Master 2 de Dynamique des Fluides et Energétique

Techniques Expérimentales Avancées en Mécanique des Fluides

2013-2014

Mesures ultrasonores dans les fluides et les milieux dispersés

Transparents disponibles sur:

http://www.fast.u-psud.fr/~martin/enseignement.php

Jérôme MARTIN

CNRS, laboratoire FAST

Bat 502-91405 Orsay

Mél: martin@fast.u-psud.fr

Tél: 01 69 15 80 82

Mesures acoustiques :
Métrologie basée sur la propagation d'ondes élastiques

- Mesures des propriétés élastiques des matériaux
- Ondes sismiques: géologie, prospection pétrolière… (f =1-20 Hz)
- Sonars (f =1Hz -20 kHHz)
- Ultrasons :

  (20MHz > **f > 20 kHz**, 100µm < λ **<10cm**)

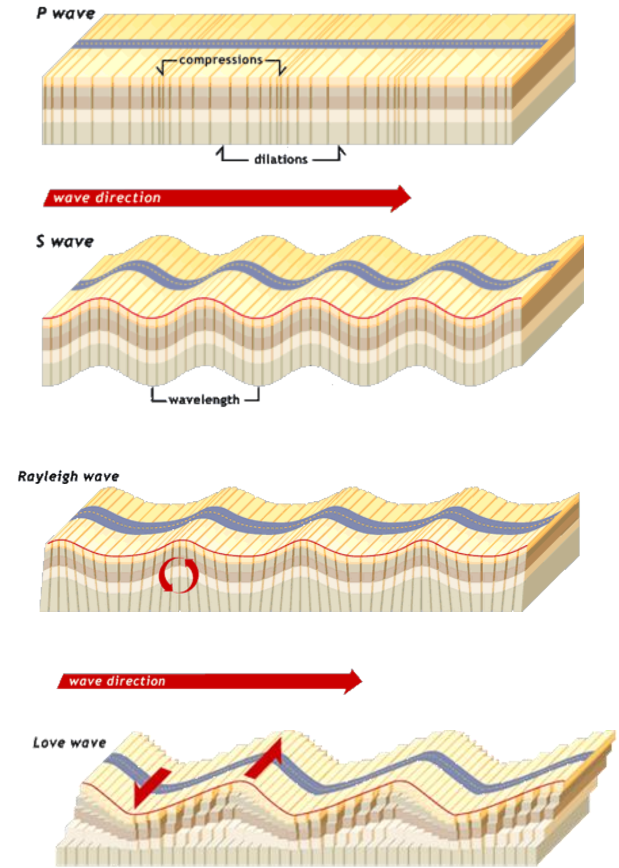
  – « trajets acoustiques»→ niveaux, débitmètre
  – Mesures de défauts, échographie
  – Vélocimétrie (mesure d'effet Doppler)
  – Concentrations et caractérisation des milieux dispersés

Propagation du son : 4 types d'ondes

Ondes de déformation élastique :

- Longitudinales (P, de compression)
- Transverses (T, de cisaillement)
- Ondes de surface (sur e$\lesssim \lambda = c/f$)
- Ondes de plaques (pour e$\approx \lambda = c/f$)

(autres exemples d'ondes)



Propagation du son en volume

(Approche tensorielle: cours Marc François)

Ondes de déformation élastique :

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

K=module élastique (Pa);

ρ =**masse volumique (kg/m³)**

air: 300 m/s solide: qlq km/s

Longitudinales (P, compression) Transverses (T, de cisaillement)

$$c_l = \sqrt{\frac{(\lambda+2\mu)}{\rho}} \qquad c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Coeff de Lamé=f(module d'Young; coeff de Poisson)

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \qquad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad c_{ext} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

μ : module de torsion (Pa)

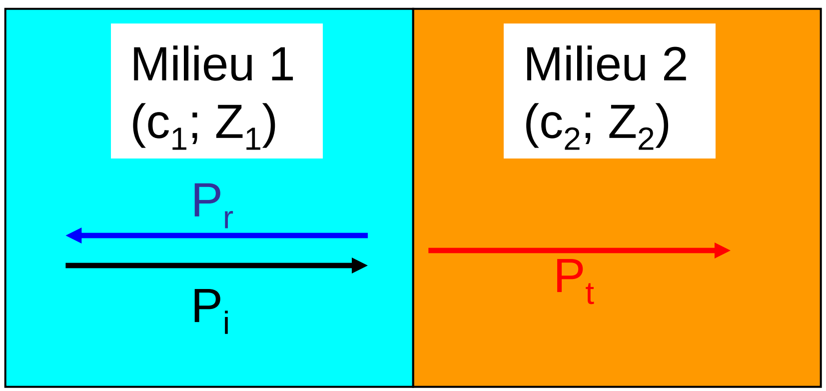
Propagation, réflexion et réfraction :

- Vitesse et impédance acoustiques

$$\boxed{c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \qquad Z = P/\dot{u} = \rho c}$$

(où K=module élastique
$\neq$ module d'incompressibilité: $V\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{E}{3(1-2\nu)}$)

- Réflexion / transmission entre deux milieux



Amplitude de l'onde:

$$t = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}$$

$$r = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_1-Z_2}{Z_1+Z_2}$$

Energie:

$$\boxed{T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \qquad R = \frac{(Z_1-Z_2)^2}{(Z_1+Z_2)^2}}$$

Rq: pour angles α_1 et α_2 :

$Z_1 \rightarrow Z_1/\cos\alpha_1$ et $Z_2 \rightarrow Z_2/\cos\alpha_2$

(Réflexion et réfraction: cas général)

Propagation, réflexion et réfraction :

- Vitesse et impédance acoustiques

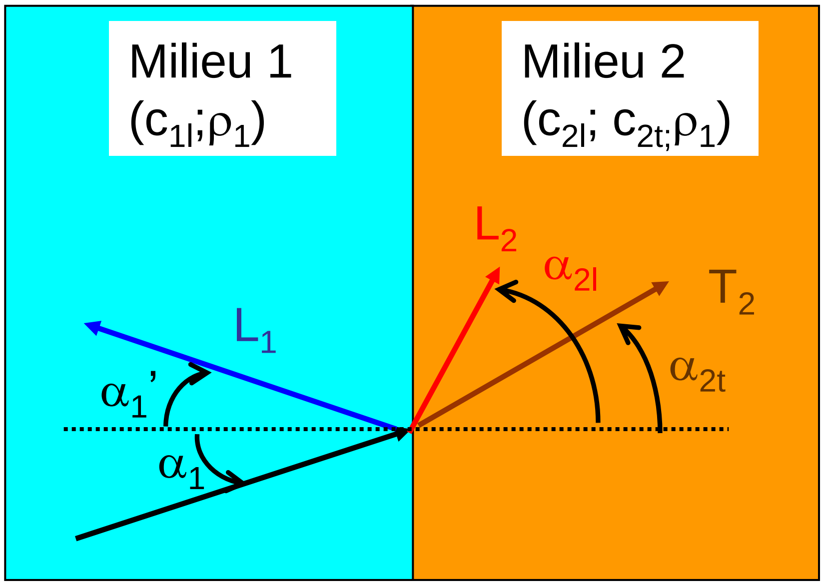
$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \qquad\qquad Z = P/\dot{u} = \rho c$$

matériau	compression		cisaillement	
	C (m/s)	Z (Pa.s/m)	C (m/s)	Z (Pa.s/m)
Air	330	420		
Eau	1500	$1{,}5\ 10^6$		
Aluminium	6350	$17\ 10^6$	3100	$8{,}4\ 10^6$
Polystyrène	2350	$2{,}1\ 10^6$	1120	$1\ 10^6$
Polyéthylène	1950	$1{,}9\ 10^6$	540	$0{,}5\ 10^6$

Remarque: Les propriétés élastiques dépendent de T !!

Réflexion et réfraction :

- Réflexion / réfraction entre deux milieux



Réflection:

$$\boxed{\alpha_1' = \alpha_1}$$

Réfraction: loi de Snell-Descartes:

$$\boxed{\frac{\sin\alpha_1}{c_1} = \frac{\sin\alpha_{2l}}{c_{2l}} = \frac{\sin\alpha_{2t}}{c_{2t}}}$$

Incidences critiques:

$$\sin\alpha_1^l = \frac{c_1}{c_{2l}} \qquad \sin\alpha_1^t = \frac{c_1}{c_{2t}}$$

Rq: Réflexion et réfraction: cas général)

pour angles α_1 et α_2 :

$Z_1 \rightarrow Z_1/\cos\alpha_1$ et $Z_2 \rightarrow Z_2/\cos\alpha_2$

Affaiblissements des ondes:

- **Absorption** = dégradation de l'énergie vibratoire en chaleur

$$\boxed{\frac{P}{P_0} = e^{-\alpha_{att} d}}$$

$$\boxed{\alpha_{att} = -20 \log \frac{P}{P_0}/d \quad \left({}^{dB}/_{m}\right)}$$

- **Diffusion** = dispersion de l'énergie par les hétérogénéités $\approx \lambda$

  Diffusion Rayleigh: $ka < 1 \rightarrow \alpha_{att} \propto (f, a^3 f^2)$

  $ka > 1 \rightarrow \alpha_{att} \propto (a f^2)$

  $ka \gg 1 \rightarrow \alpha_{att} \propto (f, f^2, 1/a)$

  Rq: pour les hétérogénéités $\gg \lambda \rightarrow$ réflexion/réfraction

- **Divergence du faisceau**

$$\boxed{\sin \theta_{1/2} = k_{(dB)} \left(\frac{\lambda}{D}\right)}$$

D: diamètre du transducteur

Rq: plus la longueur d'onde est faible, moins l'onde se propage loin!

… Mais aussi…

- **Non-linéarités**

  ex: Angelo et al. , Phys. Rev Lett. **93**, 214301 (2004).

Excitation à f_1 et f_2 $\Longrightarrow$ Mesure de la réponse à (f_1+f_2) et (f_1-f_2)

(autre technique pour tester la « solidification »)

- **Ondes « actives »**
  - cuves à ultrasons
  - Confinement par ondes stationnaires

    ex: lévitation acoustique

    mais aussi confinement de particules, de jets….

voir: Gröschl. , Acustica. **84**, 432 (1998).

Transducteurs:

- **Contact/immersion**

- **À sabot (transversales /longitudinales sous incidence oblique)**

- **Multiéléments (scan)**

- **Faisceau**

« Near Zone »

$$\boxed{N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda}}$$

Divergence du faisceau

$$\boxed{\sin \theta_{1/2} = k_{(dB)} \left(\frac{\lambda}{D}\right)}$$

D: diamètre du transducteur

Mesures utilisant la propagation dans un fluide (mesure de durée de transit) :

- Onde de compression :

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

vitesse de propagation (m/s)

air: 300 m/s   eau: 1500 m/s

➢ Dans un fluide de vitesse V:

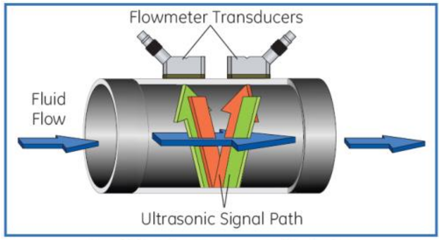
propagation à la vitesse c+V ou c-V:

$$V = \frac{L}{2}\left(\frac{1}{t^{+}} - \frac{1}{t^{-}}\right)$$

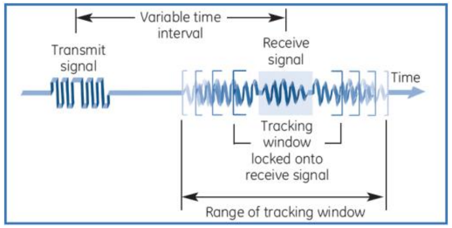
⟶ Anémomètres à ultrasons

Vitesses: 0-50 m/s+-2%

⟶ débitmètres à ultrasons

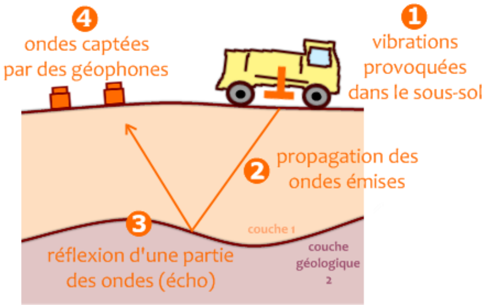


Transit-time flow measurement technique



Techniques utilisant les échos :

- Sismique et prospection pétrolière (f≈ $10Hz$) :



- Echographies médicales :

Mesure de $Z(\vec{r})$

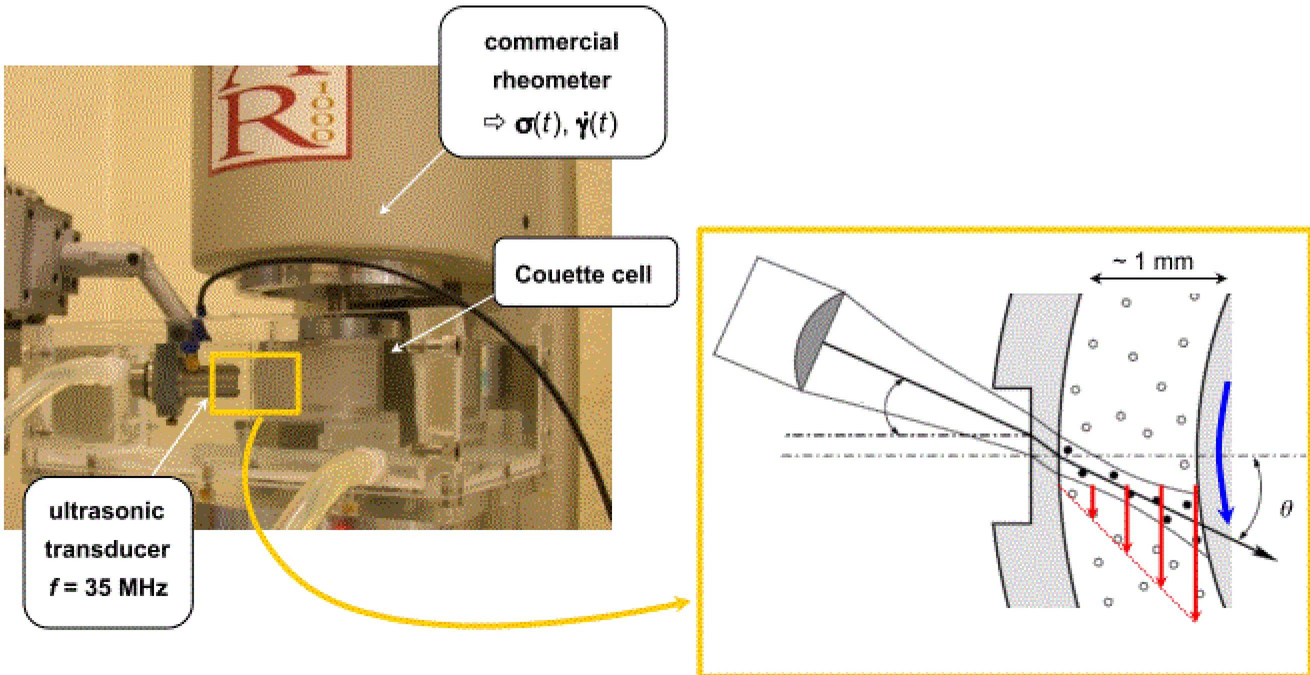
- Renversement temporel (focalisation) :

Thermothérapie (élimination de calculs)

Echos et Doppler :

- Effet Doppler
  - Emetteur et récepteur mobiles: $$f_{reçue} = \frac{c - V_{récepteur}}{c + V_{émetteur}} f_{émise}$$
  - En écho sur un objet mobile: $$f_{reçue} = \frac{c - V}{c + V} f_{émise}$$
- Echographie Doppler :
  - Mesure de la vitesse des globules rouges
- Vélocimétrie Doppler :
  - Fréquence $\longrightarrow$ vitesse
  - Temps de vol $\longrightarrow$ distance du réflecteur $\longrightarrow$ position de mesure

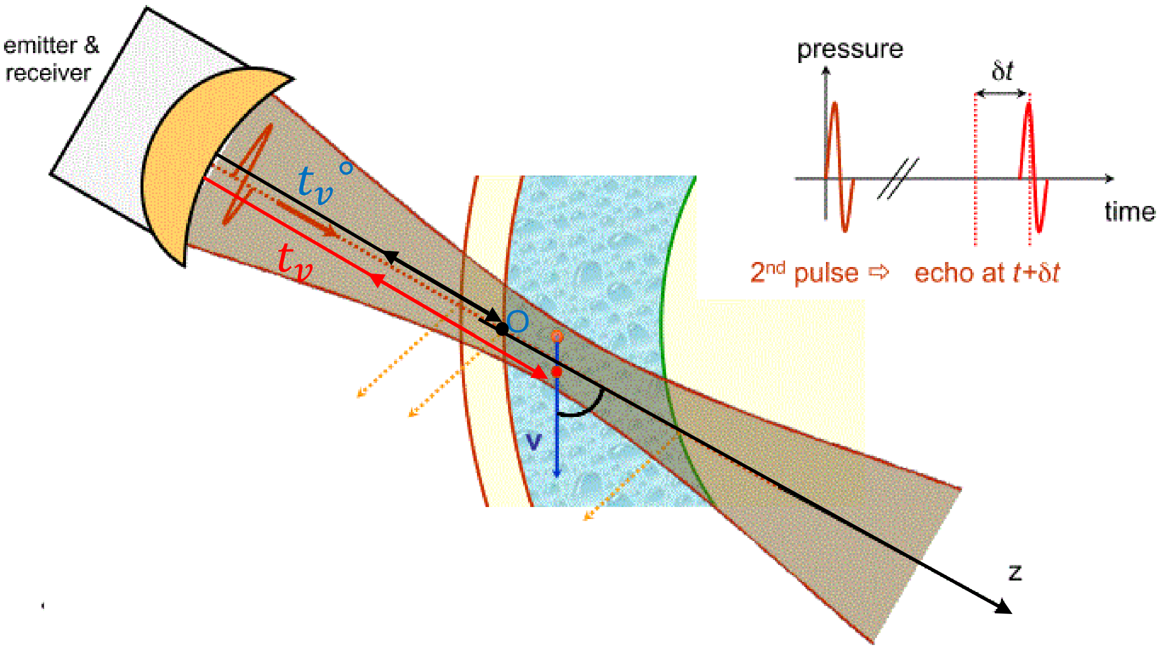
Vélocimétrie à ultrasons:



- speckle tracking algorithm ⇨ $v(r,t)\sin\theta$
- **spatial resolution ~ 40 µm**
- **temporal resolution ~ 0.1 s** per velocity profile

[Manneville *et al.*, *Eur. Phys. J.* AP **28**, 361 (2004)]

Vélocimétrie à ultrasons:



- Diffuseur: particule ou inhomogénéité
- Échographie: le temps d'arrivée de l'écho (t_v) donne la position

$$t_v = t_v° + 2\frac{z}{c}$$

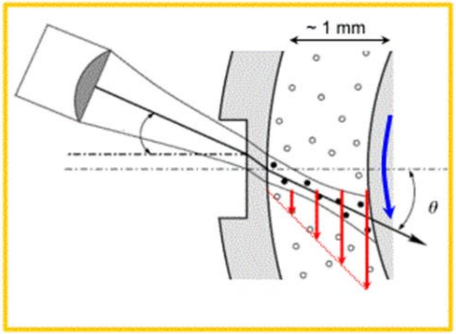
$$\rightarrow z = \frac{c\,(t_v - t_v°)}{2}$$

- Vélocimétrie: En mode « burst », on mesure t_v (donc z) tous les T_b

$$V_z = \frac{\Delta z}{T_b} = \frac{c(t_v(t+T_b) - t_v(t))}{2T_b}$$

$$\rightarrow V_z = \frac{c}{2}\frac{\delta t_v}{T_b}$$

Vélocimétrie à ultrasons:



Suivi d'interférences des ondes rétro-diffusées:
« Speckle tracking »

- **Signal émis:**

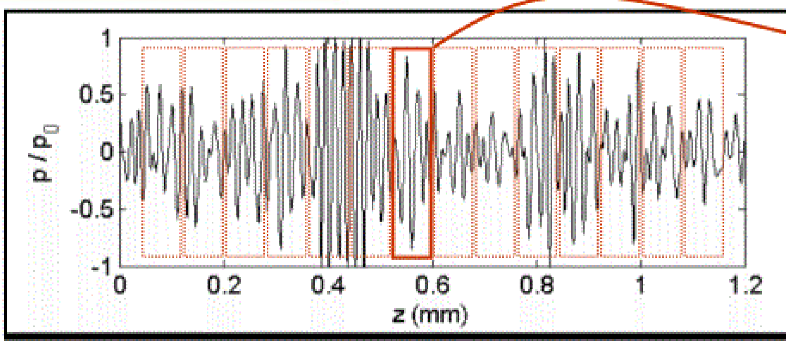
20 pulses à 35MHz tous les T_b = 1ms

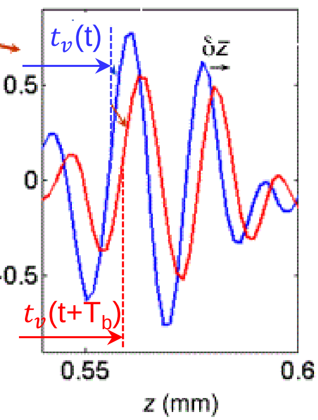
(T_b = «burst » period)

- **Analyse du signal reçu:**

« Cross correlation » sur des « petites fenêtres

(largeur 2 λ ~ 80 µm) $\rightarrow V_z(z)$





$$z = \frac{c\,(t_v - t_v°)}{2}$$

$$V_z = \frac{c}{2}\frac{\delta t_v}{T_b}$$

- **Champ de vitesse dans le couette:**

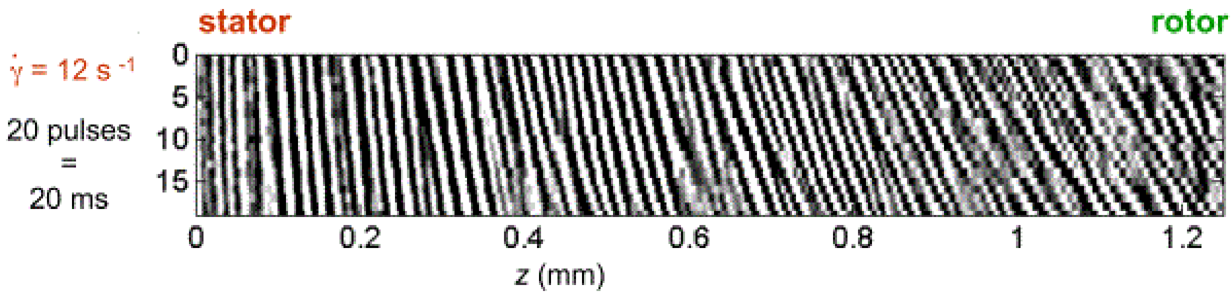
$$\mathrm{r} = \mathrm{Re} - \mathrm{z}\cos\theta$$
$$V_z = V_\theta \sin\theta \quad \rightarrow V_\theta(r)$$

(Ok car une seule composante de vitesse dans l'écoulement)

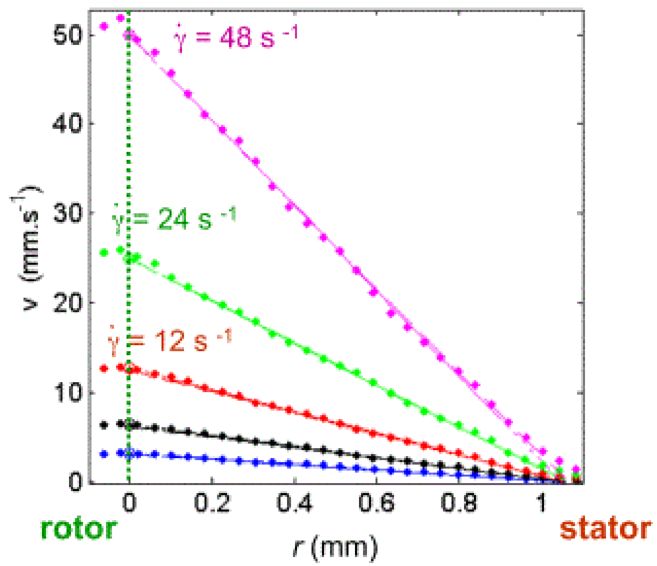
Vélocimétrie à ultrasons:

Suivi d'interférences des ondes rétro-diffusées:
« Speckle tracking »

- 1% wt. **polystyrene spheres** ∅ 3 – 10 μm (λ ~ 40 μm)



averaged over 1 s



- Calibration ⇨

stator position
c_0 = 1480 m/s
θ = 12.5°

Acoustique des milieux dispersés homogènes
Modèle de Bio

M. A. Biot, J. Acoust. Soc Am. **28**, 168 & 179 (1956)
D. L. Johnson & T. J. Plona, J. Acoust. Soc Am. **72**, 556 (1982)

HYP: • description mésoscopique : λ>> a (taille de pore)
• milieux « poreux » isotrope , porosité ϕ

Accélération = div(contraintes élastiques)

$$\begin{cases} (1-\Phi)\rho_s \dfrac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = M\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}) + Q\nabla(\nabla\cdot\mathbf{U}) - N\nabla\bigwedge\nabla\bigwedge\mathbf{u} \\ \Phi\rho_f \dfrac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} = R\nabla(\nabla\cdot\mathbf{U}) + Q\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}) \end{cases}$$

u = déplacement dans la phase solide

U = déplacement dans la phase fluide

Acoustique des milieux dispersés homogènes
Modèle de Biot

M. A. Biot, J. Acoust. Soc Am. **28**, 168 & 179 (1956)
D. L. Johnson & T. J. Plona, J. Acoust. Soc Am. **72**, 556 (1982)

HYP: • description mésoscopique : $\lambda \gg a$ (taille de pore)

• milieux « poreux » isotrope, porosité ϕ

Accélération = div(contraintes élastiques)+ friction visqueuse +effet de masse ajoutée

$$\begin{cases} (1-\Phi)\rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = M\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}) + Q\nabla(\nabla\cdot\mathbf{U}) - N\nabla\bigwedge\nabla\bigwedge\mathbf{u} + \left(\frac{\eta\Phi^2}{K}\right)\tilde{F}(\omega)\left(\frac{\partial\mathbf{U}}{\partial t} - \frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t}\right) + (\alpha-1)\Phi\rho_f\left(\frac{\partial^2\mathbf{U}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\mathbf{u}}{\partial t^2}\right) \\ \Phi\rho_f \frac{\partial^2\mathbf{U}}{\partial t^2} = R\nabla(\nabla\cdot\mathbf{U}) + Q\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}) - \left(\frac{\eta\Phi^2}{K}\right)\tilde{F}(\omega)\left(\frac{\partial\mathbf{U}}{\partial t} - \frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t}\right) - (\alpha-1)\Phi\rho_f\left(\frac{\partial^2\mathbf{U}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\mathbf{u}}{\partial t^2}\right) \end{cases}$$

2 régimes de fréquence:

$$\left(\delta_v = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \quad \begin{matrix} > a \\ < a \end{matrix}\right)$$

- LF: F(0) = 1
- HF : $F(\omega) \sim a/\delta_v\,(1+i)$

Modules élastiques dans le modèle de Biot :

$$
\begin{cases}
\sigma^s_{ij} = ((M-2N)\nabla\cdot\mathbf{u} + Q\nabla\cdot\mathbf{U})\ \delta_{ij} + N\ e_{ij} \\
\sigma^f_{ij} = (R\nabla\cdot\mathbf{U} + Q\nabla\cdot\mathbf{u})\ \delta_{ij}
\end{cases}
$$

$$e_{ij} = \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$$

$$M = \frac{4}{3}N + \frac{(1-\Phi)(1-\Phi-\frac{K_p}{K_s})K_s + \Phi\frac{K_s}{K_f}K_p}{1-\Phi-\frac{K_p}{K_s}+\Phi\frac{K_s}{K_f}}$$

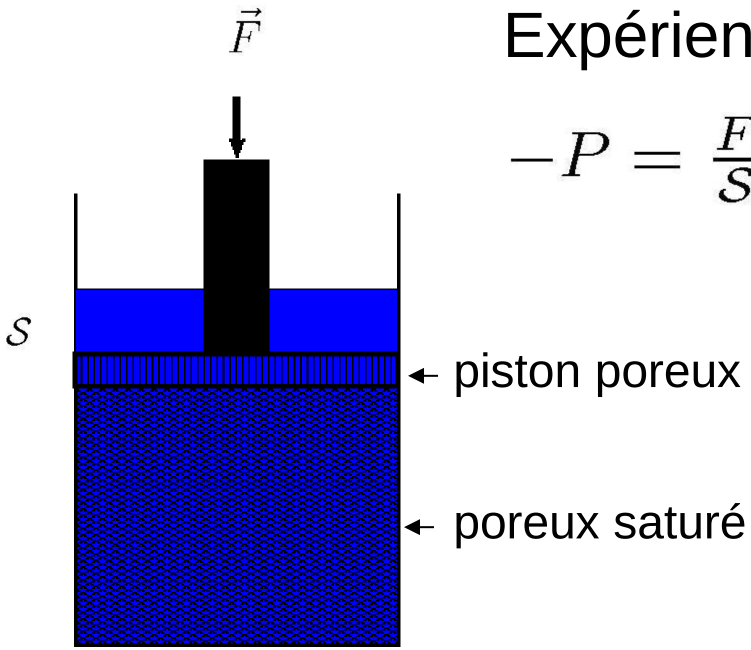
$$Q = \frac{\Phi(1-\Phi-\frac{K_p}{K_s})K_s}{1-\Phi-\frac{K_p}{K_s}+\Phi\frac{K_s}{K_f}}$$

$$R = \frac{\Phi^2 K_s}{1-\Phi-\frac{K_p}{K_s}+\Phi\frac{K_s}{K_f}}$$

Modules élastiques dans le modèle de Biot :

$$\begin{cases} \sigma_{ij}^{s} = ((M-2N)\nabla\cdot\mathbf{u} + Q\nabla\cdot\mathbf{U})\ \delta_{ij} + N\ e_{ij} \\ \sigma_{ij}^{f} = (R\nabla\cdot\mathbf{U} + Q\nabla\cdot\mathbf{u})\ \delta_{ij} \end{cases}$$

$$e_{ij} = \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$$



Expérience statique:

$$-P = \frac{F}{\mathcal{S}} = K_p\nabla\cdot\mathbf{u}$$

$$\begin{cases} -P = (M - \frac{4}{3}N)\nabla\cdot\mathbf{u} + Q\nabla\cdot\mathbf{U} \\ 0 = R\nabla\cdot\mathbf{U} + Q\nabla\cdot\mathbf{u} \end{cases}$$

$$\boxed{K_p = (M - \frac{4}{3}N - \frac{Q^2}{R})}$$

Ondes acoustiques en milieu dispersé :

$$\begin{cases} (1-\Phi)\rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = M\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}) + Q\nabla(\nabla\cdot\mathbf{U}) - N\nabla\bigwedge\nabla\bigwedge\mathbf{u} + (\frac{\eta\Phi^2}{K})\tilde{F}(\omega)(\frac{\partial\mathbf{U}}{\partial t} - \frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t}) + (\alpha-1)\Phi\rho_f(\frac{\partial^2\mathbf{U}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\mathbf{u}}{\partial t^2}) \\ \Phi\rho_f \frac{\partial^2\mathbf{U}}{\partial t^2} = R\nabla(\nabla\cdot\mathbf{U}) + Q\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}) - (\frac{\eta\Phi^2}{K})\tilde{F}(\omega)(\frac{\partial\mathbf{U}}{\partial t} - \frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t}) - (\alpha-1)\Phi\rho_f(\frac{\partial^2\mathbf{U}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\mathbf{u}}{\partial t^2}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{0} = M\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}) + Q\nabla(\nabla\cdot\mathbf{U}) - N\nabla\bigwedge\nabla\bigwedge\mathbf{u} + \omega^2(\tilde{\rho_{11}}\mathbf{u} + \tilde{\rho_{12}}\mathbf{U}) \\ \mathbf{0} = R\nabla(\nabla\cdot\mathbf{U}) + Q\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}) + \omega^2(\tilde{\rho_{22}}\mathbf{U} + \tilde{\rho_{12}}\mathbf{u}) \end{cases}$$

3 modes (pour K_p, N ≠0):

- 1 onde transverse : $\tilde{v}_t^{\,2} = \dfrac{N}{\rho_{eff}}$

- 2 ondes de compression :
  1 onde rapide (solide et liquide en phase)

  + 1 onde lente à haute fréquence
  (T. J. Plona, Appl. Phys. Lett. **36**, 259 (1980))

Ondes de compression en milieu dispersé :

		$\omega \gg \omega_c$	$\omega \ll \omega_c$
Mode rapide	$c_{fast} = \sqrt{\frac{K_{eff}}{\rho_{eff}}}$ avec:	$k'' \propto \frac{\sqrt{\omega}}{a}$	$k'' \propto a^2\omega^2$

$$\rho_{eff} = \frac{\alpha\rho_f[(1-\Phi)\rho_s + (1-\alpha^{-1})\Phi\rho_f]}{\Phi(1-\Phi)\rho_s + (\alpha - 2\Phi + \Phi^2)\rho_f} \quad = [(1-\Phi)\rho_s + \Phi\rho_f] \quad for \quad \alpha \to \infty$$

Pour K_f < (K_p , N) < K_s
(consolidé)

$$K_{eff} = K_p + \frac{4}{3}N$$

	$\omega \gg \omega_c$	$\omega \ll \omega_c$
Mode lent	$c_{slow} = \frac{c_f}{\sqrt{\alpha}}$	diffusif

Pour K_p=N=0
(non-consolidé)

$$\frac{1}{K_{eff}} = \frac{1-\Phi}{K_s} + \frac{\Phi}{K_f}$$

	$\omega \gg \omega_c$	$\omega \ll \omega_c$
Mode lent	inexistant	diffusif

Ondes de compression en milieu dispersé :

$\omega \ll \omega_c$: 1 mode rapide, $c_{fast} = \sqrt{\frac{K_{eff}}{\rho_{eff}}}$, atténuation: $k'' \propto a^2\omega^2$

+ 1 mode lent diffusif

$\omega \gg \omega_c$: atténuation: $k'' \propto \frac{\sqrt{\omega}}{a}$

For $K_f < (K_b , N) < K_s$

1 mode rapide $c_{fast} = \sqrt{\frac{K_{eff}}{\rho_{eff}}}$ avec $K_{eff} = K_p + \frac{4}{3}N$

$$\rho_{eff} = \frac{\alpha\rho_f[(1-\Phi)\rho_s+(1-\alpha^{-1})\Phi\rho_f]}{\Phi(1-\Phi)\rho_s+(\alpha-2\Phi+\Phi^2)\rho_f} \quad = [(1-\Phi)\rho_s + \Phi\rho_f] \quad for \quad \alpha \to \infty$$

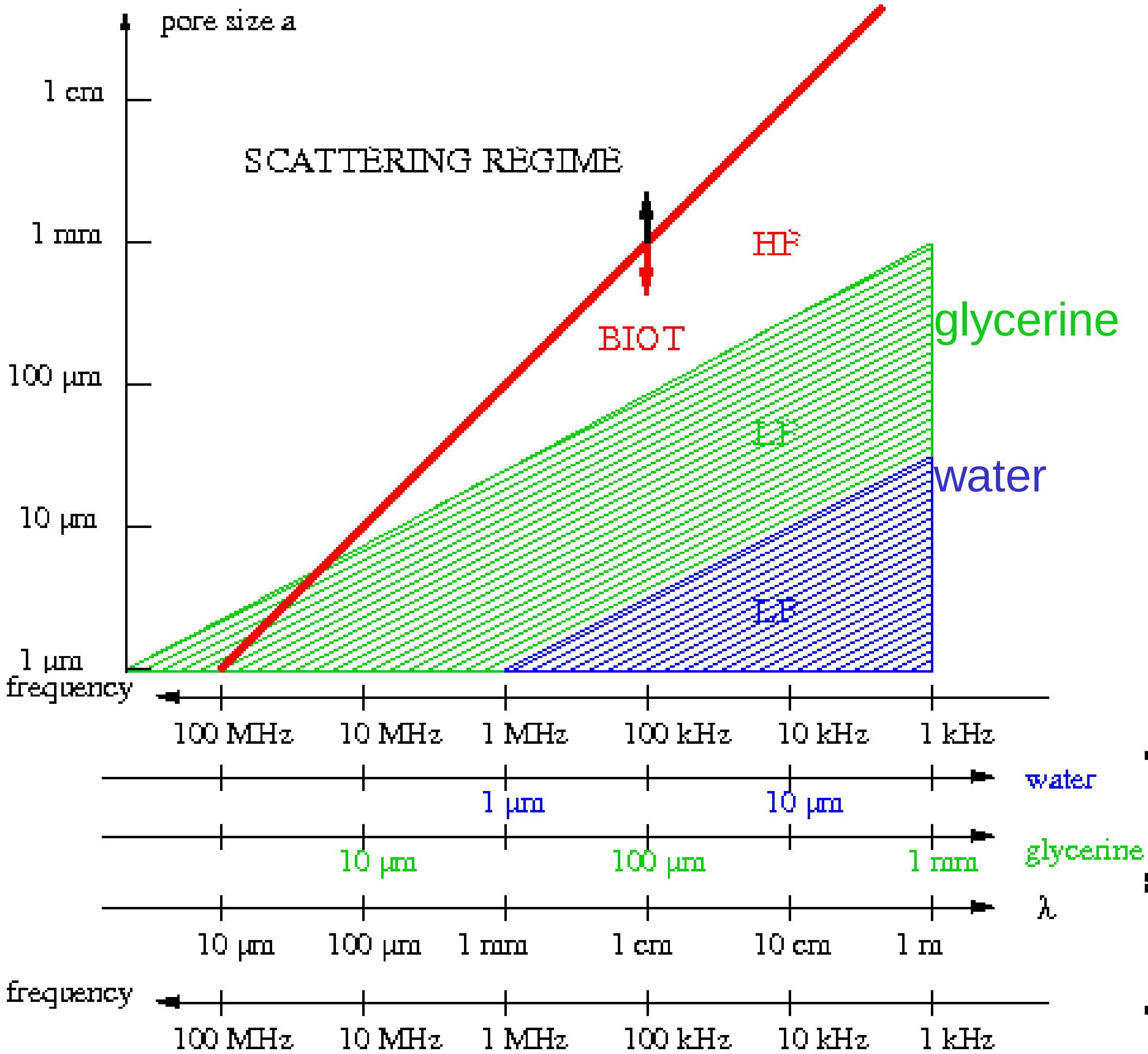
+1 mode lent propagatif: $c_{slow} = \frac{c_f}{\sqrt{\alpha}}$

For K_p=N=0

un mode rapide seul $c_{fast} = \sqrt{\frac{K_{eff}}{\rho_{eff}}}$ avec: $\frac{1}{K_{eff}} = \frac{1-\Phi}{K_s} + \frac{\Phi}{K_f}$

$$\rho_{eff} = \frac{\alpha\rho_f[(1-\Phi)\rho_s+(1-\alpha^{-1})\Phi\rho_f]}{\Phi(1-\Phi)\rho_s+(\alpha-2\Phi+\Phi^2)\rho_f}$$

Régimes de Biot :



Peau visqueuse:

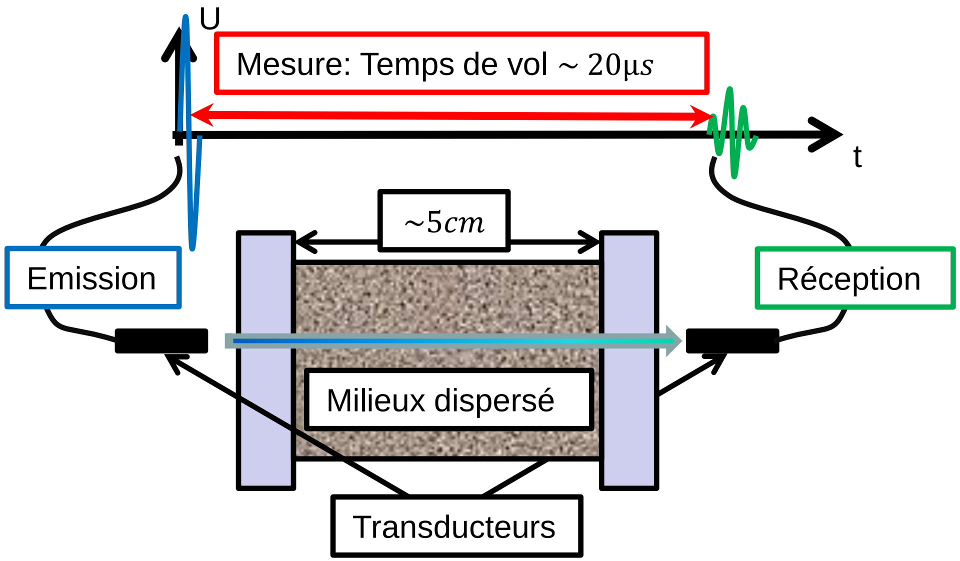
$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}$$

Onde acoustique (pour v~1km/s)

Mesures vitesse du son/atténuation dans les milieux dispersés

$f \approx 1$ MHz

$\lambda \approx 1$mm



Vitesse du son:

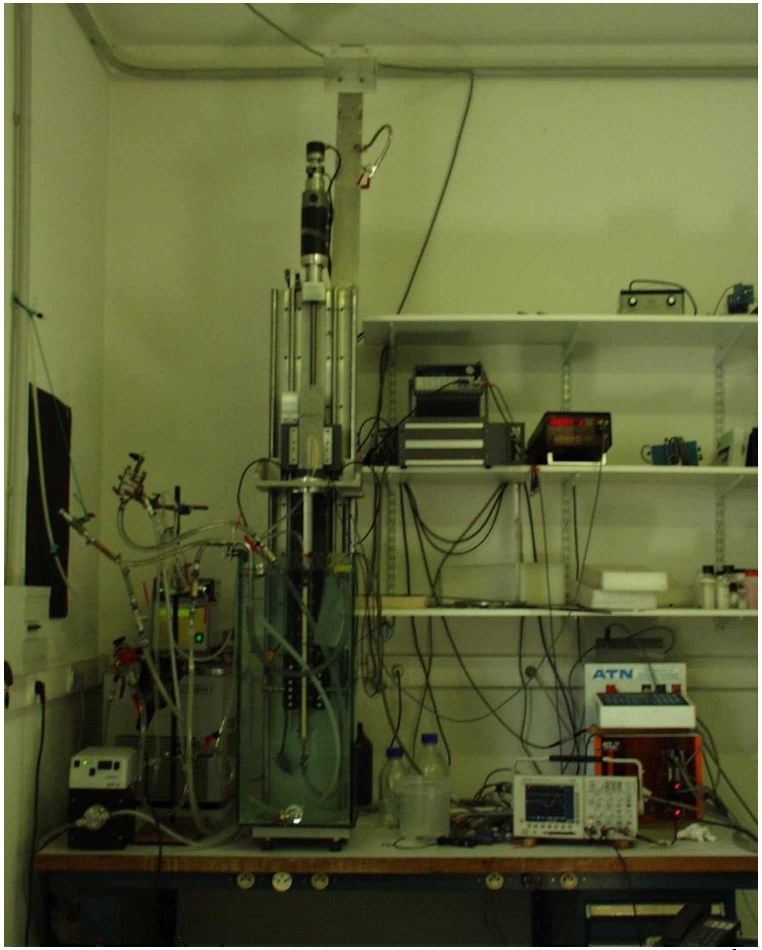
$$V^2 = K_{eff} / \rho_{eff}$$

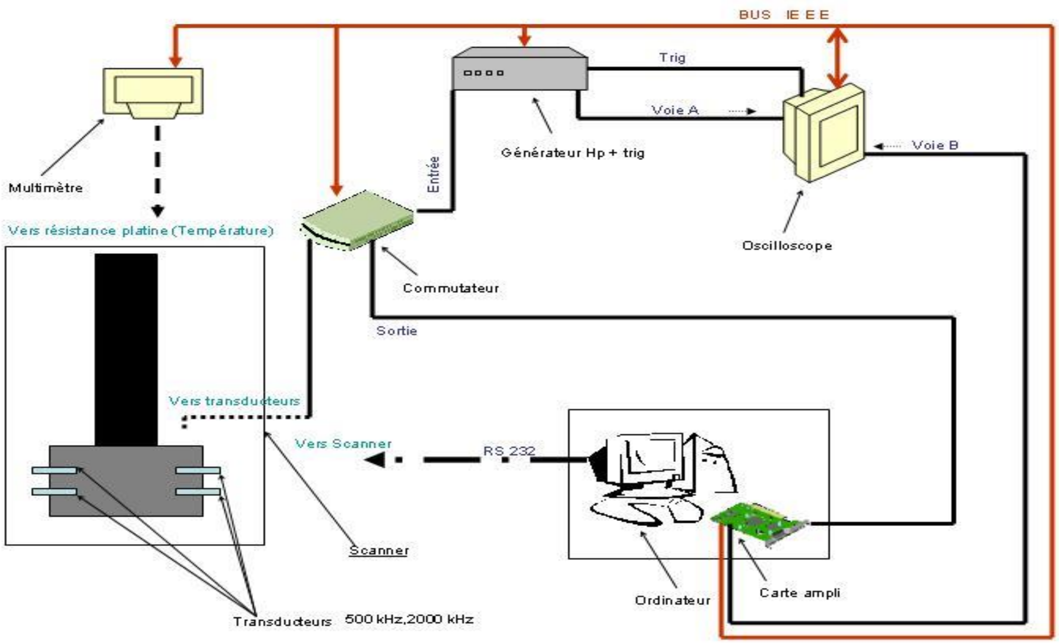
Dans les suspensions,

V dépend de la concentration en particules, **ϕ**

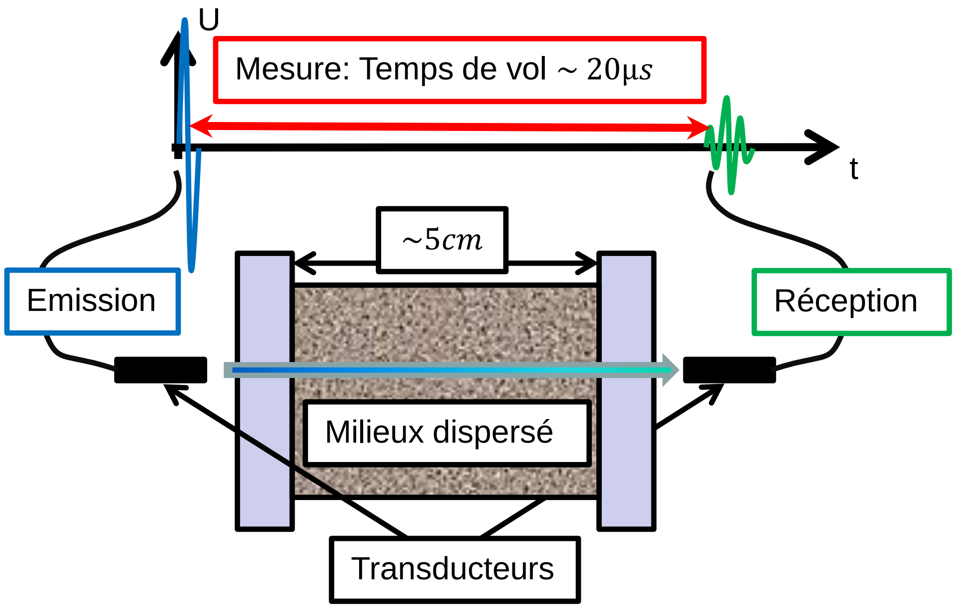
Dans les poreux saturés d'un mélange de fluides,
V dépend de la concentration du mélange, **C**.

Chaîne d'acquisition





Suivi de zéro



- Intervalomètre ou oscilloscope: mesure du premier zéro montant, après un délai de déclenchement .
  Ok à « basse fréquence »
  (pour $\Delta t_v < T$)

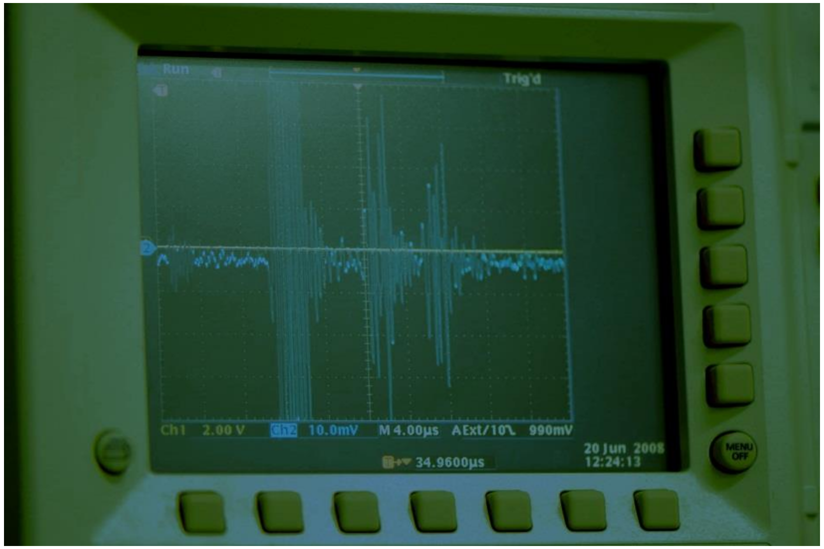
  Pb d'interférence aux fronts!

- Suivi du $n^{\text{ème}}$ zéro

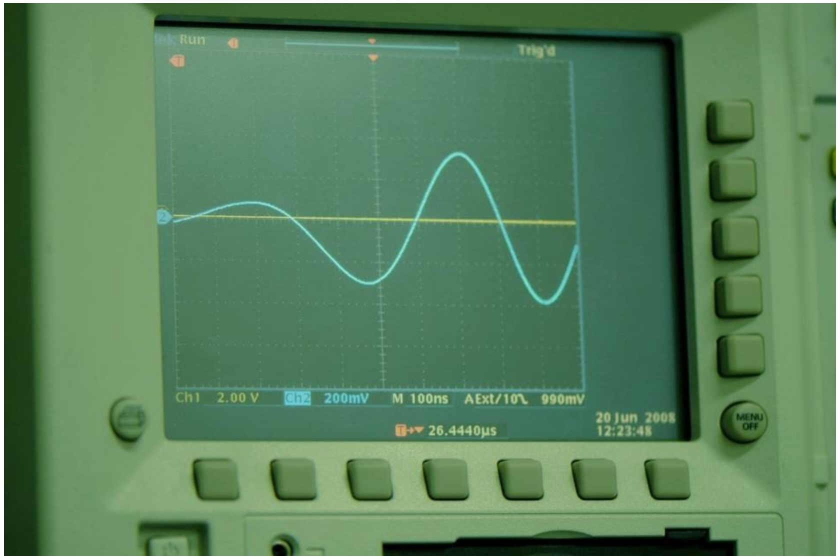
- Oscilloscope en deux temps:

Suivi de zéro en deux temps

Basse résolution temporelle
Haute résolution en amplitude

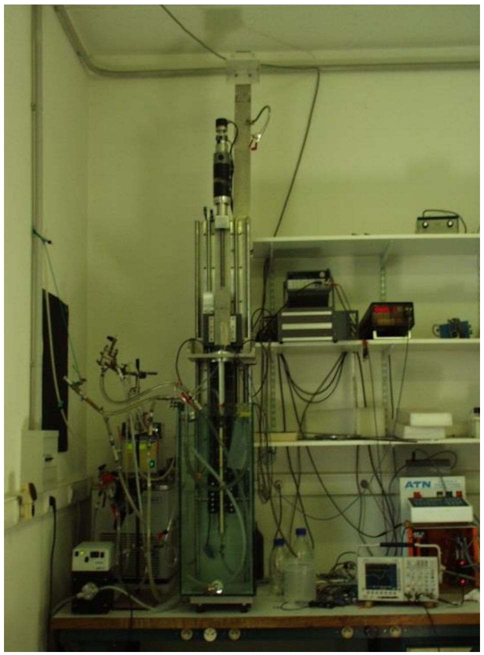


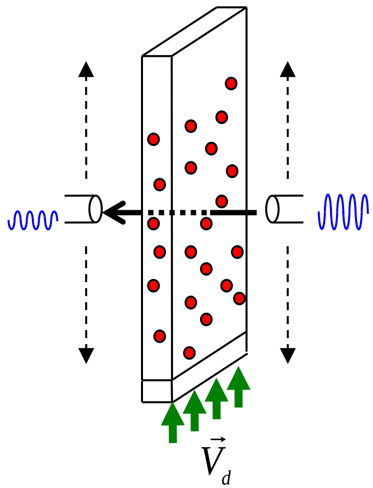
Haute résolution temporelle
Résolution adaptée en amplitude



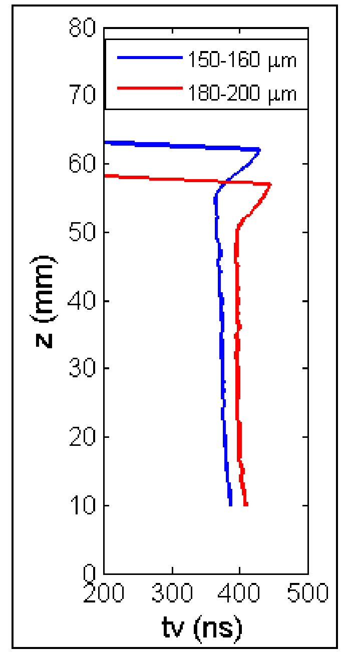
➡ •Temps de vol
• amplitude du signal

Etalonnage dans une suspension monodisperse fluidisée

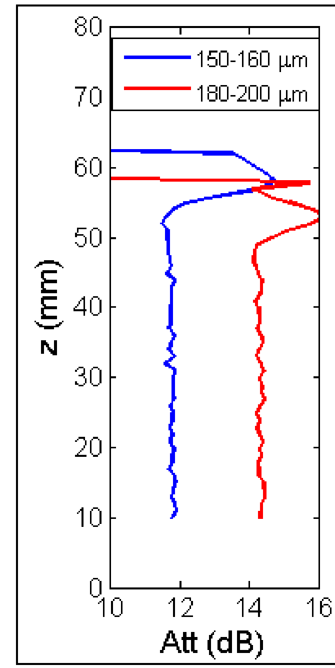




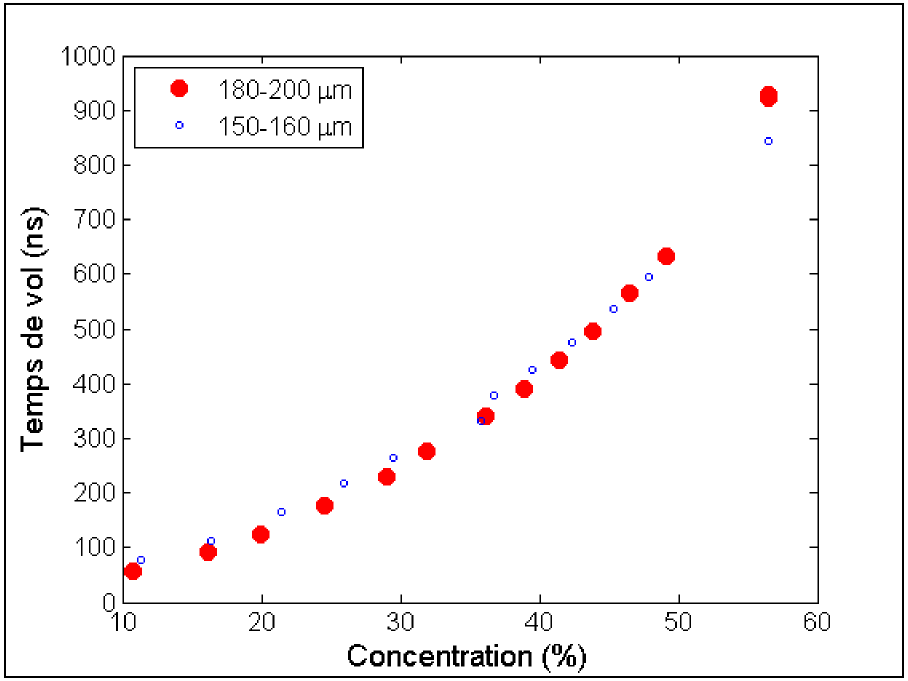
Temps de vol

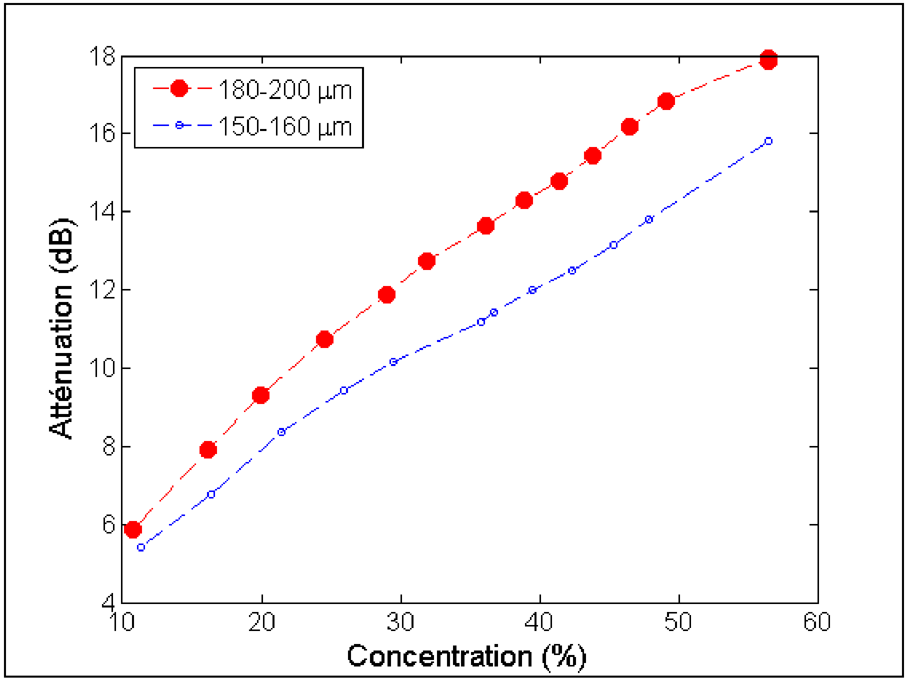


Atténuation



Vitesse et atténuation à λ proche de la taille des particules (f=3MHZ)





Temps de vol

↓

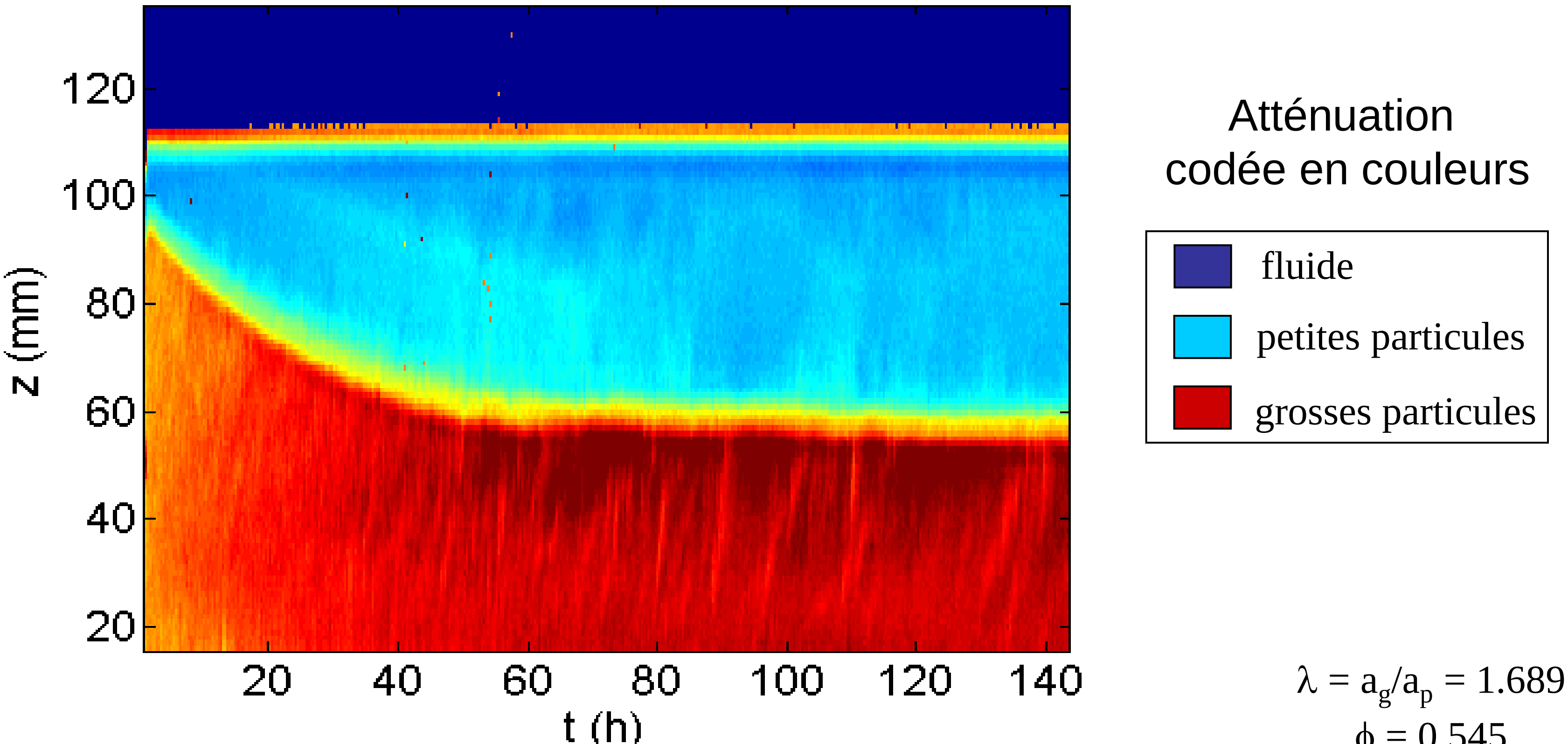
concentration

Atténuation

↓

Taille des particules

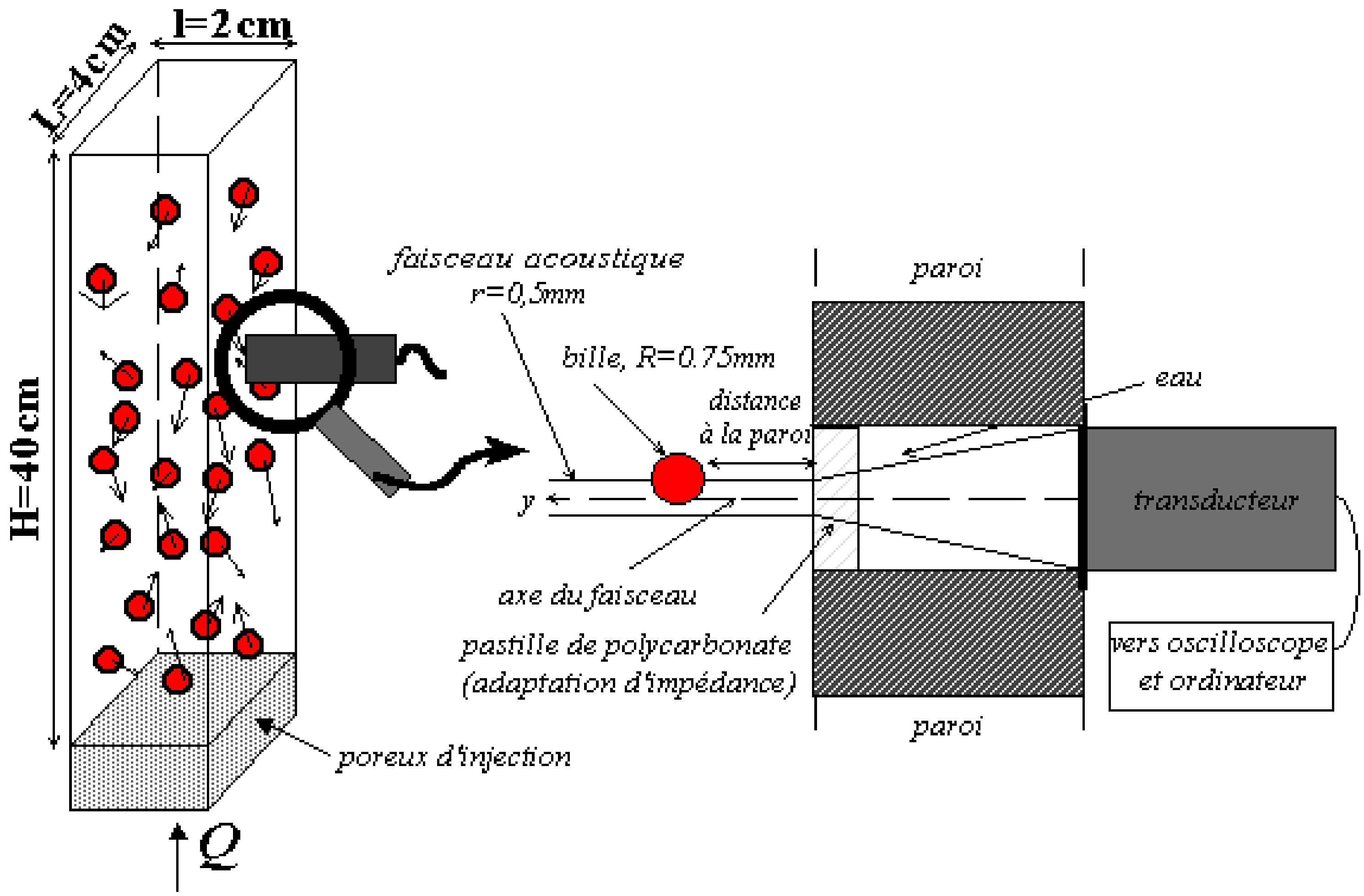
Mesure de la dynamique de ségrégation



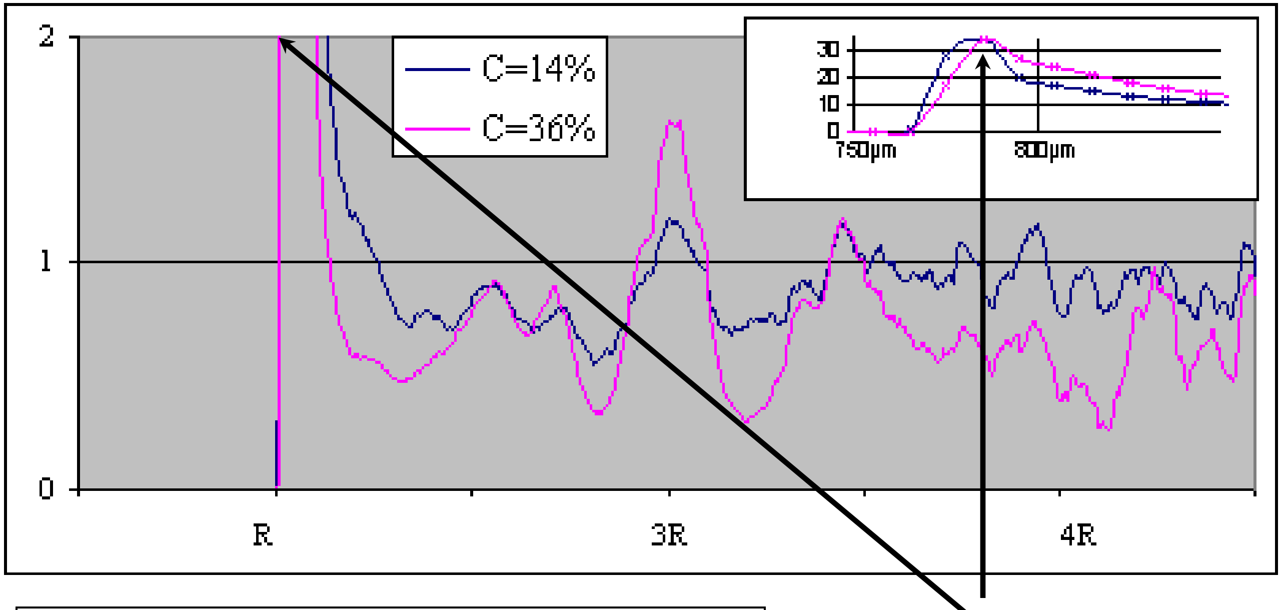
$\lambda = a_g/a_p = 1.689$

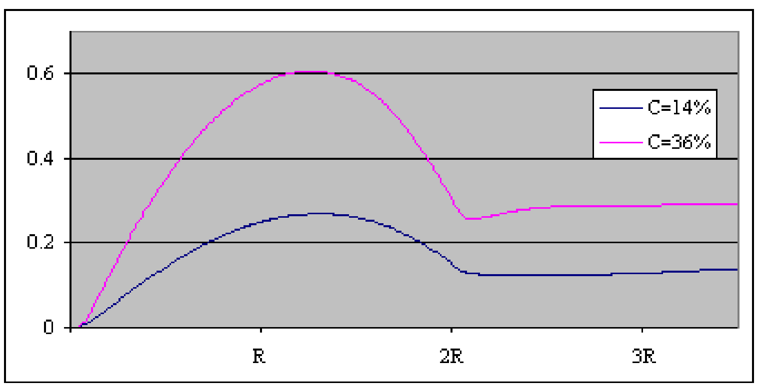
$\phi = 0.545$

Mesure de distance (f=10 MHZ): résolution >10μm



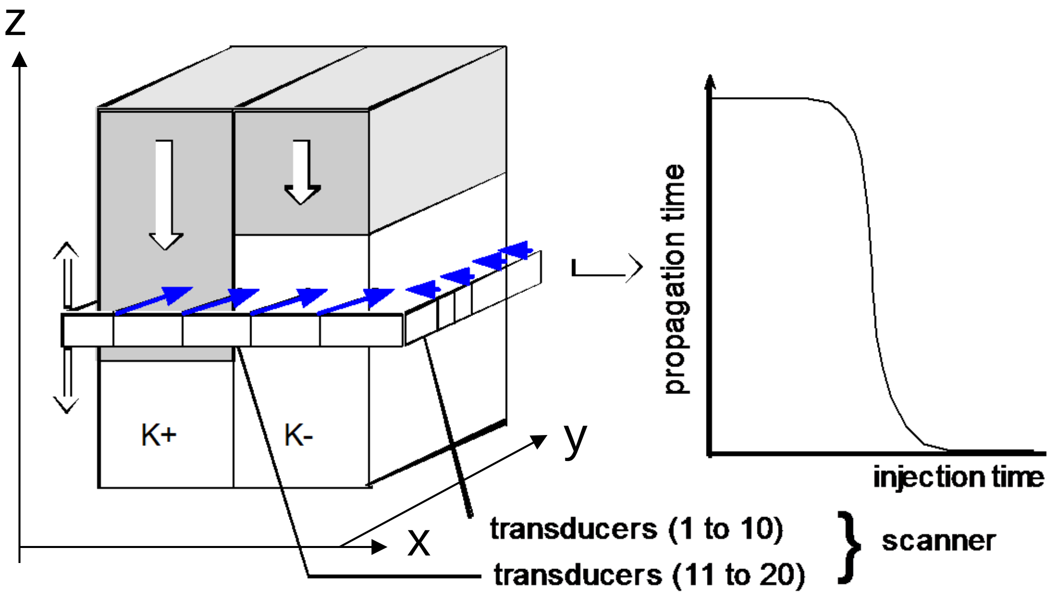
Statistique des échos = statistique de présence des billes





Monocouche de billes d'épaisseur ~30 µm située à ~(R+30) µm de la paroi. Probabilité 30 fois plus élevée que la probabilité moyenne, contre qlq unités pour une distribution de type " sphère dure ».

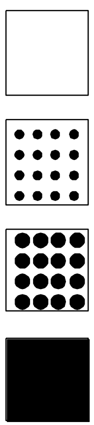
Mesures de la concentration de fluides s'écoulant dans un milieu poreux



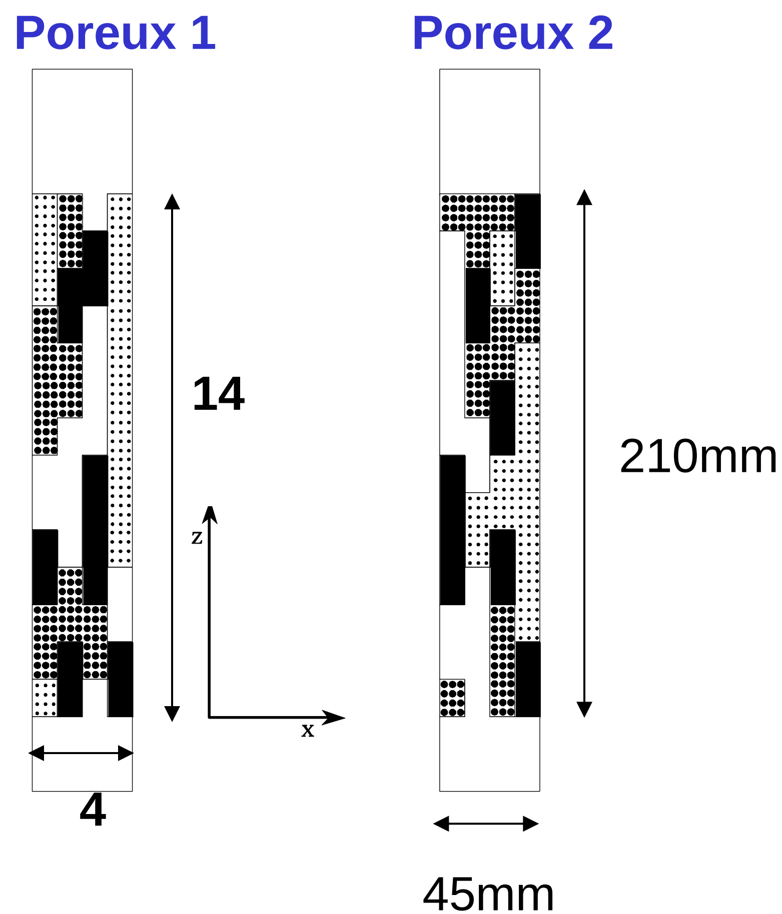
Résolution en concentration de fluides : $\Delta\Phi < 0.01$
Résolution spatiale : $\Delta x \times \Delta z \sim 2mm \times 1cm$
Résolution temporelle : $\Delta t \sim 2s$ / couche scannée (z_i)

Mesures de la concentration de fluides s’écoulant dans un milieu poreux

(KRETZ V., BEREST P., HULIN J.P., SALIN D. , Water. Resour. Res. **39** (2), 1032-1040 (2003).)



Diamètre (µm)	Darcy
250-300	80
200-250	55
150-200	30
125-150	20

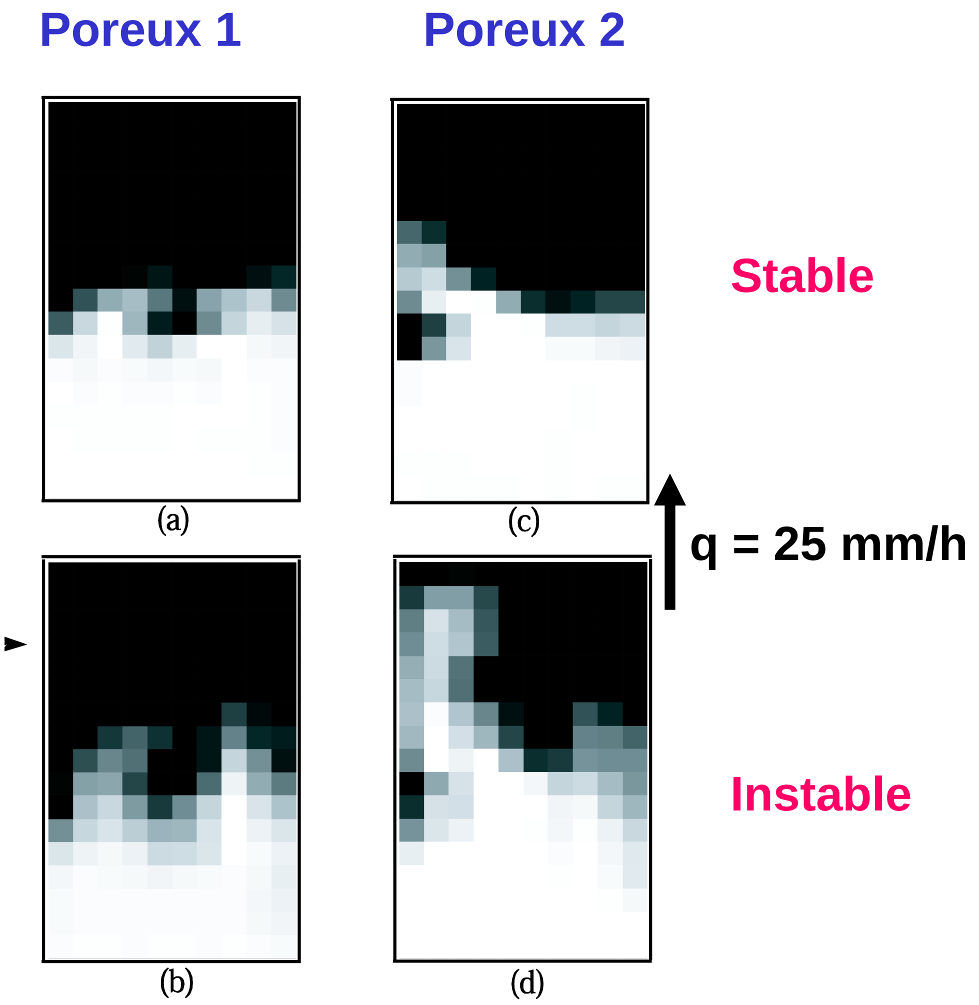


Mesures de la concentration de fluides s'écoulant dans un milieu poreux

Viscosité identique : $M = \mu_1/\mu_2 = 1$

Densités différentes: $\Delta\rho = 46$ kg /m³

fluide	μ (Pa.s)	ρ (kg/m3)	c_{fluid} (m/s)
38% sucre	5.3 10^{-3}	1166	2030
48% glycérine	5.4 10^{-3}	1120	2180

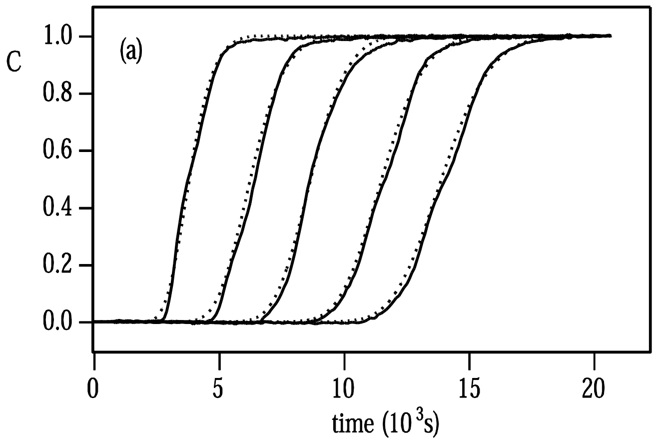


Mesures de la concentration de fluides s'écoulant dans un milieu poreux

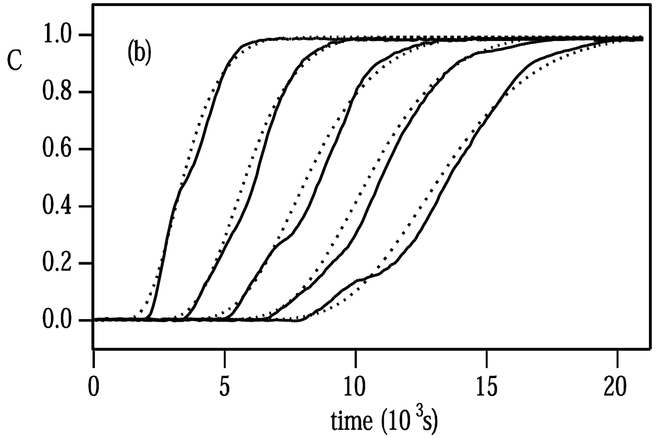
Etalement des fronts entre deux fluides miscibles

Poreux 1

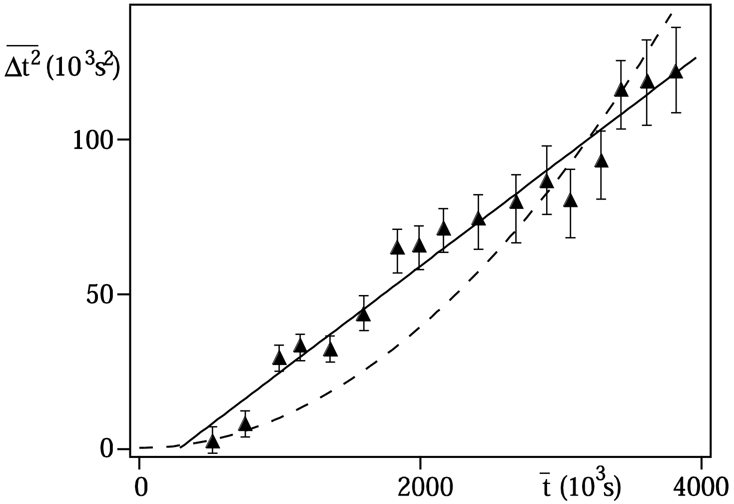
Stable



Instable



Convectif or dispersif ?



$\Rightarrow$ **dispersif**

(KRETZ V., BEREST P., HULIN J.P., SALIN D. , Water. Resour. Res. **39** (2), 1032-1040 (2003).)

Sources et compléments:

- Réflexion et réfraction cas général
- Approche tensorielle: cours Marc François
- Ultrasons : T.G. Leighton , Prog. in Biophys. and Molec. Biol.93 (2007) 3–83
- Vélocimétrie : Manneville et al Eur. Phys. J. Ap. 28,361 (2004)
- Acoustique en milieux poreux :
  - Biot, J. Acoust. Soc. Am. 28,168 (1956), Biot, J. Acoust. Soc. Am. 28,179(1956), Biot, "General Solutions of the Equations of Elasticity and Consolidation for a Porous Material" (1956), Biot, "Theory of Deformation of a Porous Viscoelastic Anisotropic Solidl" (1956)
  - Plona, "Observation of the Second Bulk Compressional Wave in a Porous Medium at Ultrasonic Frequencies" (1980),
  - Johnson et al, "Tortuosity and Acoustic Slow Waves" (1980),
  - Kretz et al, "An Experimental Study of the Effects of Density and Viscosity Contrastes on Macrodispersion in Porous Media" (2003),
- Supports pédagogiques animés: http://www.phy.ntnu.edu.tw/