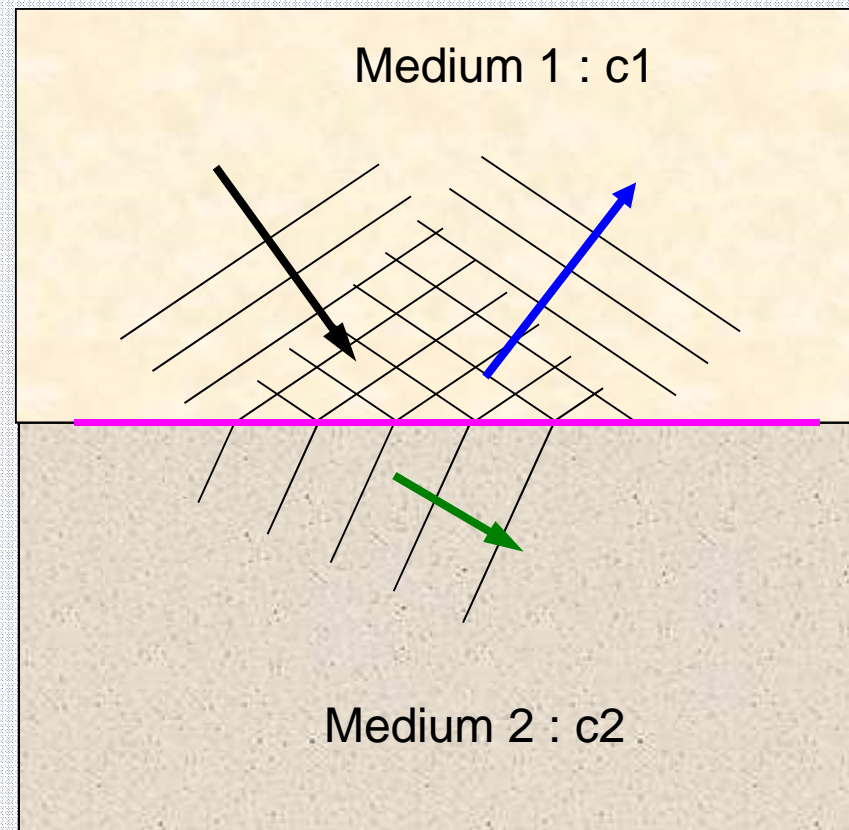
Réflexion – Réfraction

Echos



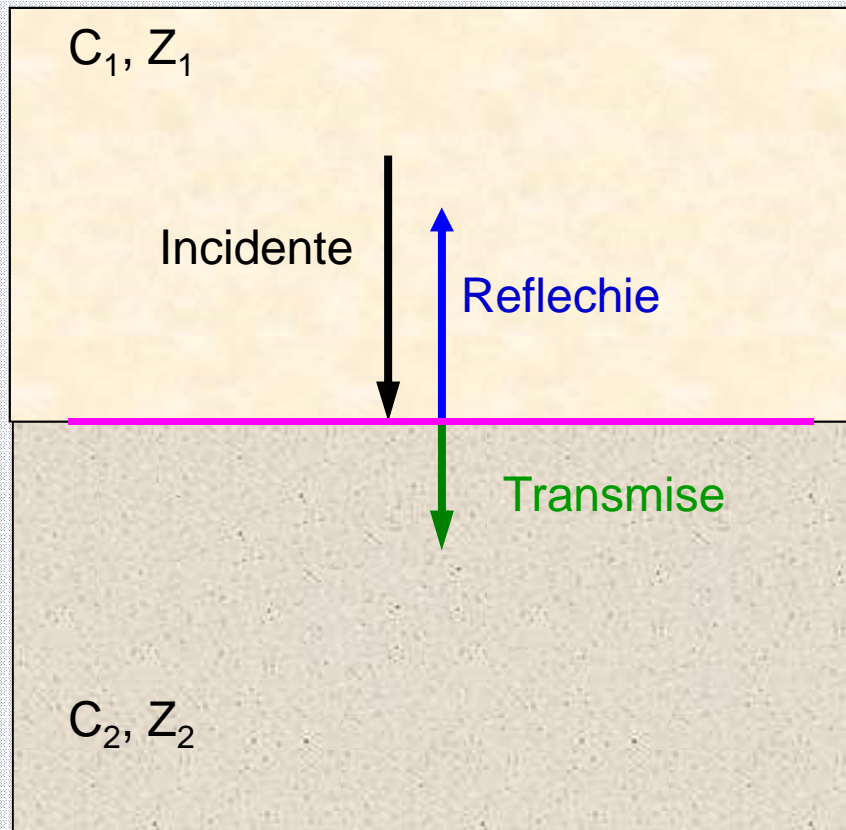
# Réflexion – Réfraction

- Une onde incidente
- Une onde réfléchie
- Une onde transmise (réfractée)





# Incidence normale



Continuité des contraintes

$$p_i + p_r = p_t$$

Pas de vide à l'interface

$$v_i + v_r = v_t$$



Sachant que:

$$p_i = Z_1 v_i \longrightarrow$$

$$p_r = -Z_1 v_r \longleftarrow$$

$$p_t = Z_2 v_t \longrightarrow$$

On trouve:

$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2.Z_2}{Z_2 + Z_1}$$



L' amplitude des phénomènes de reflexion- transmission est gouvernée par le **rapport des impedances acoustiques** i.e. le **contraste acoustique**.

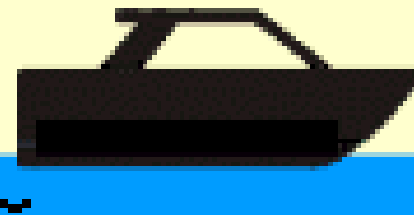
C'est la même chose pour toutes les ondes (ex indice optique).

En termes d'énergie :

$$R = \left( \frac{p_r}{p_i} \right)^2 = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad T = \frac{p_t^2}{Z_2} \cdot \frac{Z_1}{p_i^2} = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

**Of course  $R + T = 1$  : conservation de l'énergie**

## Le principe du SONAR





**Table 4.3** *Acoustic Impedance for Specular Reflection  
by Acoustic Waves Crossing a Material  
Interface*<sup>536, 628, 629, 730, 763</sup>

Body Tissue	Impedance (kg/m <sup>2</sup> -sec)	Body Tissue	Impedance (kg/m <sup>2</sup> -sec)
Air	400	Liver (25°C)	1.65 x 10 <sup>6</sup>
Lung	1.80 x 10 <sup>5</sup>	Blood	1.65 x 10 <sup>6</sup>
Fat	1.39 x 10 <sup>6</sup>	Nerve (optic)	1.68 x 10 <sup>6</sup>
Aqueous humor	1.51 x 10 <sup>6</sup>	Muscle	1.73 x 10 <sup>6</sup>
Water	1.52 x 10 <sup>6</sup>	Lens of eye	1.84 x 10 <sup>6</sup>
Brain (25°C)	1.57 x 10 <sup>6</sup>	Nylon	2.9 x 10 <sup>6</sup>
Skin	1.6 x 10 <sup>6</sup>	Skull bone	7.80 x 10 <sup>6</sup>
Soft tissue (avg.)	1.63 x 10 <sup>6</sup>	Enamel	1.71 x 10 <sup>7</sup>
Kidney	1.63 x 10 <sup>6</sup>	Diamond	6.3 x 10 <sup>7</sup>

# C'est pourquoi :

**Tissus mous**                      **peu d'échos, le faisceau continue**

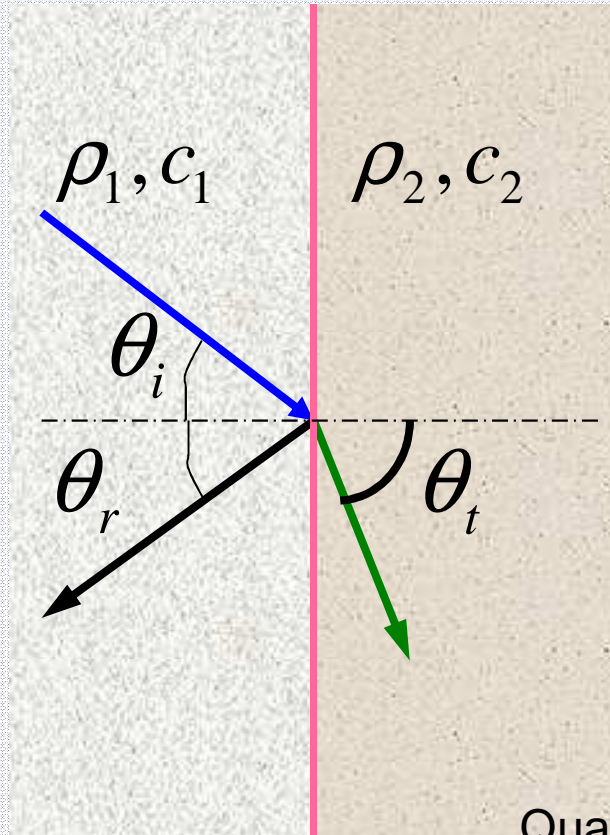
**Os**                                      **gros écho puis plus rien**  
**Calcul**

**Air pulmonaire**                      **gros écho puis plus rien**  
**Air digestif**

**Car  $R + T = 1$  : conservation de l'énergie**



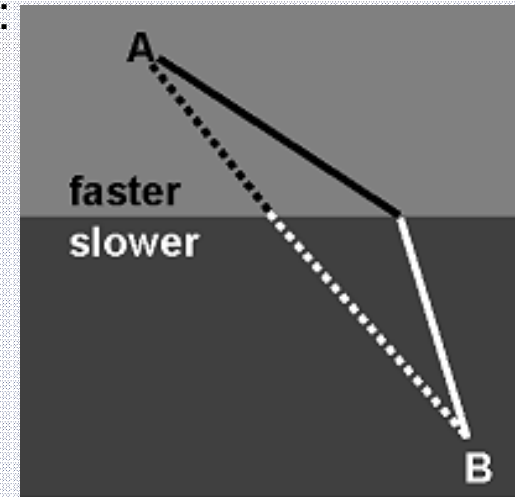
En incidence oblique :



$$\theta_r = \theta_i$$

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

Fermat principle :



Quand  $\sin \theta_i \geq \frac{c_1}{c_2}$   
On a une reflexion totale.



# ONDES ACOUSTIQUES

Atténuation

Echelle des décibels

Tour



## Echelle des dB pour : déci Bel

C'est en fait une échelle log par rapport à  $I_0$  la référence

$I = 10 \times I_0$  alors I vaut 1 Bel soit 10 dB

$I = 100 \times I_0$  alors I vaut 2 Bel soit 20 dB

$I = 10^{-4} \times I_0$  alors I vaut - 4 Bel soit -40 dB ...

**Intensité en dB =  $10 \log (I/I_0)$**

**Intensité en dB =  $20 \log (A/A_0)$**

## **Echelle des dB pour : déci Bel**

**Pour les amplitudes :**

La puissance est le carré des amplitudes de vitesse ou pression donc :

$$\begin{aligned}\text{Intensité en dB} &= 10 \log (I/I_0) = 10 \log (A^2/A_0^2) \\ \text{soit Intensité en dB} &= 20 \log (A/A_0)\end{aligned}$$

**Les 2 façons de calculer sont équivalentes.**



## Echelle des dB pour : déci Bel

**Exercice :**

$$I = 1W$$

$$I_0 = 1mW$$

**Que vaut I en dB ?**

## Echelle des dB pour : déci Bel

Exercice :

$$I = 1W$$

$$I_0 = 1mW$$

Que vaut I en dB ?

Réponse : 30 dB  
car  $I/I_0 = 1000 = 10^3$



## Echelle des dB pour : déci Bel

**Exercice :**

$$p = 200 \text{ Pa}$$

$$\text{Rq : } \log 2 = 0,3$$

$$p_0 = 10^5 \text{ Pa}$$

**Que vaut p en dB par rapport à  $p_0$  ?**

## Echelle des dB pour : déci Bel

**Exercice :**

$$p = 200 \text{ Pa}$$

$$\text{Rq : } \log 2 = 0,3$$

$$p_0 = 10^5 \text{ Pa}$$

**Que vaut p en dB par rapport à  $p_0$  ?**

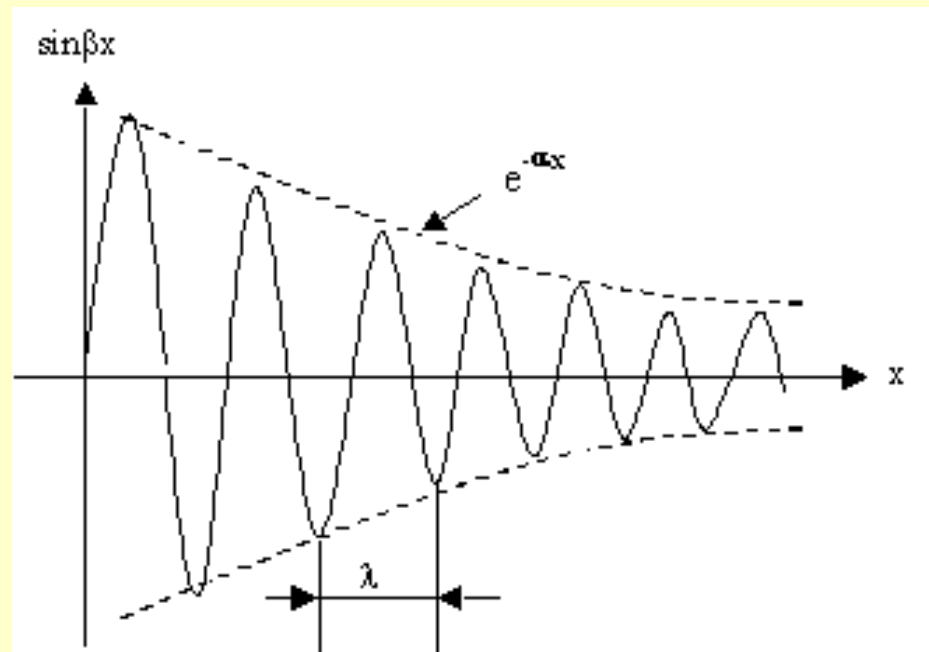
$$\text{Réponse : } p/p_0 = 2 \cdot 10^2/10^5 = 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Donc } \log (p/p_0) = 0,3-3 = -2,7$$

$$\text{Donc } p/p_0 = 20 \times -2,7 = -54 \text{ dB}$$

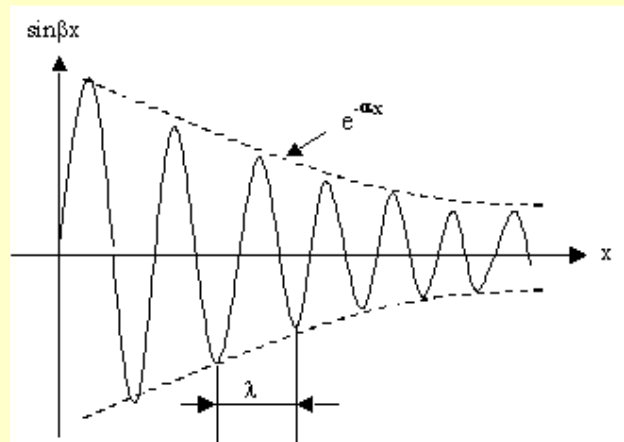


## Atténuation des ondes ultrasonores



L'amplitude diminue avec la propagation

# Atténuation des ondes ultrasonores



$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x) = I_0 \cdot \exp(-\beta \cdot f \cdot x)$$

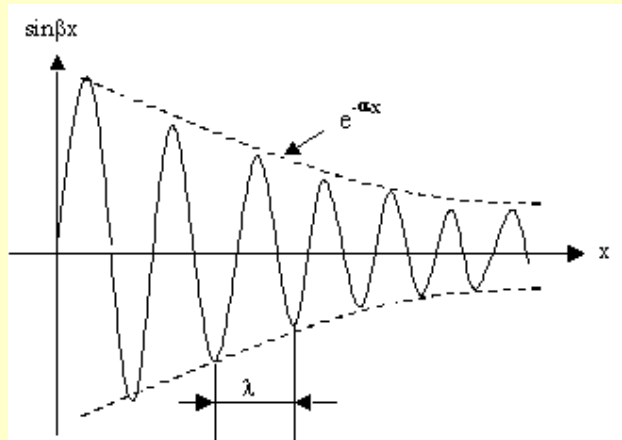
$\alpha$  en  $\text{cm}^{-1}$  et proportionnel à la fréquence

$$\alpha = \beta \cdot f$$

$\beta$  typique 1 dB /cm/ MHz



## Atténuation des ondes ultrasonores



$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x) = I_0 \cdot \exp(-\beta \cdot f \cdot x)$$

**Exemple : différence de puissance entre échos venant de 2 cibles identiques à 2 cm et 12 cm à 4 MHz ? NB :  $\beta = 0,8 \text{ dB/MHz.cm}^{-1}$**

## **Atténuation des ondes ultrasonores**

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x) = I_0 \cdot \exp(-\beta \cdot f \cdot x)$$

**Exemple : différence de puissance entre échos venant de 2 cibles identiques à 2 cm et 12 cm à 4 MHz ?**

**Réponse :**

**Trajet supplémentaire  $2 \times 10 = 20$  cm à 4 MHz**

**Atténuation :  $0,8 \times 20 \times 4 = 64$  dB**



**L'atténuation amène à faire le compromis :**

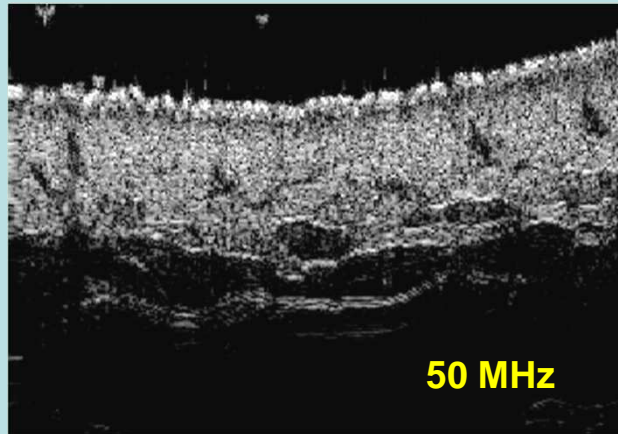
**Profondeur / Résolution**

**Plus haute fréquence = plus petite longueur d'onde**

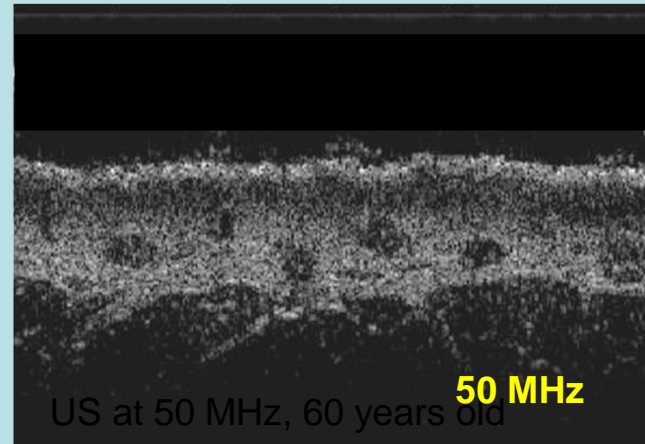
**= meilleure résolution = moins de pénétration**

## Exploration du vieillissement et de la régénération cutanés à 50 MHz

1 mm



*Avant-bras 25 ans*



*Avant-bras 60 ans*

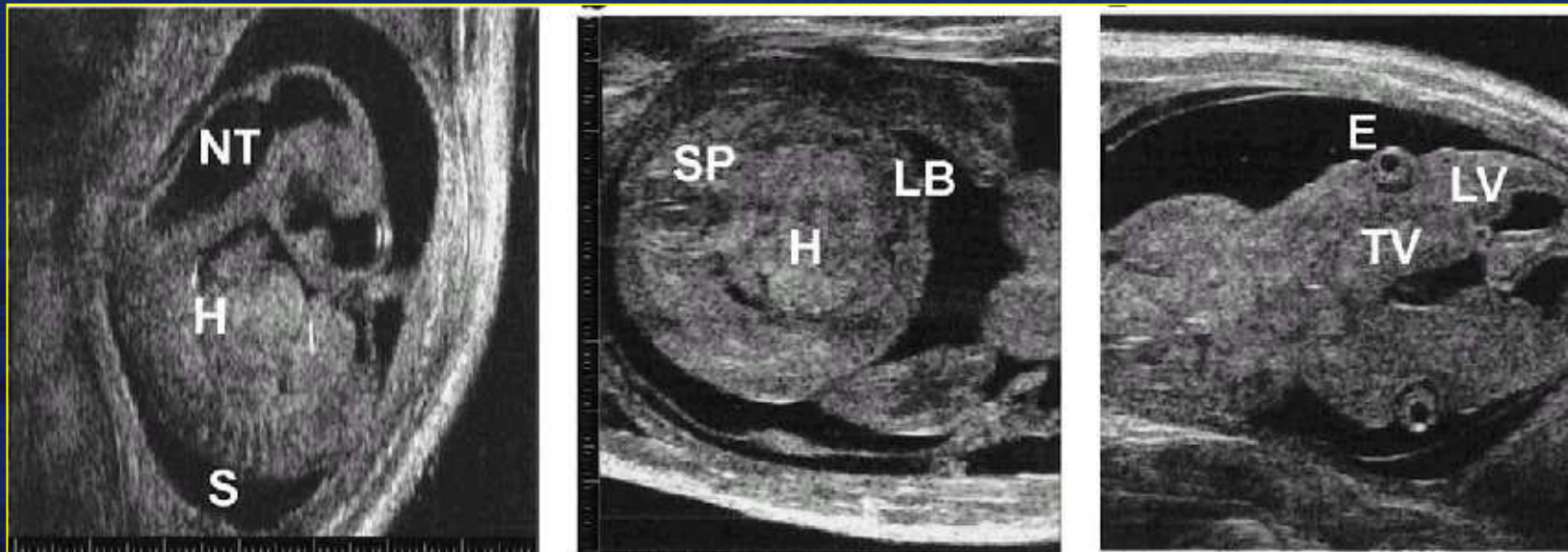
Les ultrasons HF sensibles au remaniement des faisceaux de collagène et de la substance fondamentale du derme au cours du vieillissement

→ Extraction de paramètres acoustiques quantitatifs



# 40 MHz Echographie du petit animal

Biologie du développement du fœtus chez la souris:  
11.5 et 13.5 jours



- a) 11.5 jours : tube neural NT, cœur H, ébauche colonne vertébrale S
- b) 13.5 jours (section transversale): ébauche membres, cœur, colonne vertébrale
- c) 13.5 jours : ventricules cérébraux LV, TV, yeux E.

**Les échos peuvent être -120 dB voire -140 dB sous le niveau d'émission . Les déplacements correspondant sont de l'ordre de  $10^{-5}$  A**





# ONDES ACOUSTIQUES

Ondes dans les tissus  
Sémiologie physique

Tour



**Les milieux homogènes n'ont pas de rupture  
d'impédance acoustique donc pas d'échos !**



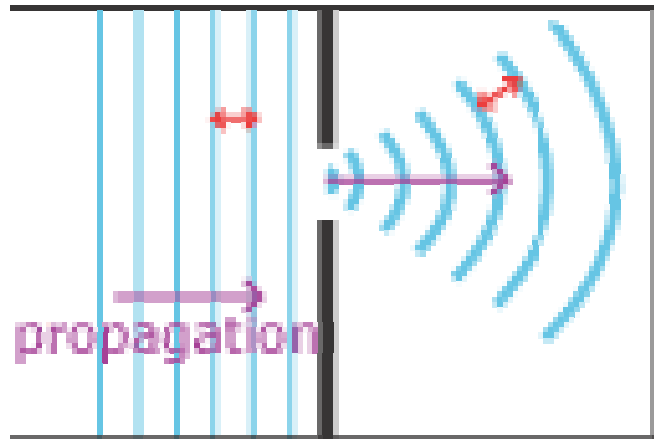


**Les milieux liquides sont homogènes (le plus souvent)  
donc anéchogènes**

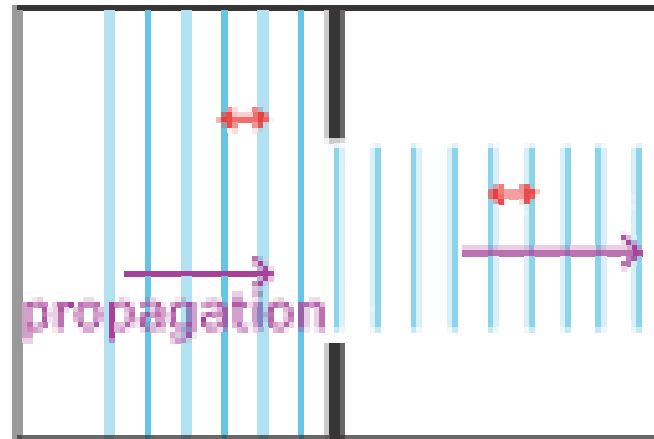
- Le sang
- L'amnios
- L'urine
- La bile
- Les épanchements (plèvre, péricarde, ascite)



# Diffraction



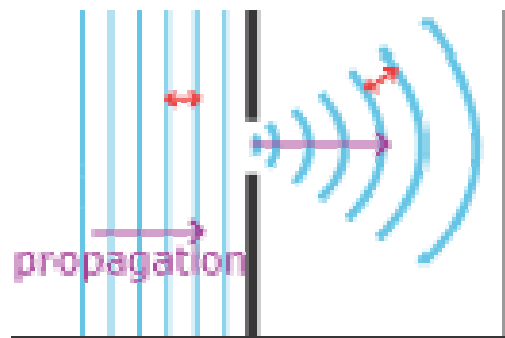
L'obstacle comporte une  
petite ouverture



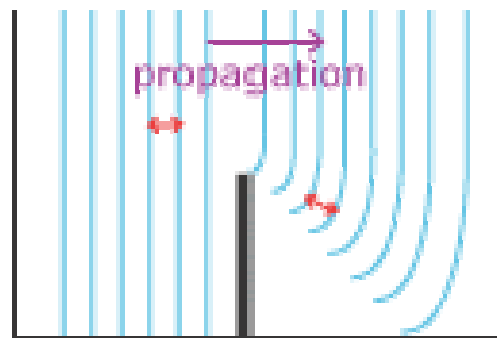
L'obstacle comporte une  
grande ouverture



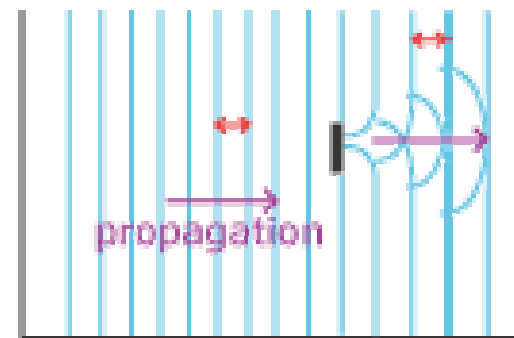
# Diffraction



L'obstacle comporte une petite ouverture



L'onde contourne l'obstacle



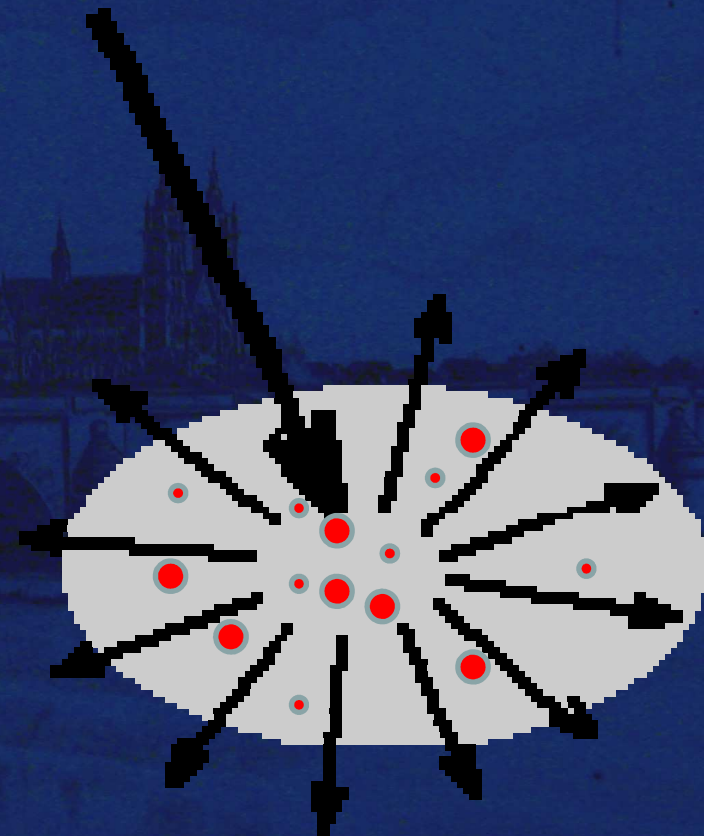
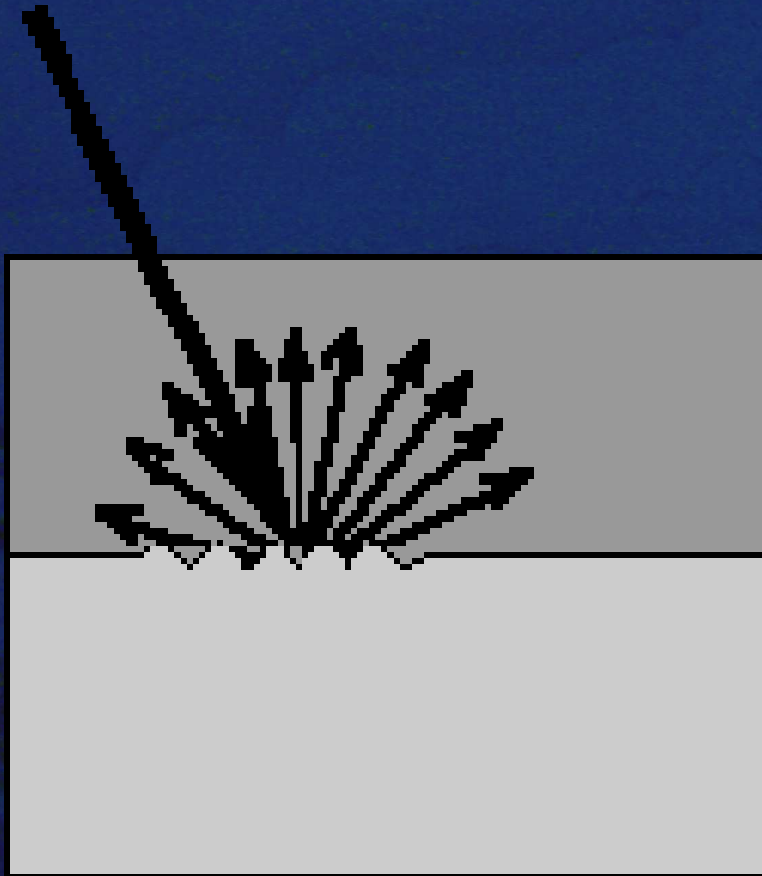
L'obstacle est de petites dimensions

# Dispersion

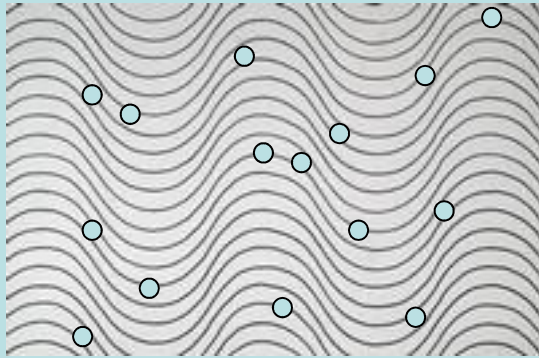




# Diffusion



## Diffusion de Rayleigh (Scattering)



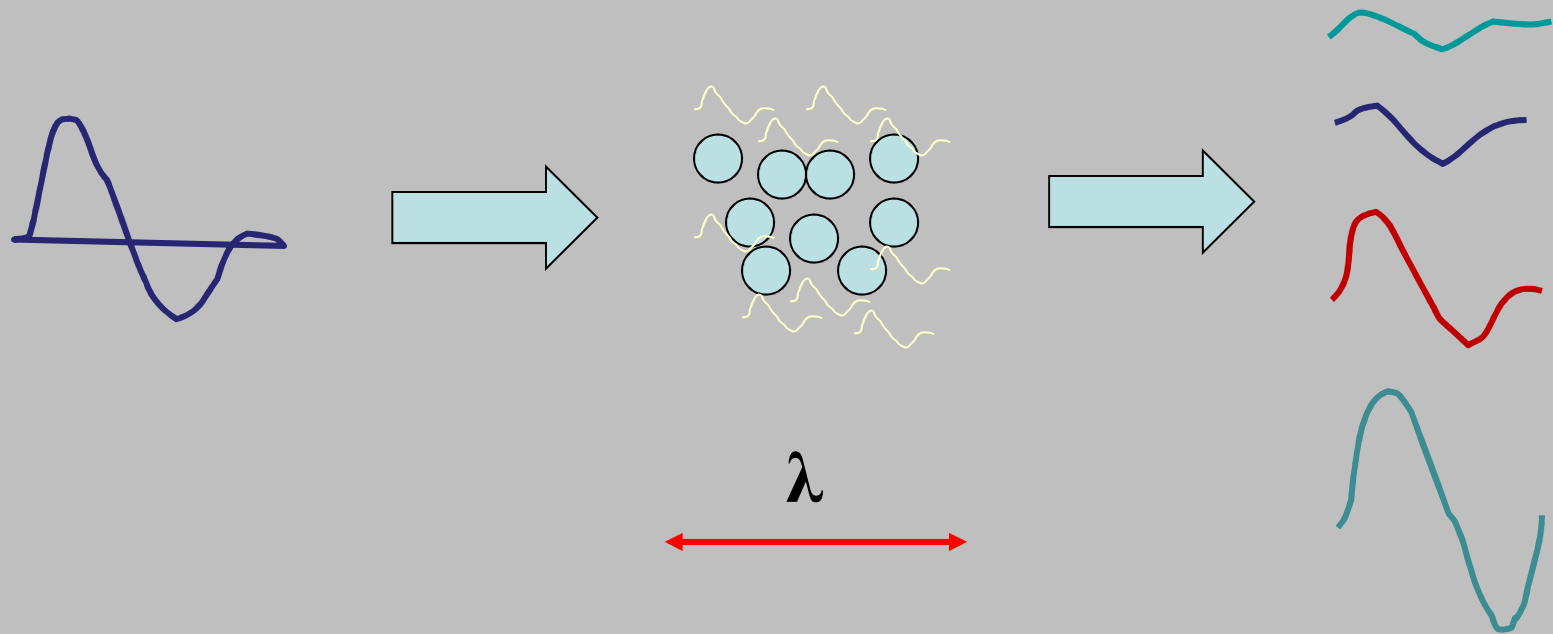
Inhomogénéités beaucoup plus petites  
que la longueur d'onde

$\rho_0, \kappa_0$  Milieu moyen

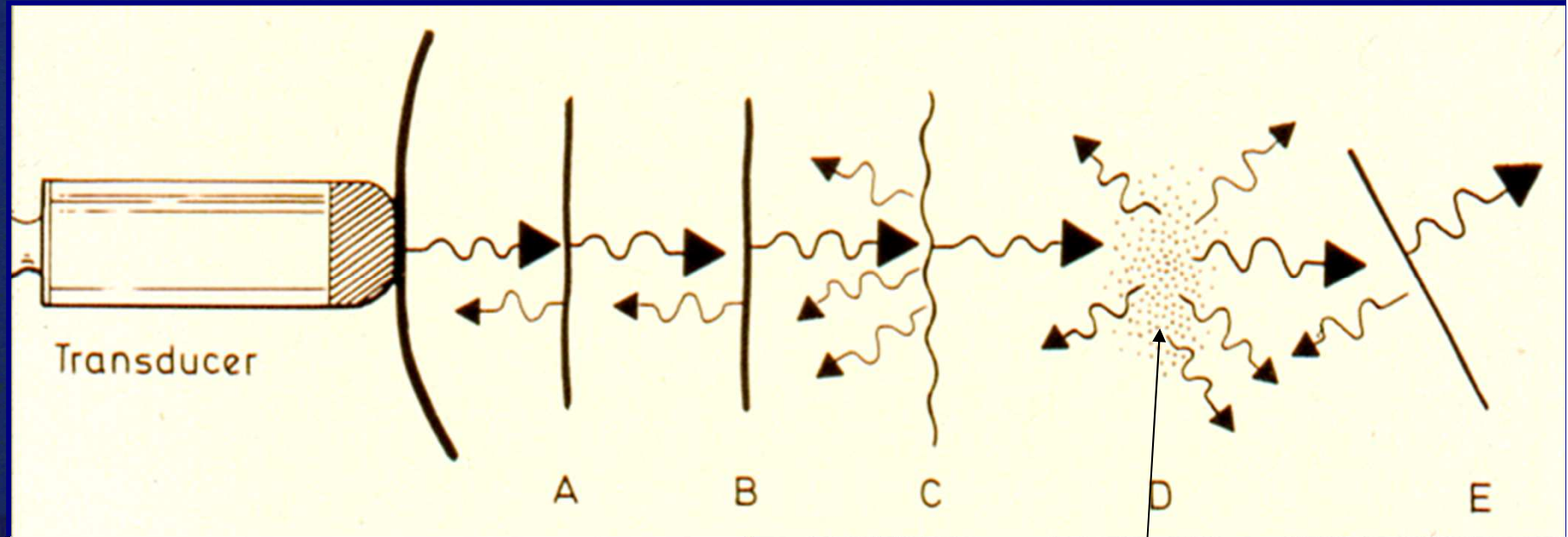
$\rho, \kappa$  Inhomogénéités



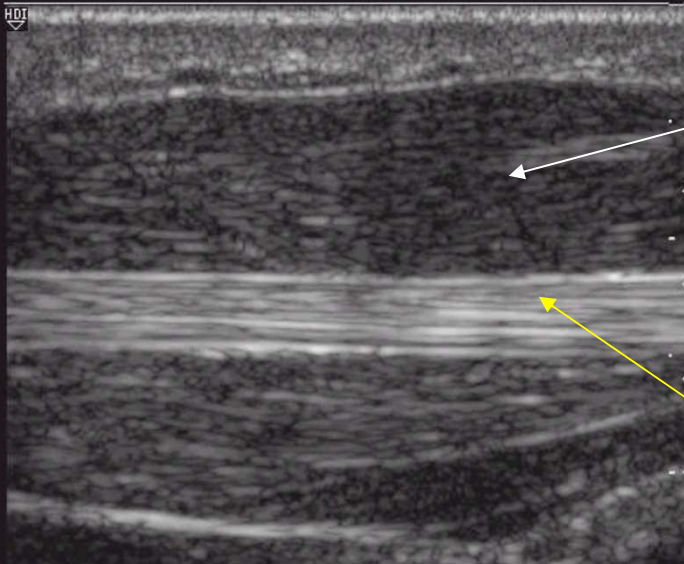
# Echos de diffusion (speckle)



# Interaction ultrasons/milieu de propagation



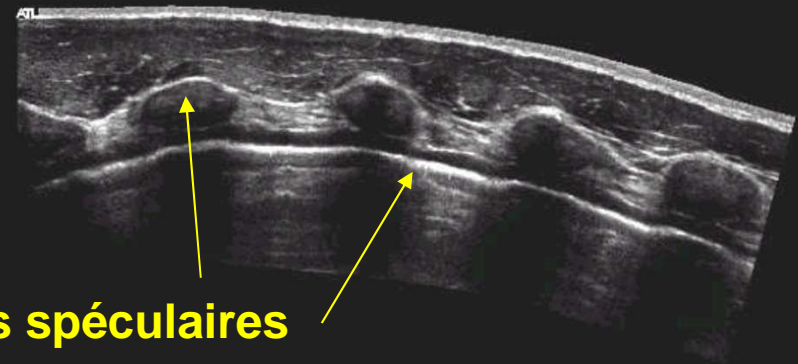
Map 3  
150dB/C4  
Persist Med  
Fr Rate Med  
2D Opt:Res



THENAR FLEXOR POLLICUS LONGUS

Map 2  
170dB/C 3  
2D Opt:FSCT  
SonoCT

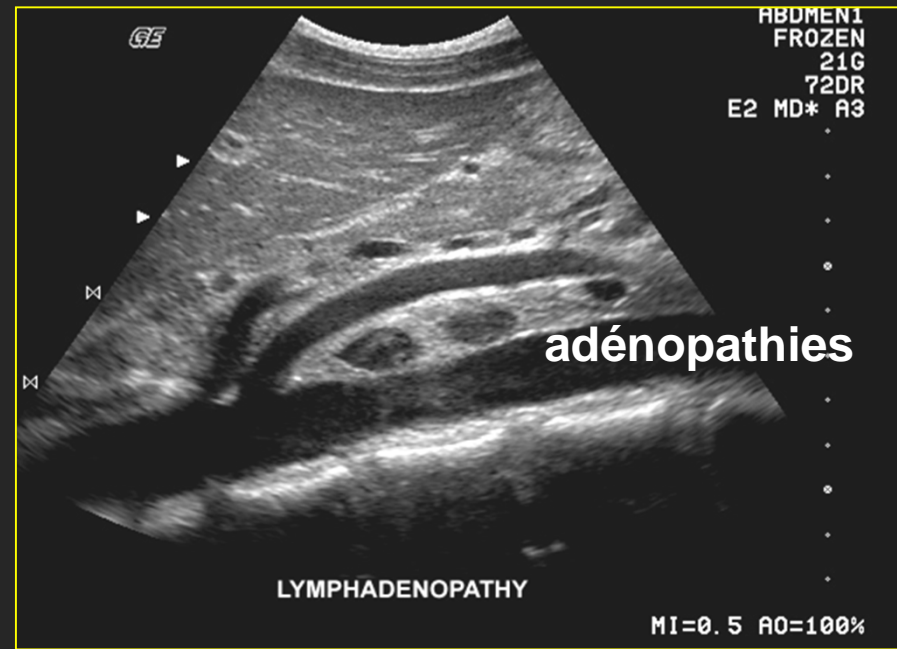
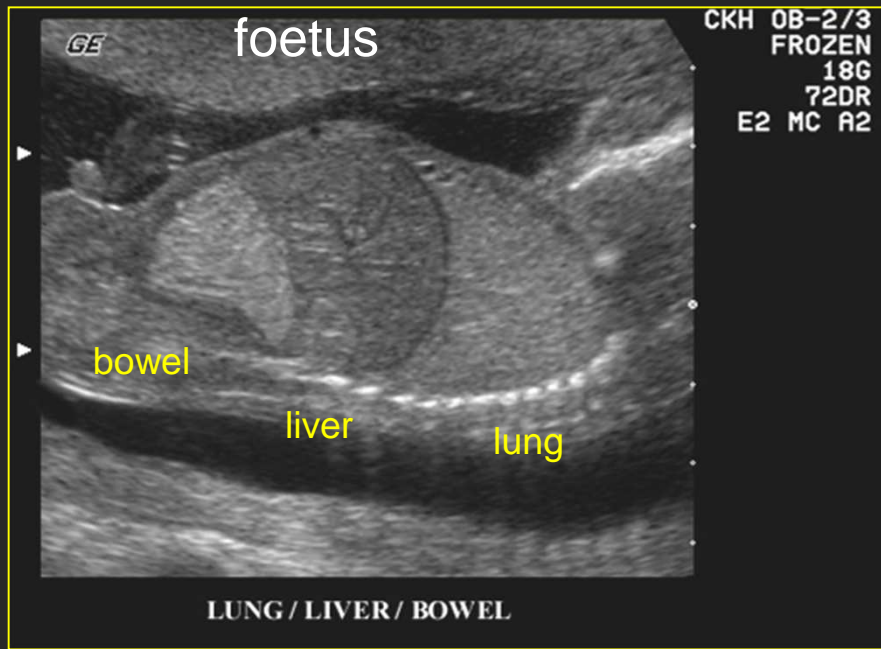
**Échos de diffusion speckle**



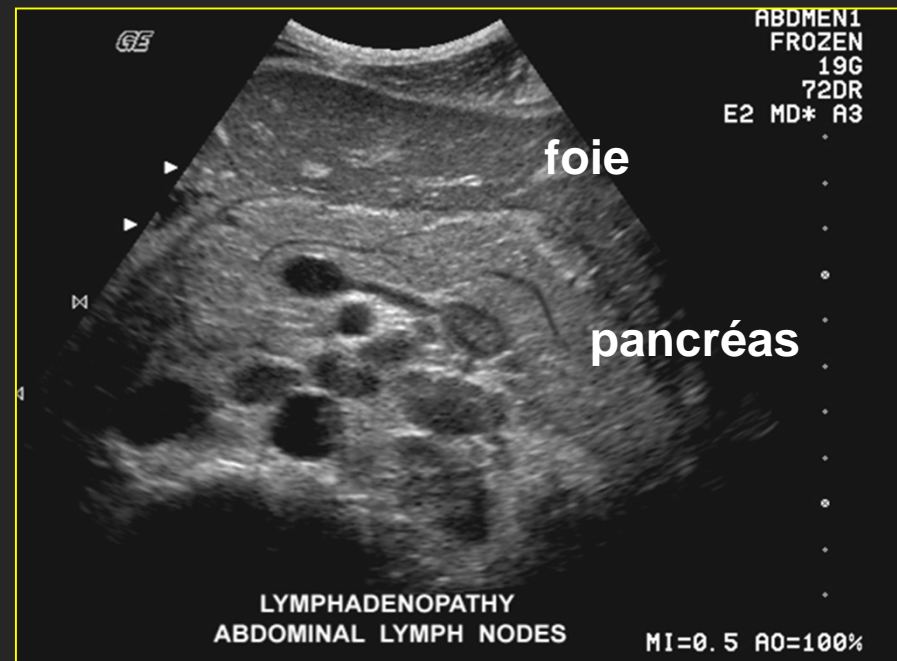
**Échos spéculaires**

INTERNAL MAMMARY ARTERY  
PANORAMIC SonoCT™ IMAGING



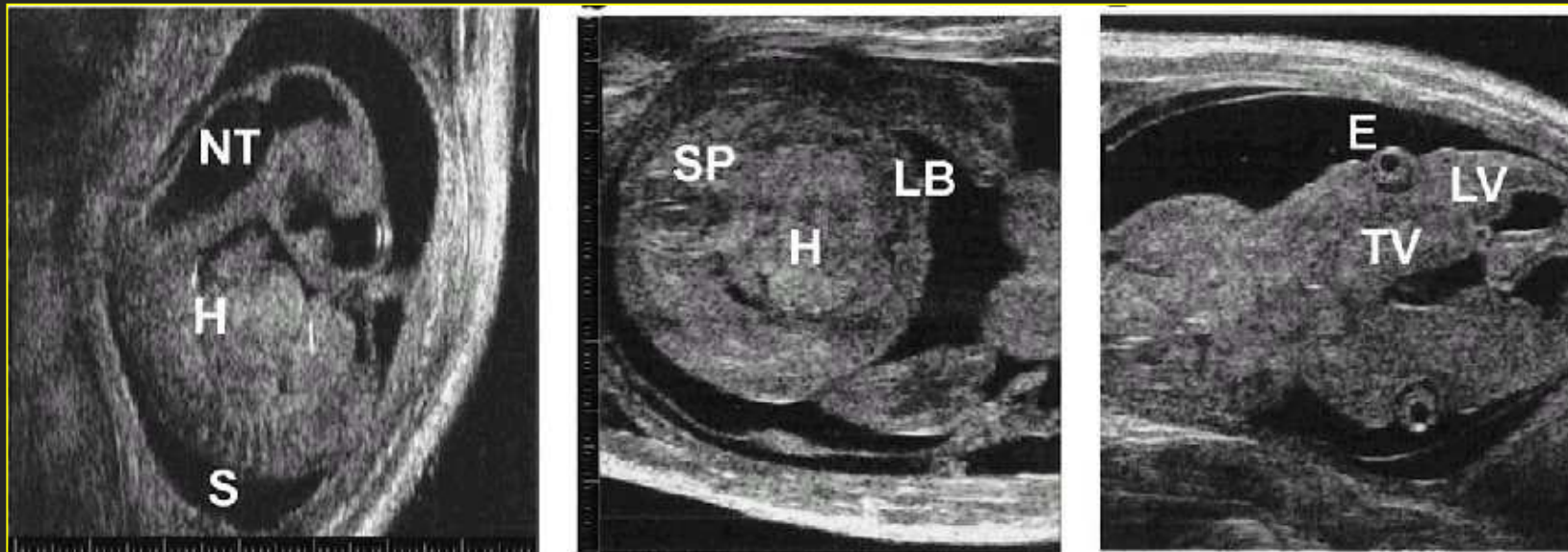


## Réponses tissulaires échographiques



# 40 MHz Echographie du petit animal

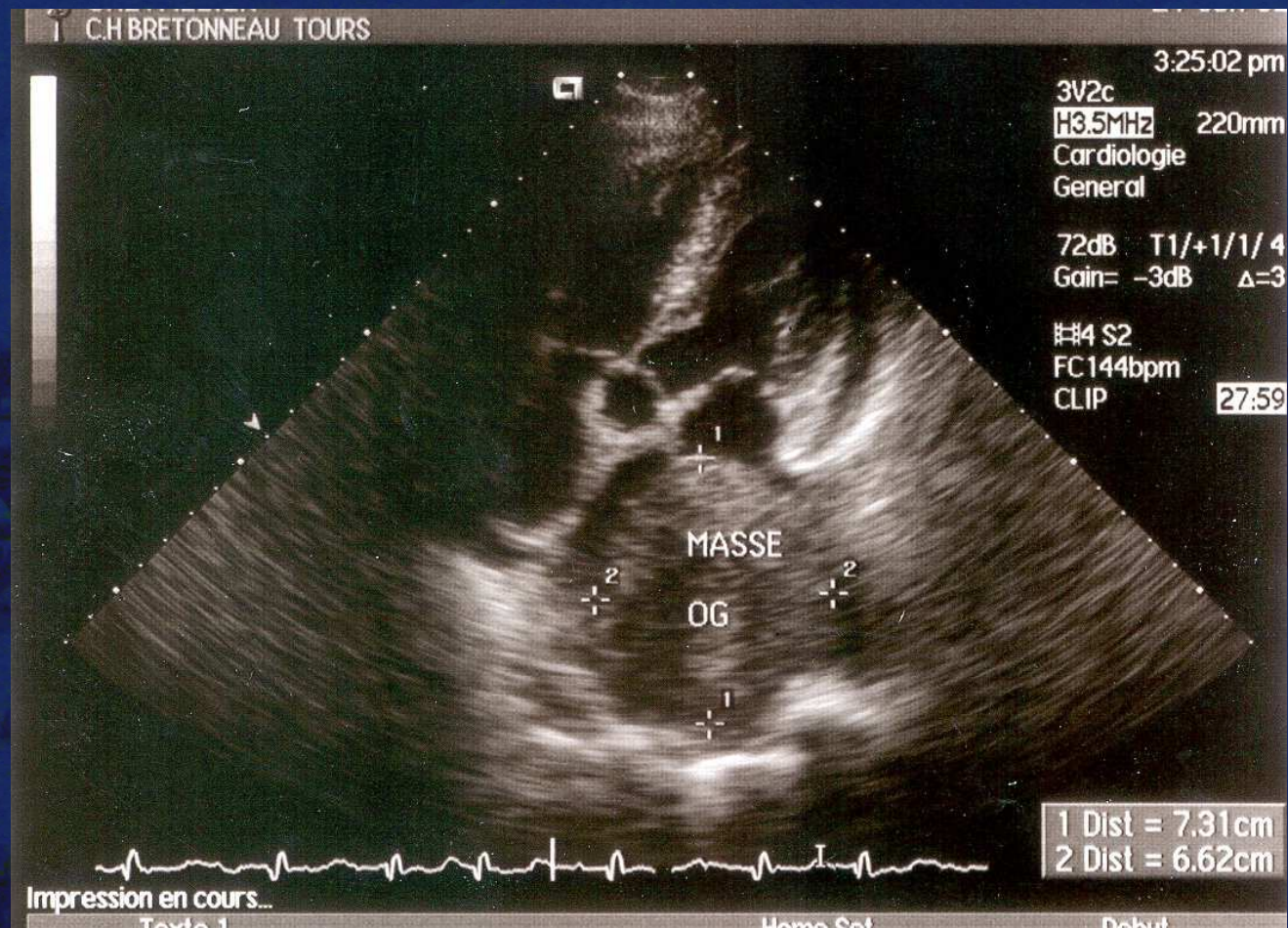
## Biologie du développement du fœtus chez la souris: 11.5 et 13.5 jours



- a) 11.5 jours : tube neural NT, cœur H, ébauche colonne vertébrale S
- b) 13.5 jours (section transversale): ébauche membres, cœur, colonne vertébrale
- c) 13.5 jours : ventricules cérébraux LV, TV, yeux E.



**Remarque très importante : la dynamique de l'image est de 60 à 80 dB : exige une grande maîtrise du faisceau**





## *Correction d'atténuation*

**La correction d'atténuation est faite globalement pour toute l'image, ce qui entraîne des différences du niveau d'énergie US d'une ligne d'exploration à l'autre à une profondeur donnée.**

**Attention les échographes récents proposent des « magic touch » qui reformatent les réglages de gain et correction en fonction de la profondeur pour une « belle » image.**

**Utile mais peut être piégeur .**



# Conclusions générales sur la physique échographique

- Supportée par une physique extrêmement riche
- Extraordinaire vitalité technologique du domaine
- Demain : agents de contraste ciblés, thérapeutiques élargies, élastographies nouvelles, 3D généralisé, capteurs implantés...



# Rappels de mots-clés

- Fréquence – Période
- Longueur d'onde
- Propriétés du milieu de propagation :
  - Célérité des ondes
  - Impédance acoustique
  - Atténuation de l'onde en fonction de la fréquence



# Rappels de mots-clés

- Modifications des ondes :
  - Réflexion - transmission
  - Réfraction
  - Diffusion
  - Diffraction
  - Dispersion
  - Focalisation

Tour



# Rappels de mots-clés

- Amplitude des ondes :
  - En pression
  - En vitesse
  - En intensité acoustique
- Echelle des déciBels : dB

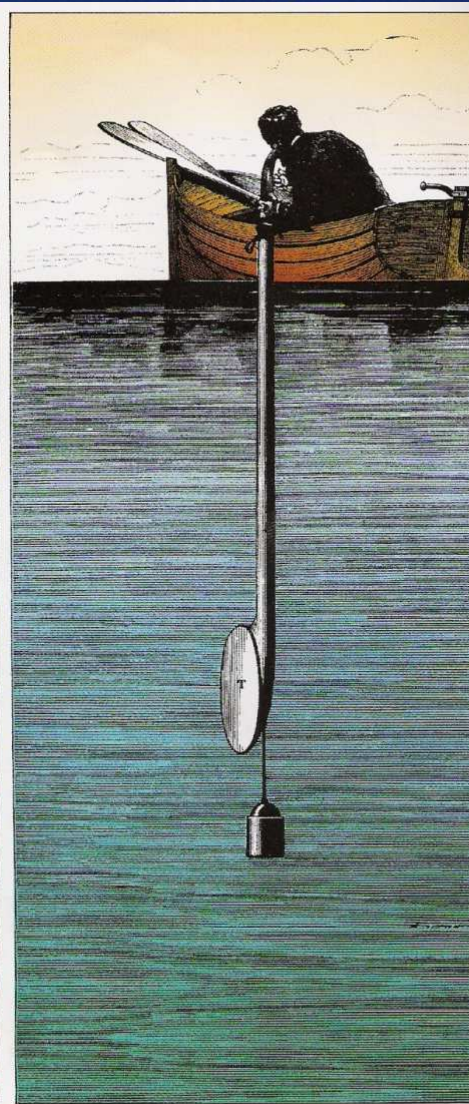
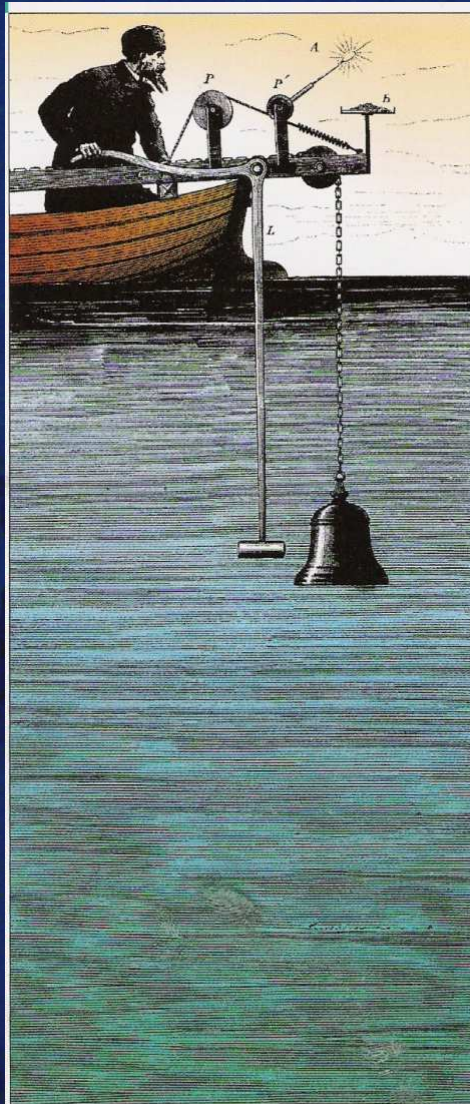


# Historique





# Mesure de la vitesse du son dans le lac Léman

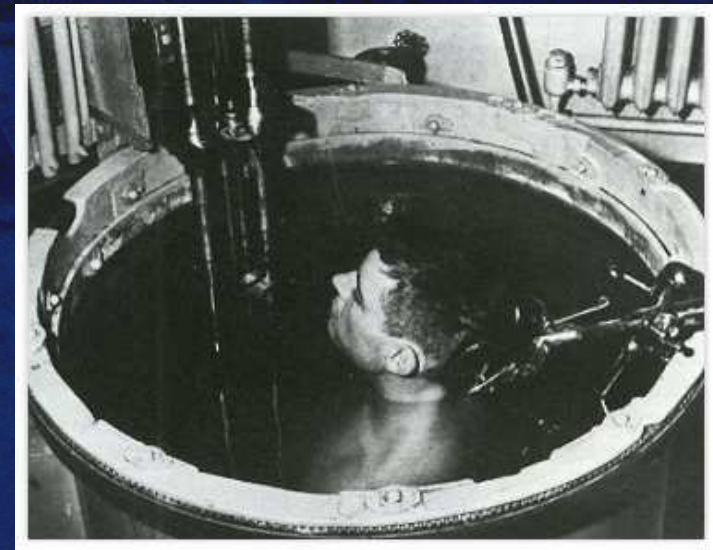
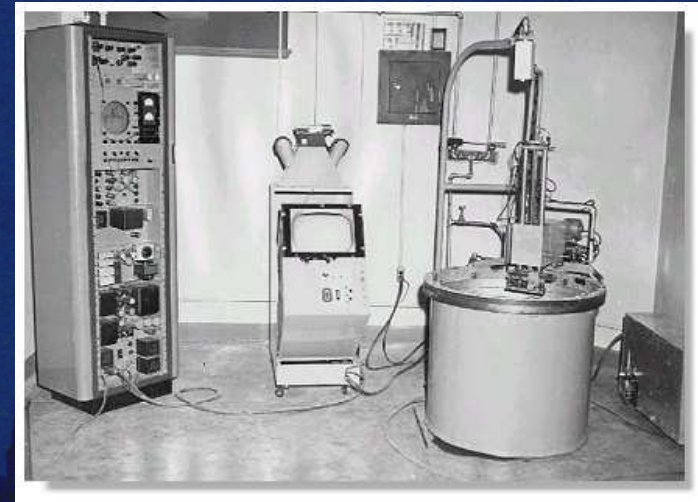
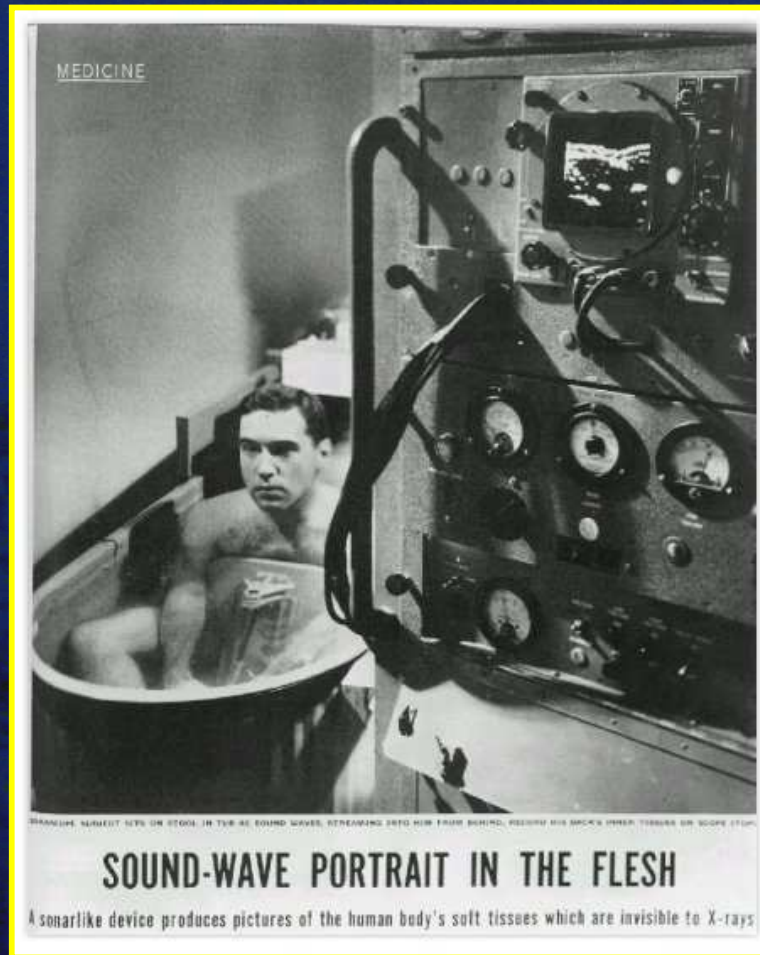


Sounding out shallow waters



## ↪ Histoire

1950 : les premiers appareils d'échographie

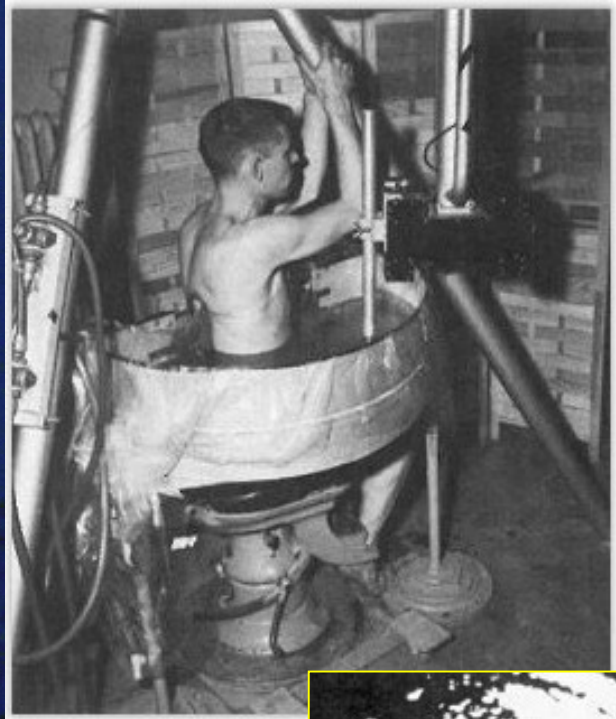


(Tourelle de B29)



## ↪ Histoire

1957 : le Pan Scanner



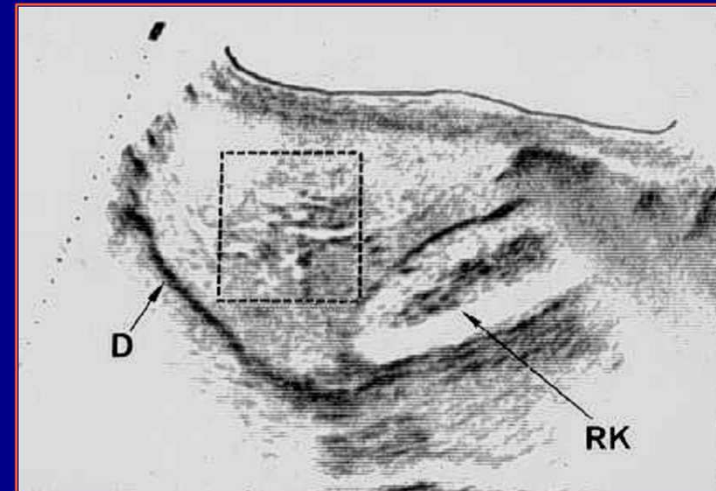
1960 : premier échographe japonais commercial Aloka SSD1





Echographie à balayage manuel et échelle de gris, 1973

## L'imagerie échographique des années 1970



Coupe parasagittale droite passant par le foie et le rein dt

## 3D rendu de surface



Jumeaux 12<sup>e</sup> semaine



FETAL FOOT IN MOUTH



24e semaine

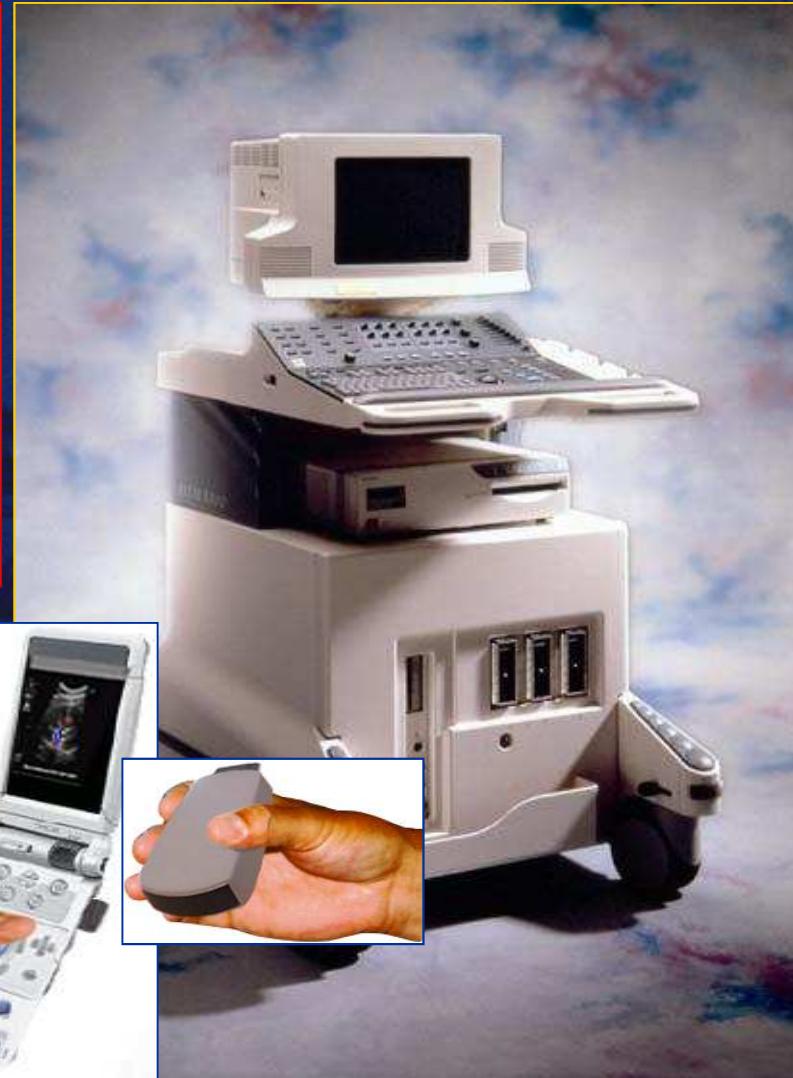
jambes et insertion du cordon



FETAL PROFILE



# Miniaturisation des échographes



# L'échographie

- Une technique d'imagerie simple
- Peu coûteuse
- Prolongement de la palpation
- Non ionisante
- Possible au lit du patient
- Opérateur dépendante
- Peu réinterprétable à distance
- Susceptible d'artéfacts
- Demande une pratique constante
- Exigence nécessaire sinon danger d'erreurs