



# Etude expérimentale de la dispersion en fréquence des modules élastiques de carbonates saturés

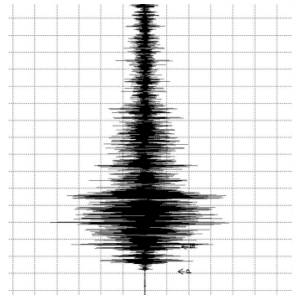
**Jan Borgomano**

UMR8538 Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure de Paris  
PSL Research University

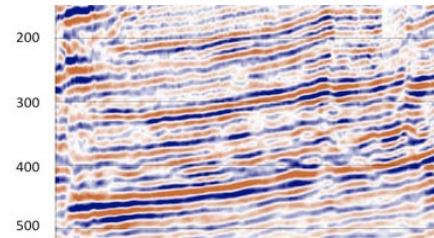
Dirigée par  
Yves Guéguen et Jérôme Fortin

# Motivation

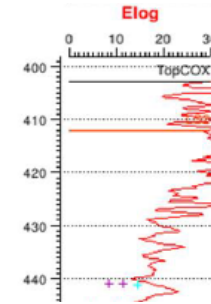
Ondes élastiques, un fossé entre le **terrain** et le **laboratoire**



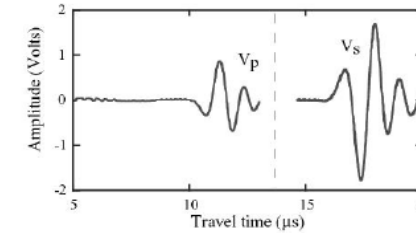
Sismologie



Sismique de surface

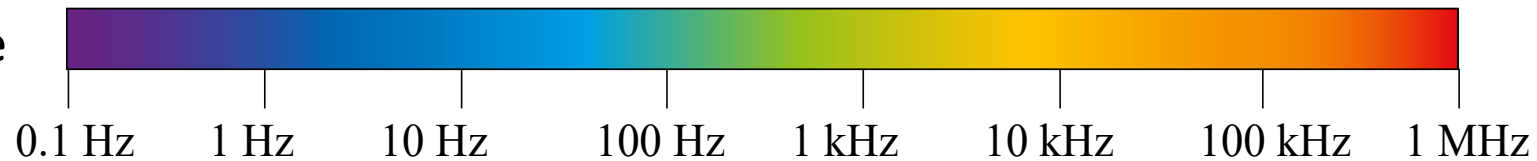


Diagraphies de puits



Laboratoire "classique" (ultrasons)

Fréquence



❑ Entre les mesures de terrain et de laboratoire "classique" (ultrasons), la **fréquence des ondes varie de plusieurs ordres de magnitudes**

❑ Dans les roches saturées, le fluide de pore peut induire **une dépendance en fréquence des modules dynamiques**

**= Dispersion**

# Pourquoi de la dispersion ?

En saturation complète, différents régimes d'écoulements



**Drainé**

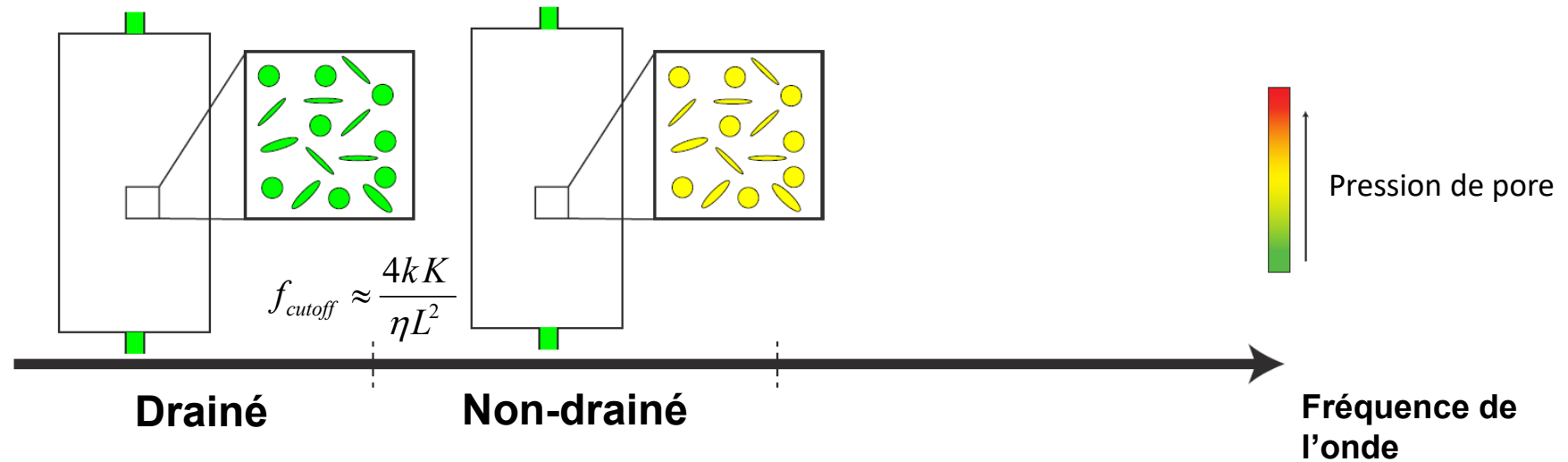
**Fréquence de l'onde**

Très basse fréquence : **régime drainé**

→  $P_p$  (pression de pore) constant et non-affectée par le passage de l'onde

# Pourquoi de la dispersion ?

En saturation complète, différents régimes d'écoulements



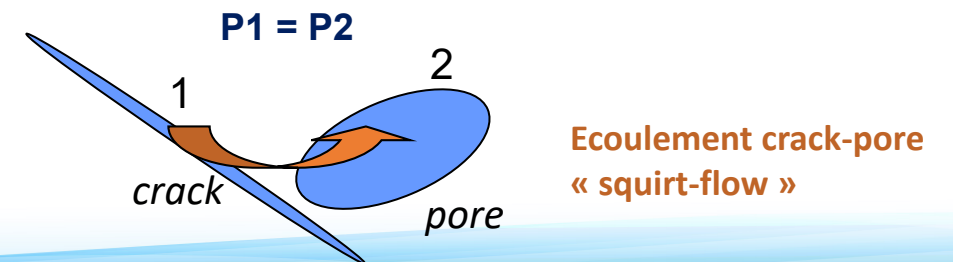
Très basse fréquence : régime drainé

→  $P_p$  (pression de pore) constant et non-affectée par le passage de l'onde

Fréquence intermédiaire : régime non-drainé

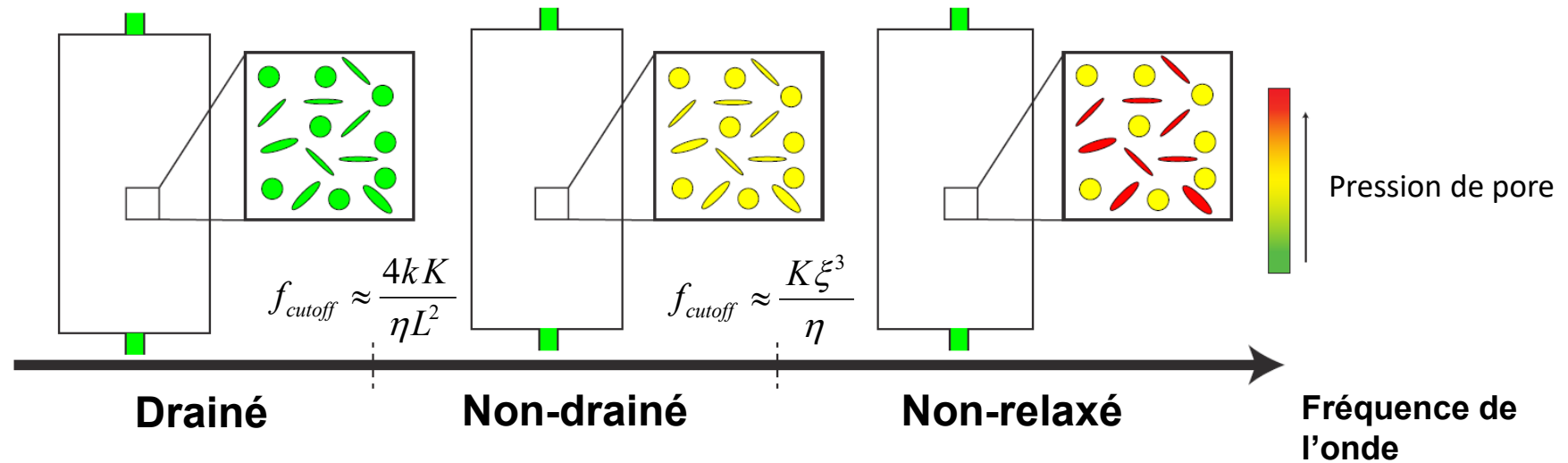
→  $P_p$  localement uniforme, mais varie au passage de l'onde

→ Cadre de la **poroélasticité**



# Pourquoi de la dispersion ?

En saturation complète, différents régimes d'écoulements



Très basse fréquence : **régime drainé**

→  $P_p$  (pression de pore) constant et non-affectée par le passage de l'onde

Fréquence intermédiaire : **régime non-drainé**

→  $P_p$  localement uniforme, mais varie au passage de l'onde

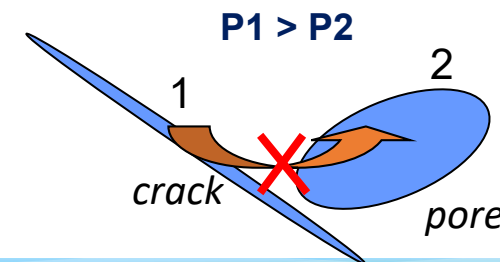
→ Cadre de la **poroélasticité** (e.g. **Biot-Gassmann**)

Haute fréquence: **régime non-relaxé**

→ Chaque pore est comme isolée (au regard du fluide)

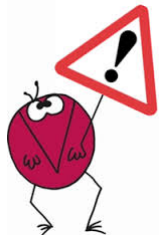
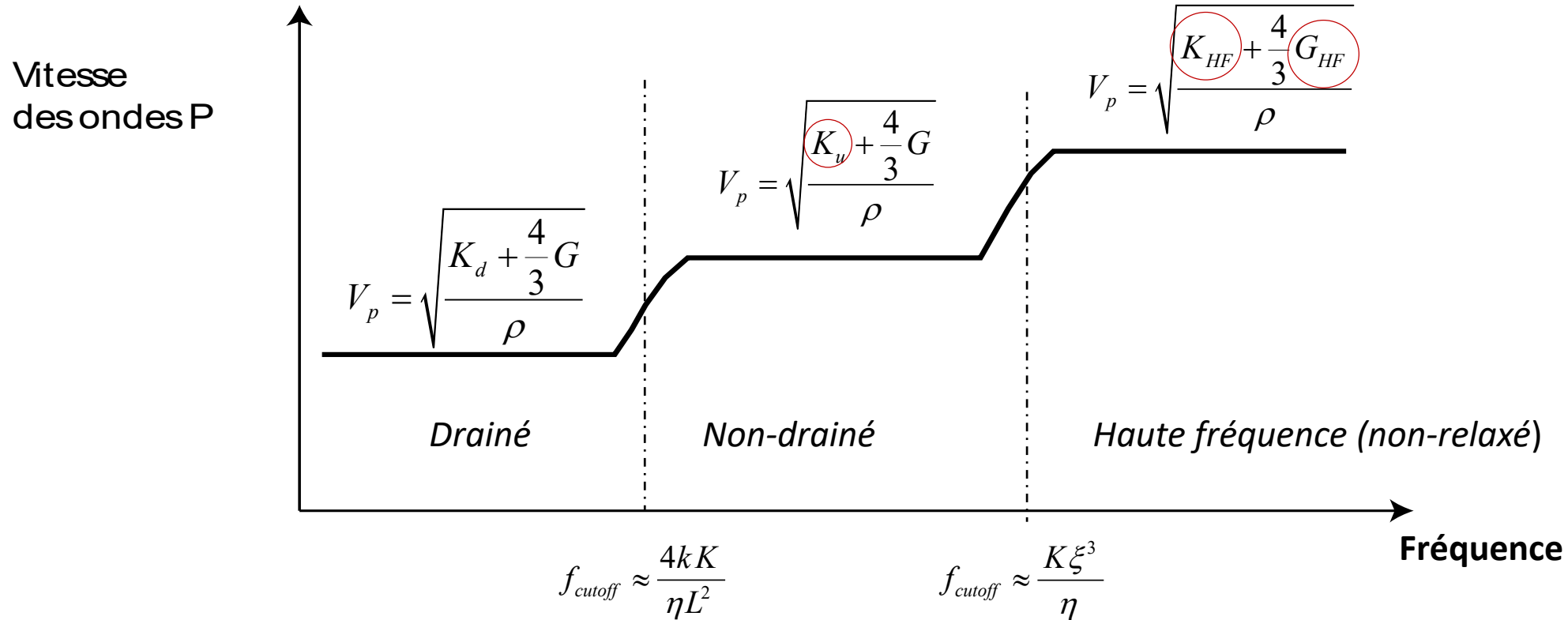
→ Incompatible avec la poroelasticité

→ Cadre des **theories des milieux effectifs**



**Ecoulement crack-pore**  
**« squirt-flow »**

# Pourquoi de la dispersion ?



D'autres mécanismes peuvent induire de la dispersion /atténuation (exclus de l'étude)

- Diffusion d'onde - "scattering"
- Effets de saturations partielles
- Effets inertiels prévus par la théorie de Biot 1956 (régime très haute fréquence dans les roches)

$$f_b = \frac{\eta\phi}{2\pi\rho_f k} \gg 1 \text{ MHz}$$

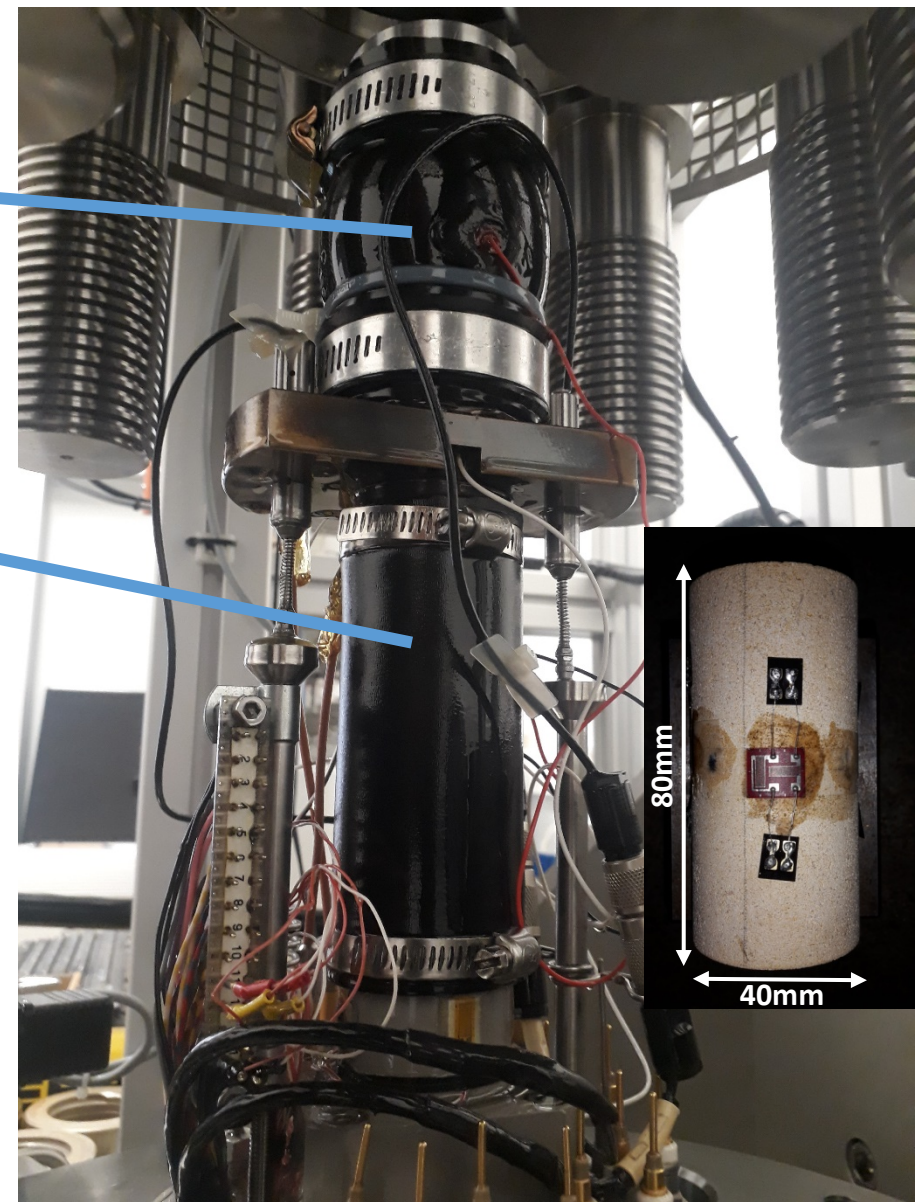


# Méthode expérimentale



OSCILLATEUR  
PIEZOELECTRIQUE

ECHANTILLON

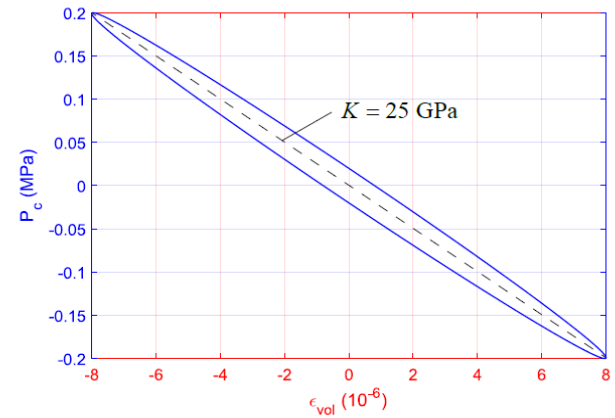
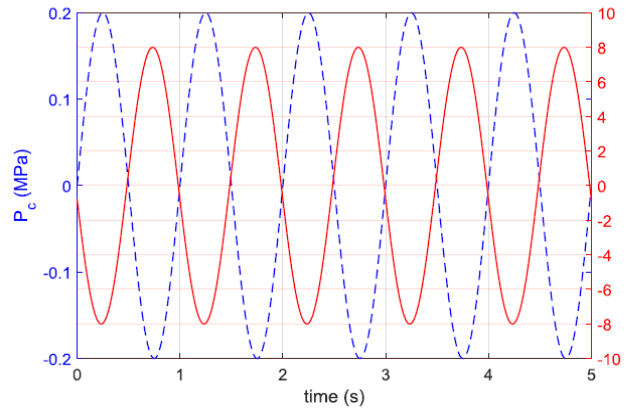


- ❑ Technique des **oscillations forcées** – Basses fréquences
  - **Axiales** = Young ( $E$ ) et Poisson ( $\nu$ ),  $f = [0,01-100]$  Hz
  - **Hydrostatiques** = Module incompressibilité ( $K$ ),  $f = [0,001-1]$  Hz
- ❑ Mesures **ultrasoniques** – Haute fréquence (1 MHz)
- ❑ Sous **pression effective (0-30 MPa)**, avec différents **fluides saturants**

# Méthode expérimentale

Module d'incompressibilité

$$K = -\frac{\Delta P_c}{\epsilon_{vol}}$$



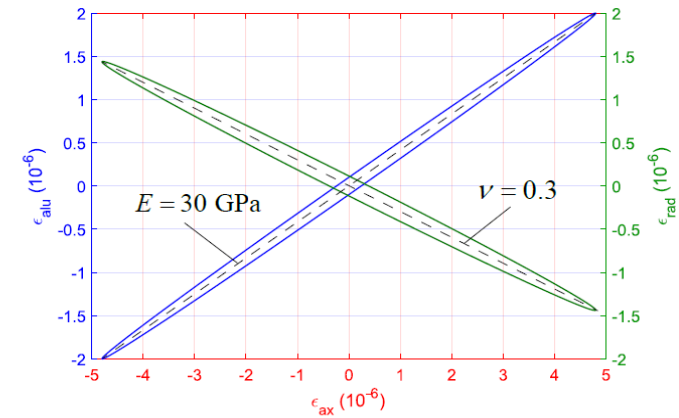
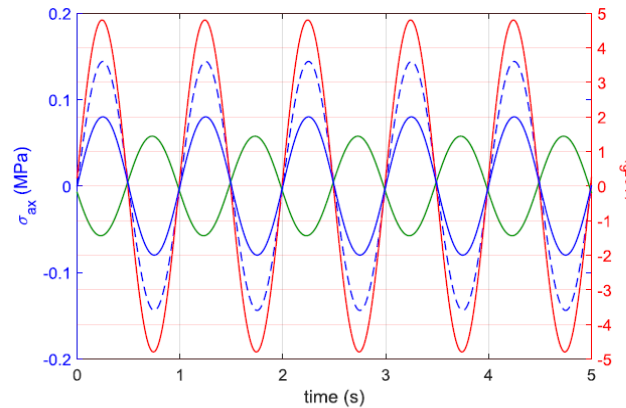
## Oscillations hydrostatiques

Module de Young


$$E = \frac{\Delta \sigma_{ax}}{\epsilon_{ax}}$$

Coefficient de Poisson

$$\nu = -\frac{\epsilon_{rad}}{\epsilon_{ax}}$$

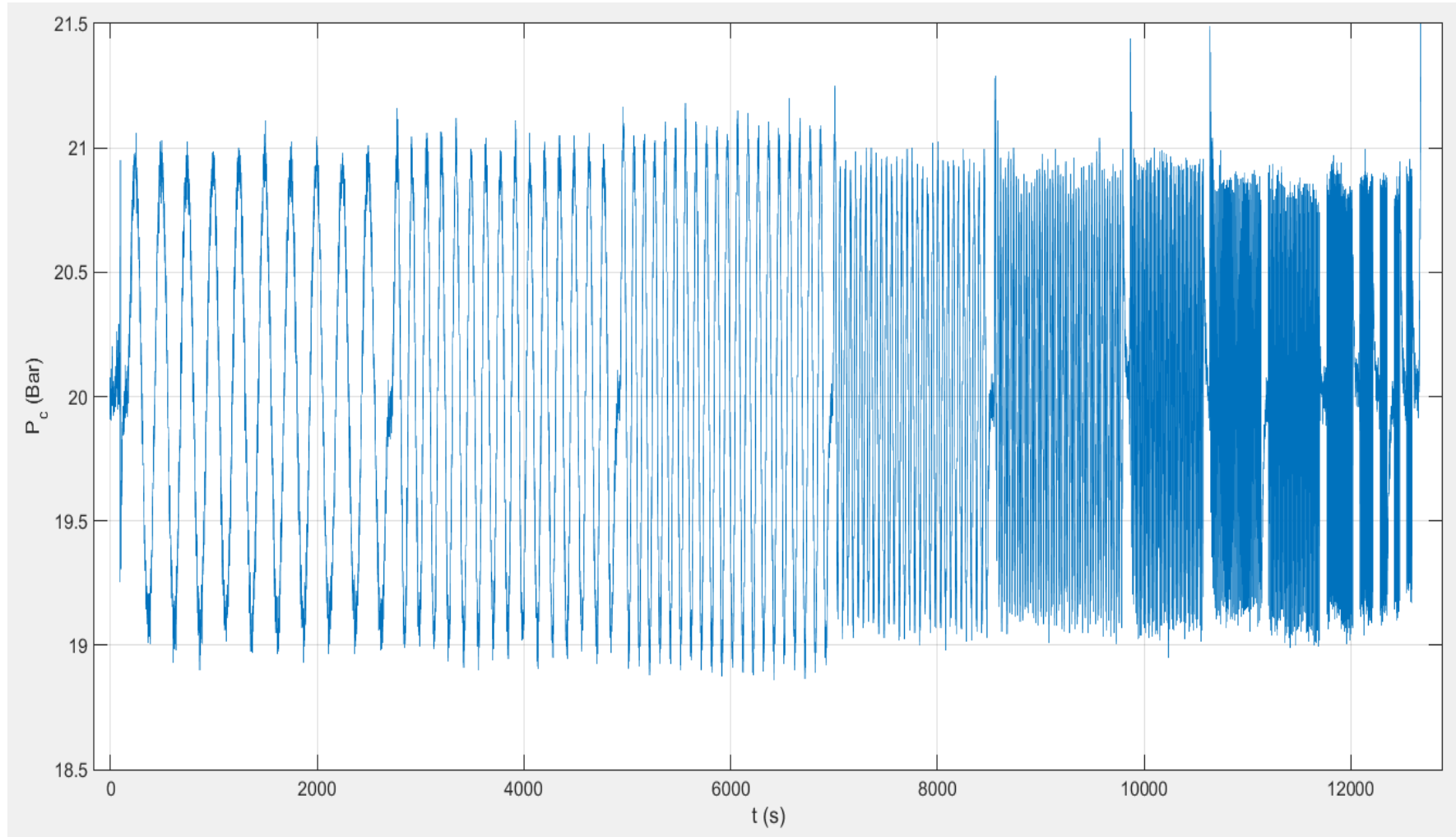


## Oscillations axiales

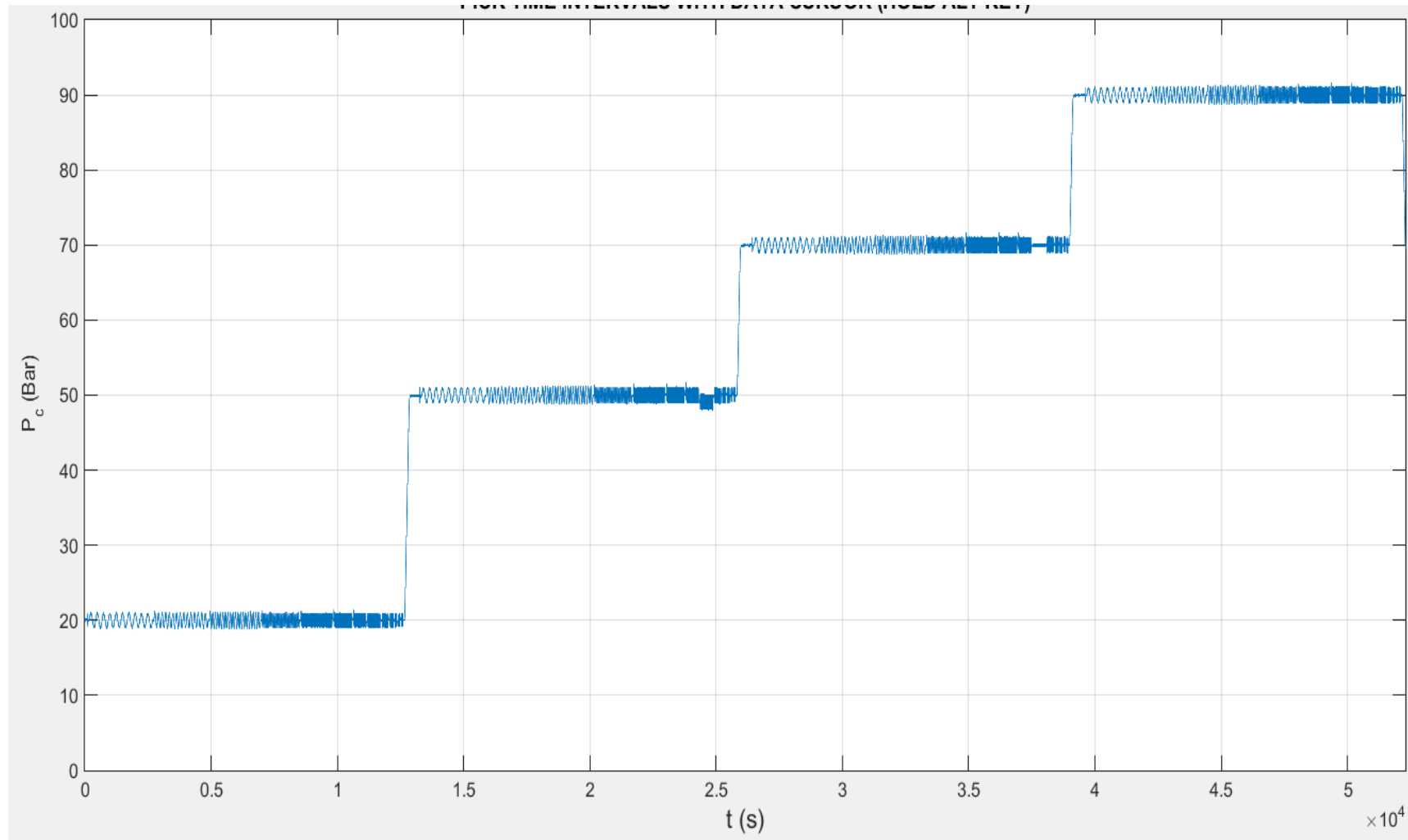
 Les déformations doivent être de l'ordre de  $10^{-6}$  (déformation purement élastique)



# Méthode expérimentale



# Méthode expérimentale



# Méthode expérimentale

Dispersion d'un module liée à une dissipation énergétique (mécanisme viscoélastique)

Dispersion d'un module  $\longrightarrow$  Atténuation

$$\sigma = M \varepsilon$$

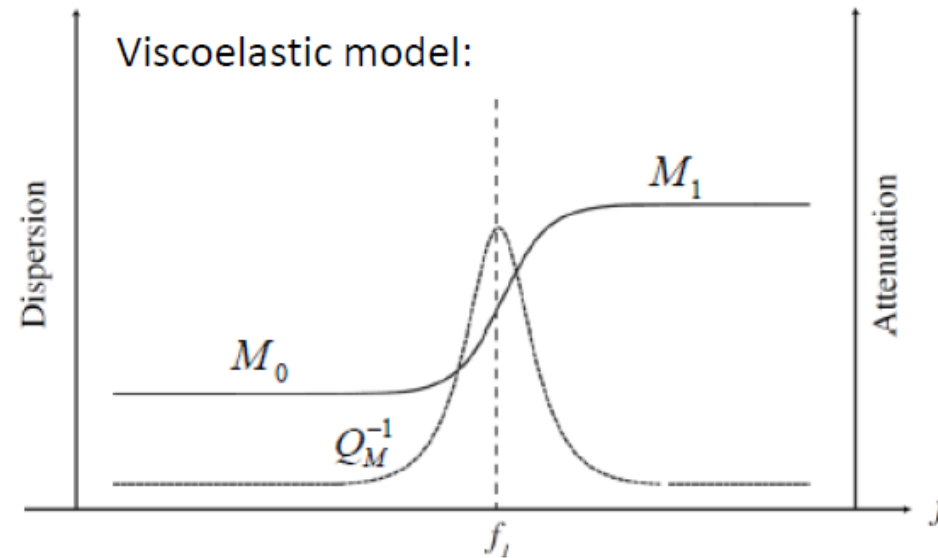
$$M(\omega)$$

$$Q_M^{-1}$$

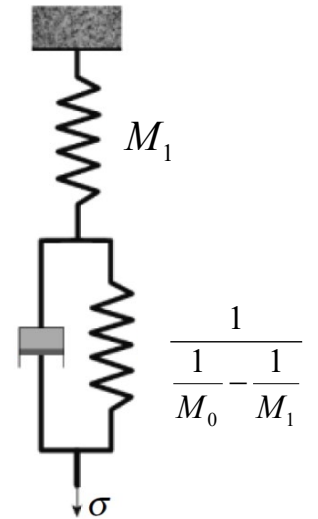
$Q$  : facteur de qualité

« Atténuation »

$$Q_M^{-1} = \frac{\text{Im}(M)}{\text{Re}(M)} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E} = \tan(\varphi_\sigma - \varphi_\varepsilon)$$



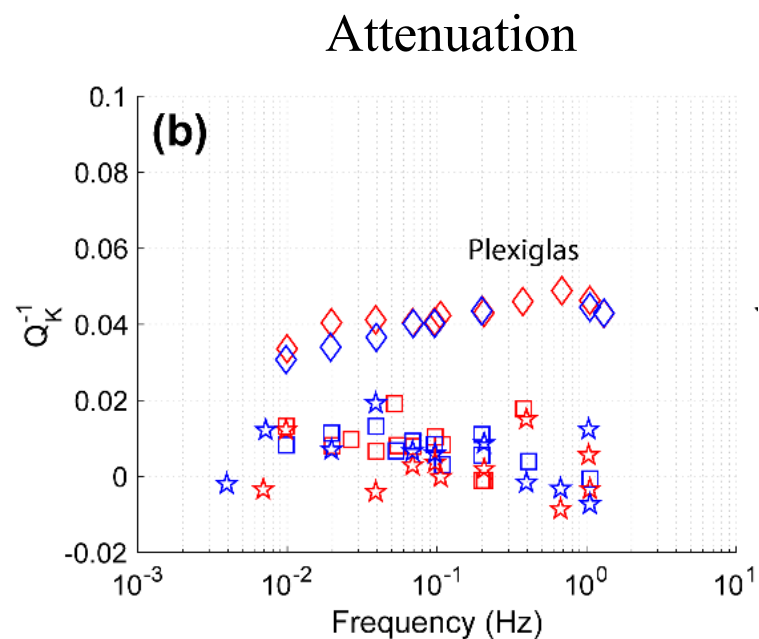
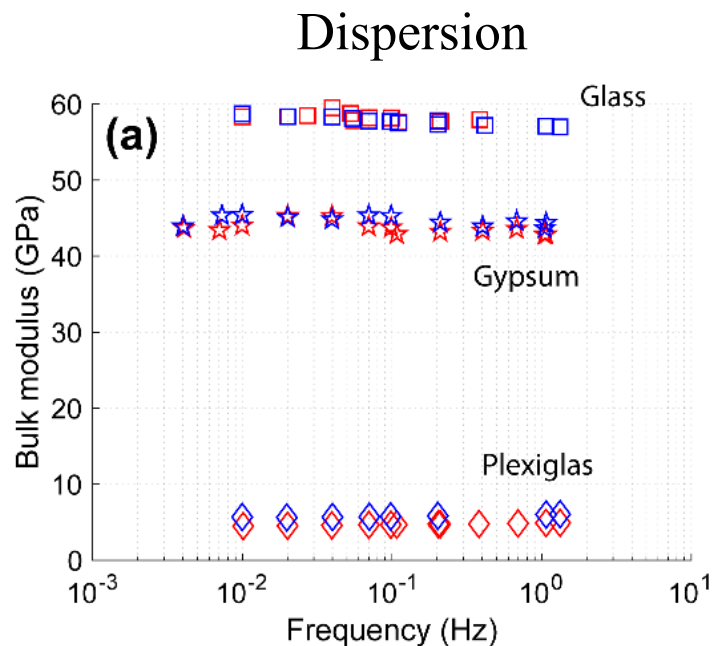
Modèle de Zener



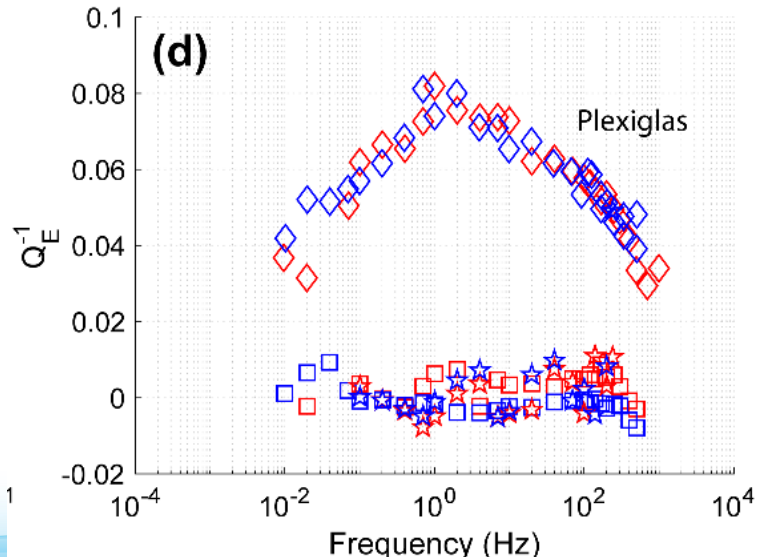
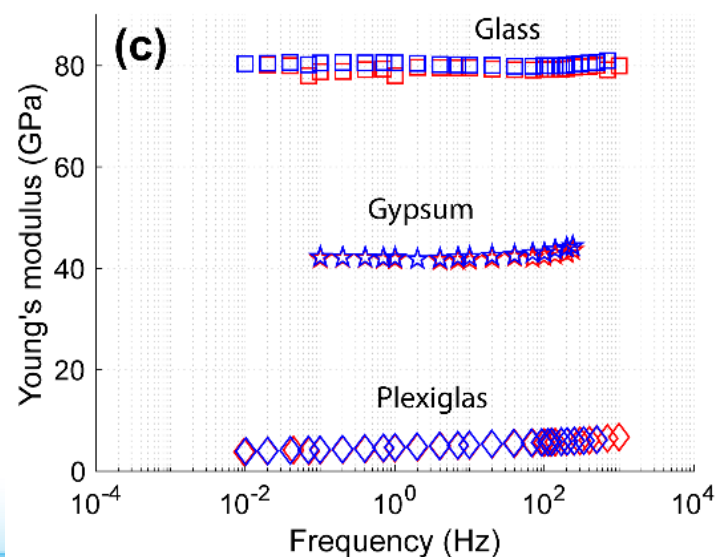
# Méthode expérimentale

## Calibrations

Oscillations  
hydrostatiques



Oscillations  
axiales

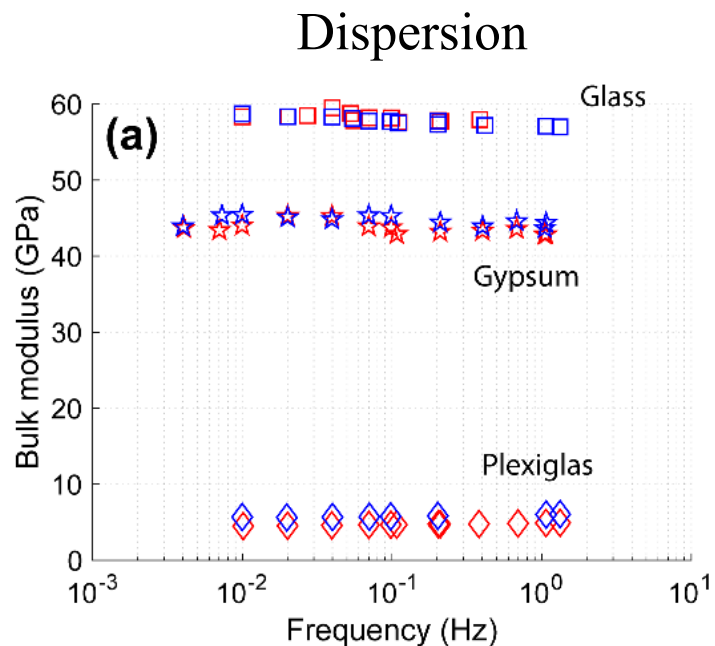


- ◇ Plexiglas  $P_c = 5$  MPa
- ◇ Plexiglas  $P_c = 30$  MPa
- Glass  $P_c = 5$  MPa
- Glass  $P_c = 30$  MPa
- ☆ Gypsum  $P_c = 5$  MPa
- ☆ Gypsum  $P_c = 30$  MPa

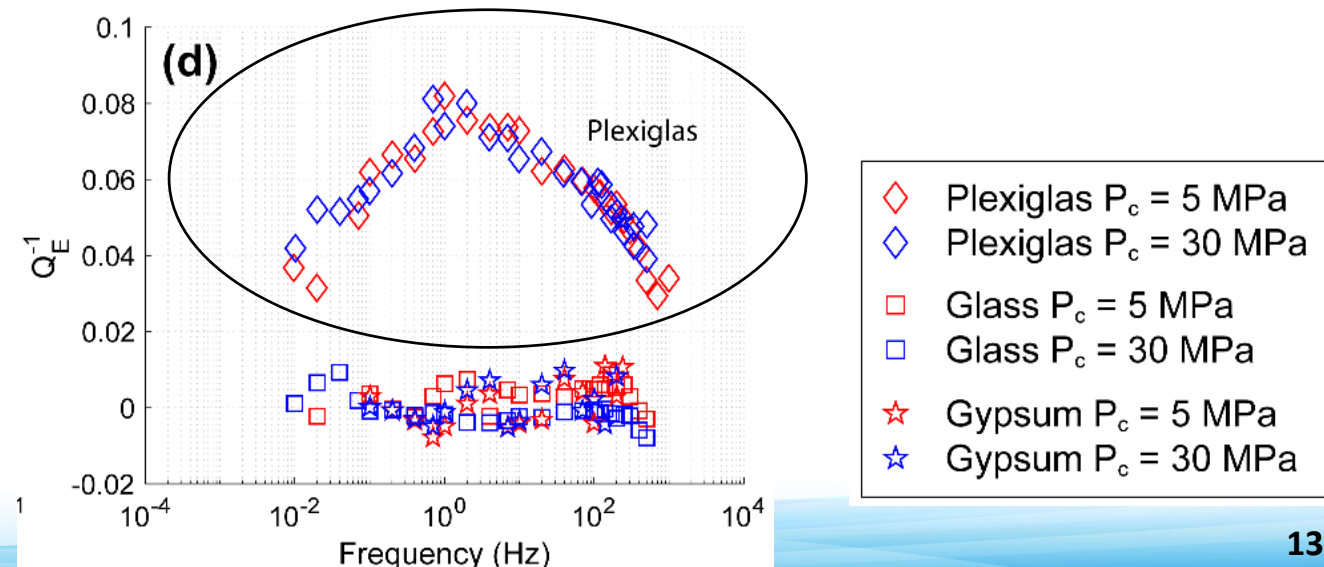
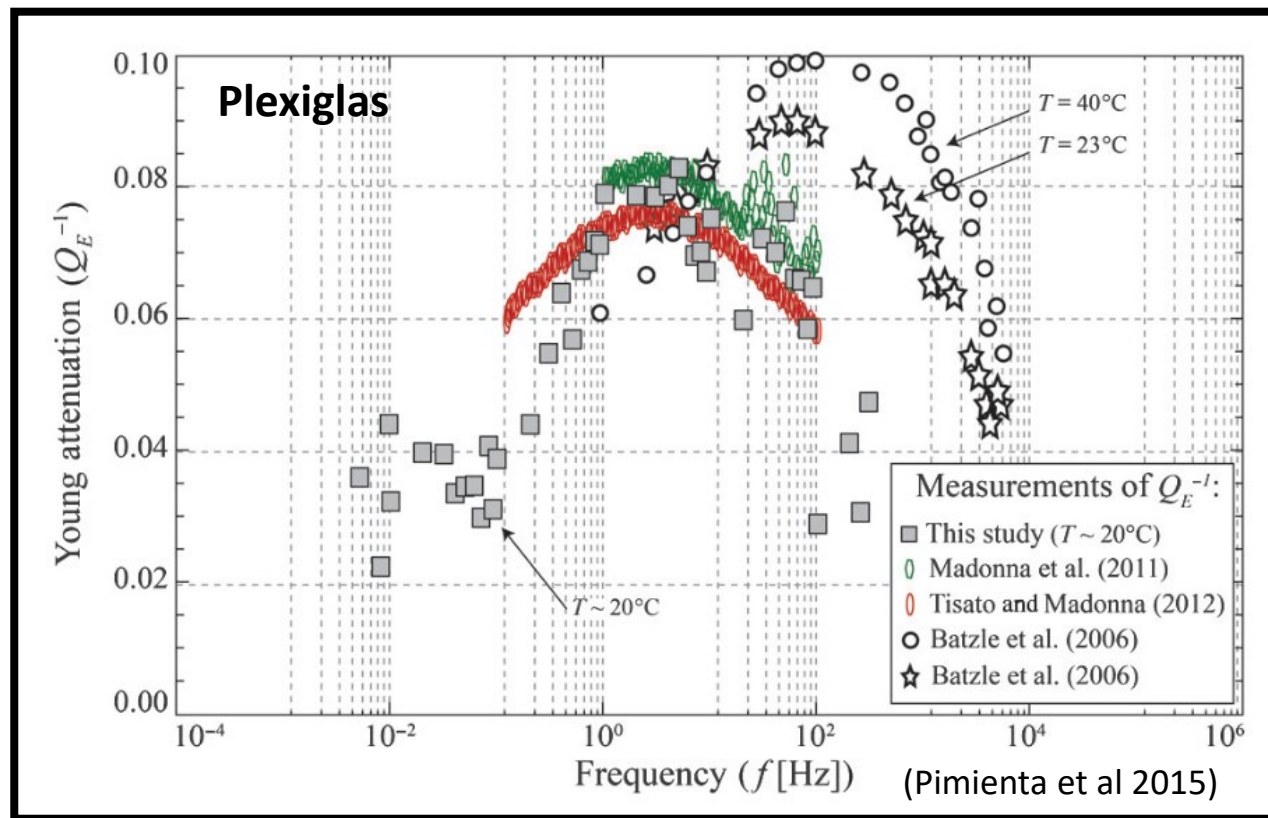
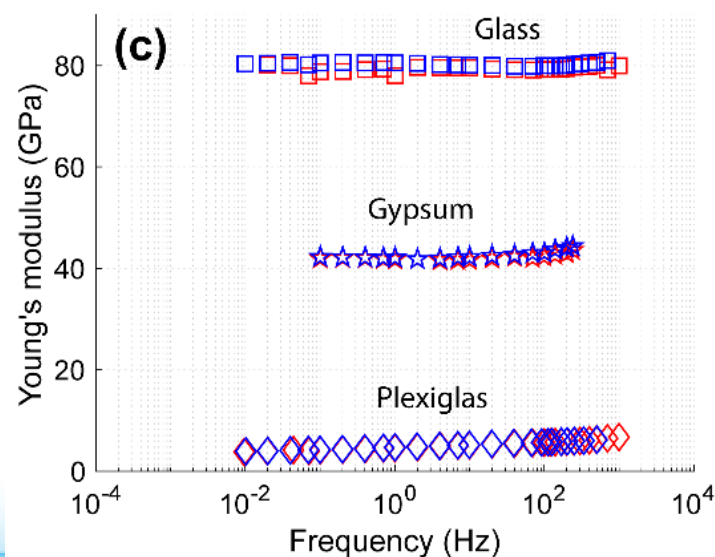
# Méthode expérimentale

## Calibrations

Oscillations  
hydrostatiques



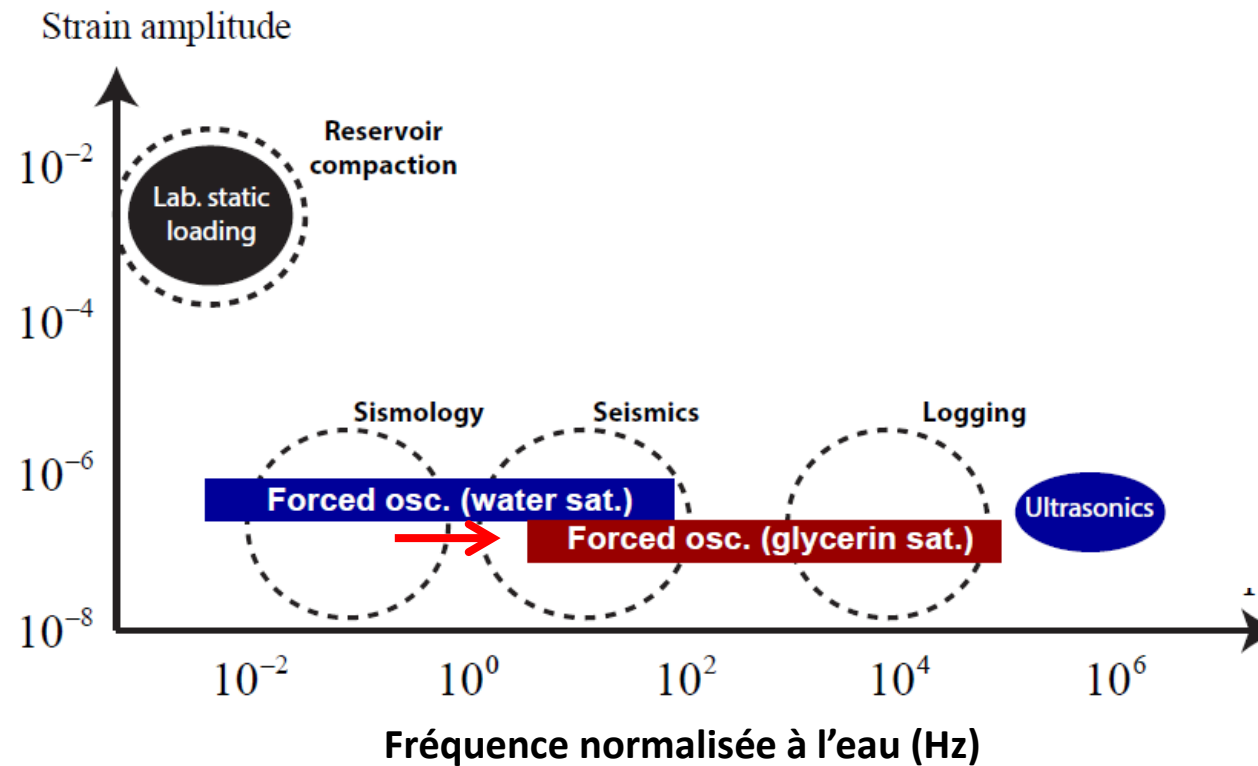
Oscillations  
axiales



# Méthode expérimentale

Pour les roche saturées : Fréquences de coupures en  $1/\eta$  (équivalence viscosité - temps)

Saturations : Sec, **Glycérine**, Eau



At 20°C:  $\eta_{glycerin} = 1000 \times \eta_{water}$

$$f^* = f \times \frac{\eta_{fluid}}{\eta_{water}}$$

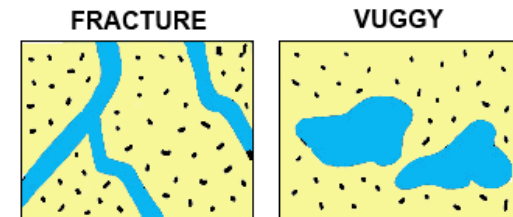
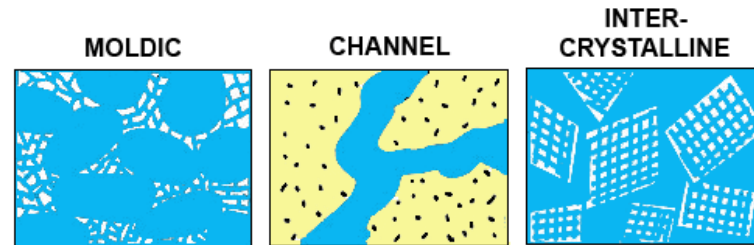
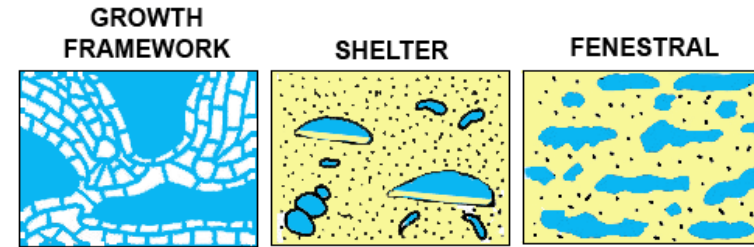
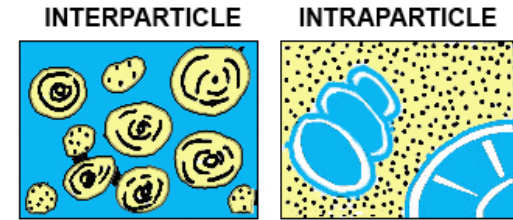
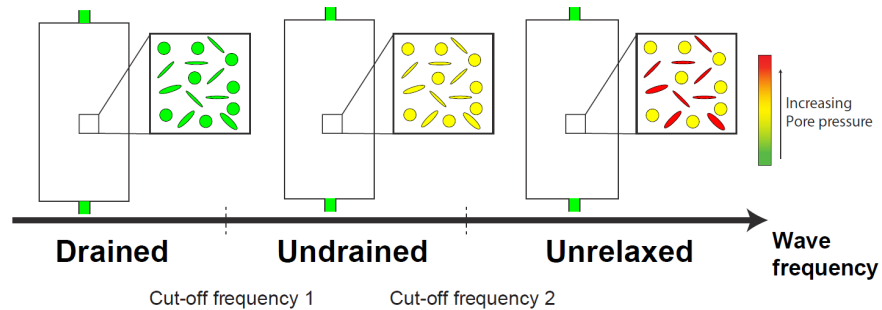


# Carbonates

Microstructures complexes et hétérogènes



Effet de fréquence lié au fluide ?



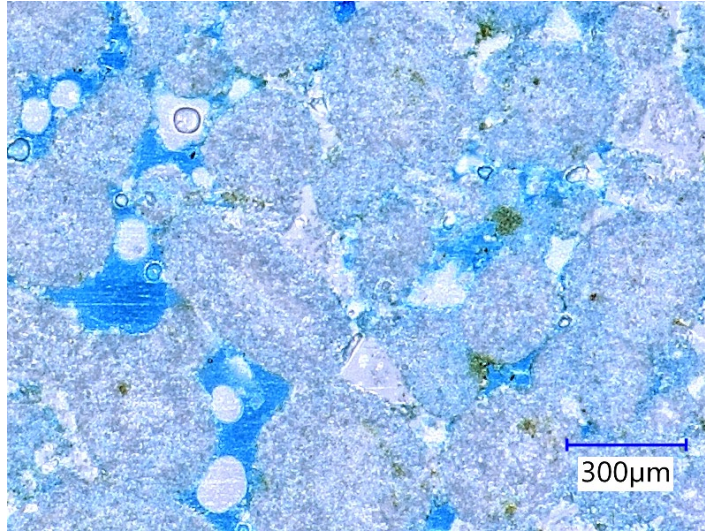
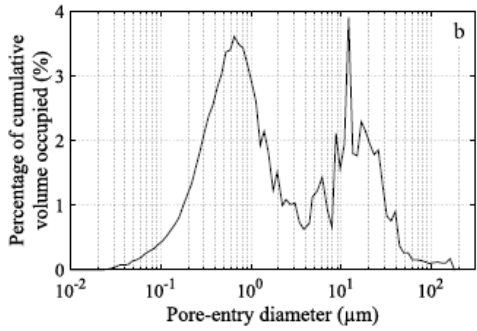
Choquette & Pray 1979



# Carbonates

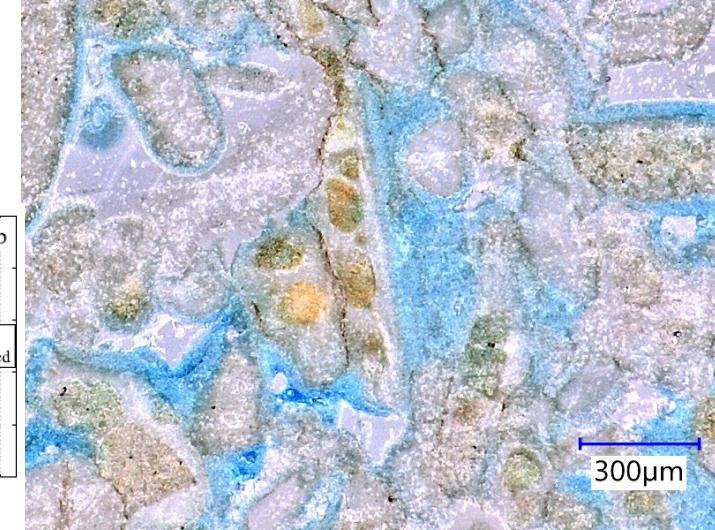
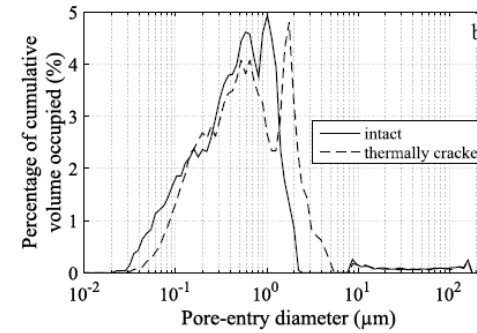
## Calcaire oolitique de Lavoux

$\Phi = 23.0\%$   
 $k = 10 \text{ mD}$



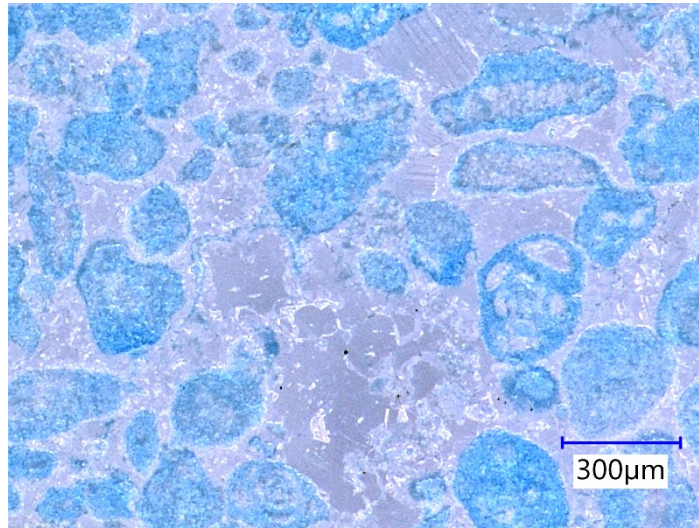
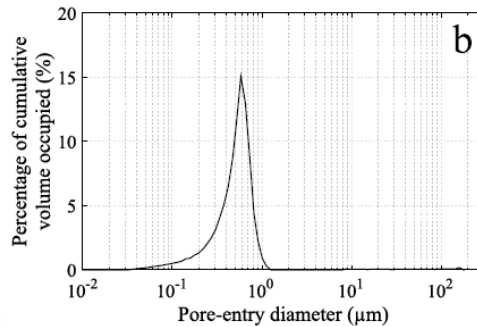
## Calcaire bioclastique de Indiana

$\Phi = 11.4\%$   
 $k = 0.02 \text{ mD}$



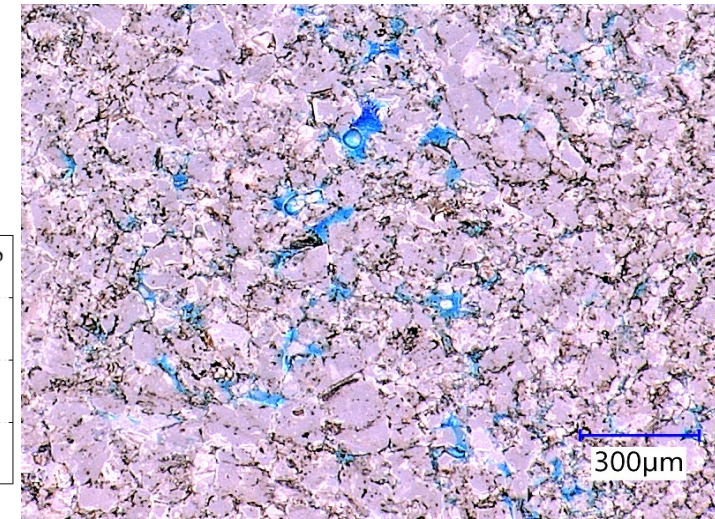
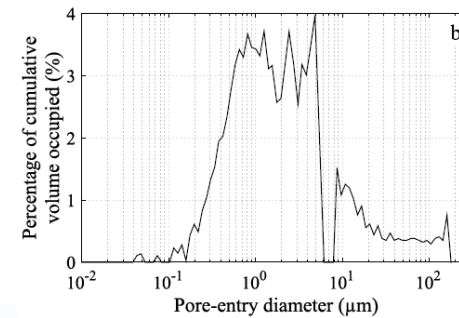
## Calcaire à rudistes de Rustrel (Urgonien de Provence)

$\Phi = 14.9\%$   
 $k = 0.04 \text{ mD}$



## Coquina « pré-sel », offshore Congo, 4100m.

$\Phi = 7.5\%$   
 $k = 0.05 \text{ mD}$



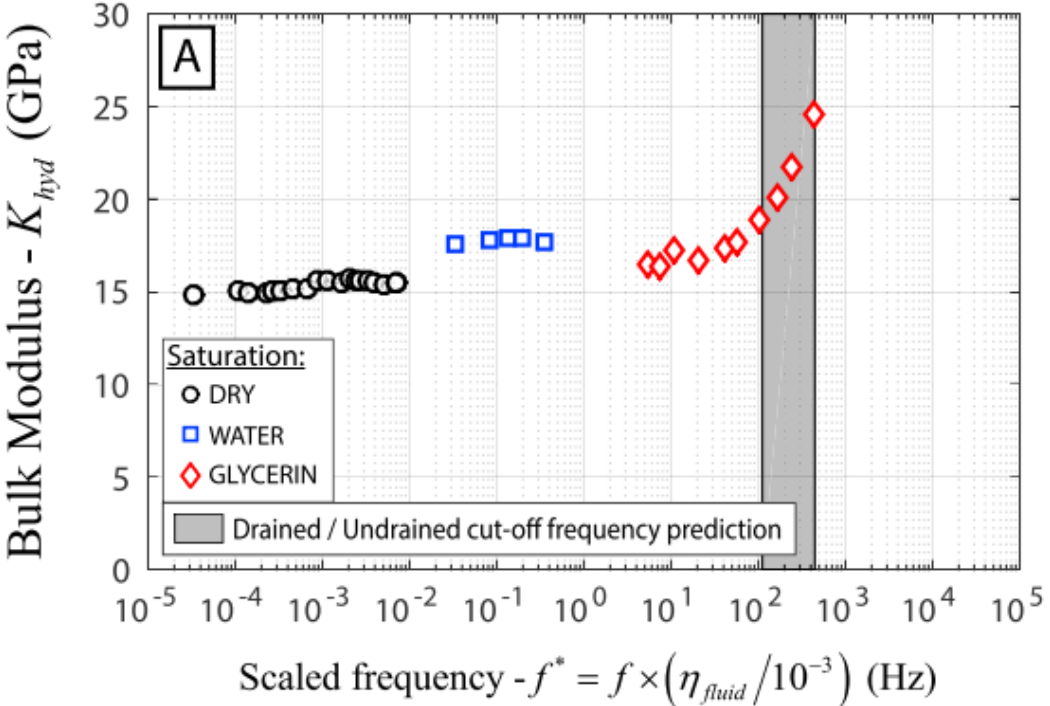


# Résultats expérimentaux

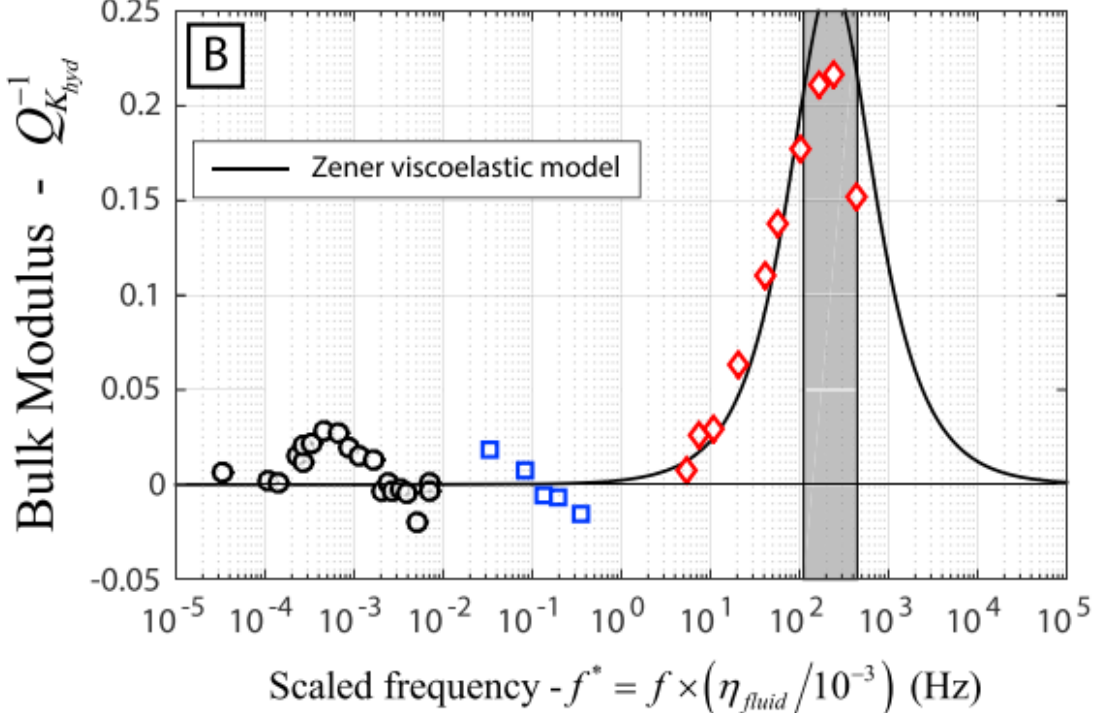
Calcaire oolitique de Lavoux

Oscillations hydrostatiques –  $P_{eff} = 2,5 \text{ MPa}$

Dispersion



Attenuation



$$f_{cutoff} \approx \frac{4kK}{\eta L^2}$$

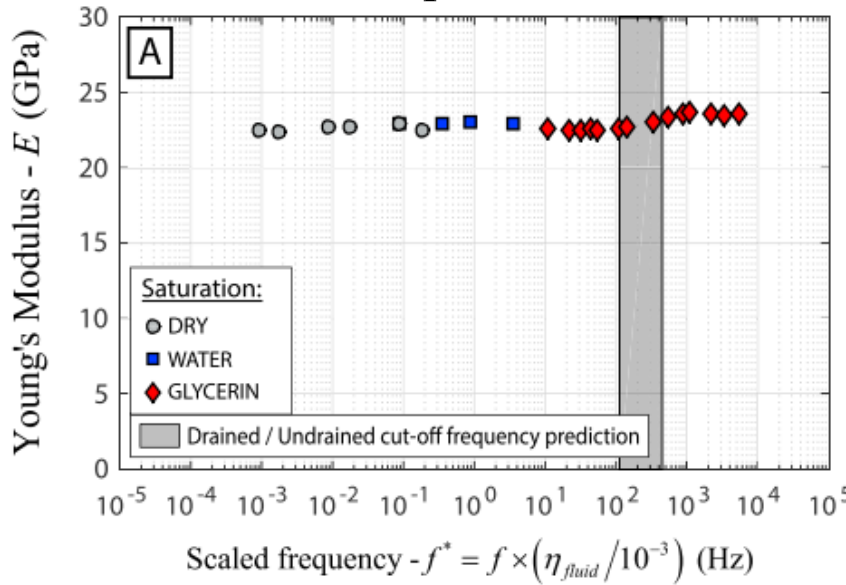
Borgomano et al., 2017

# Résultats expérimentaux

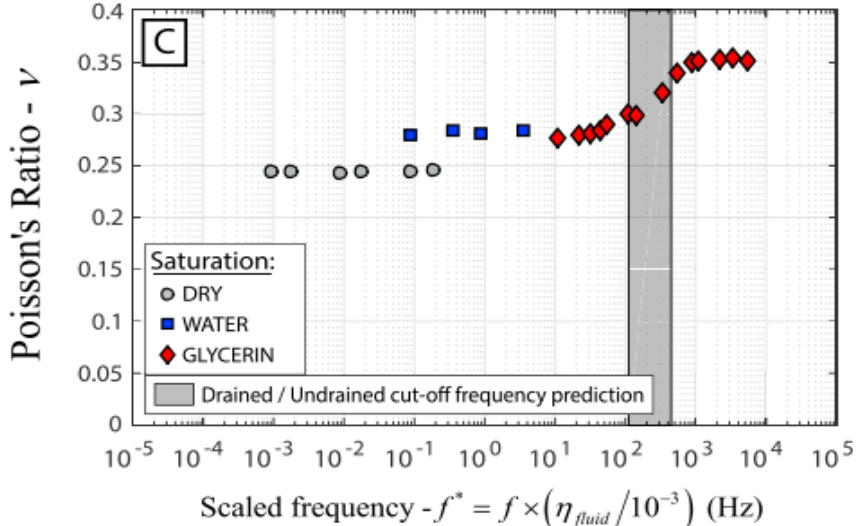
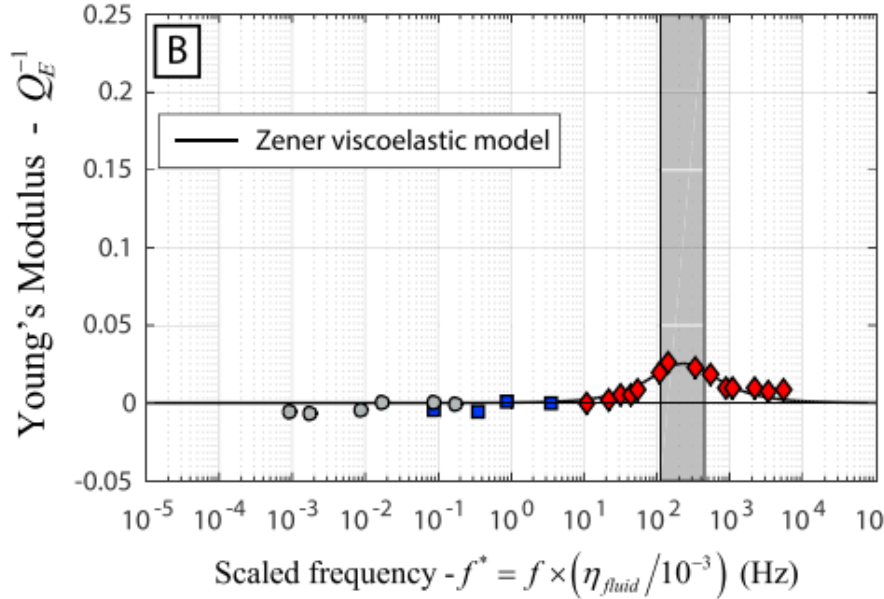
Calcaire oolitique de Lavoux

Oscillations axiales – Peff = 2,5 MPa

Dispersion



Attenuation

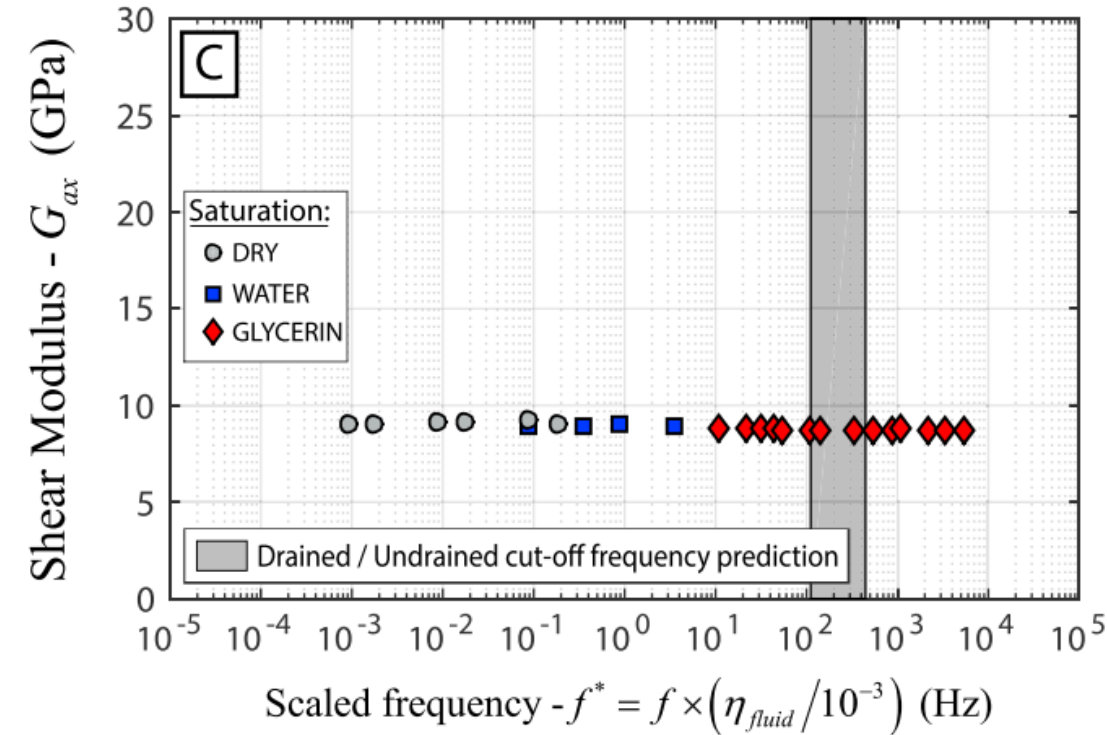
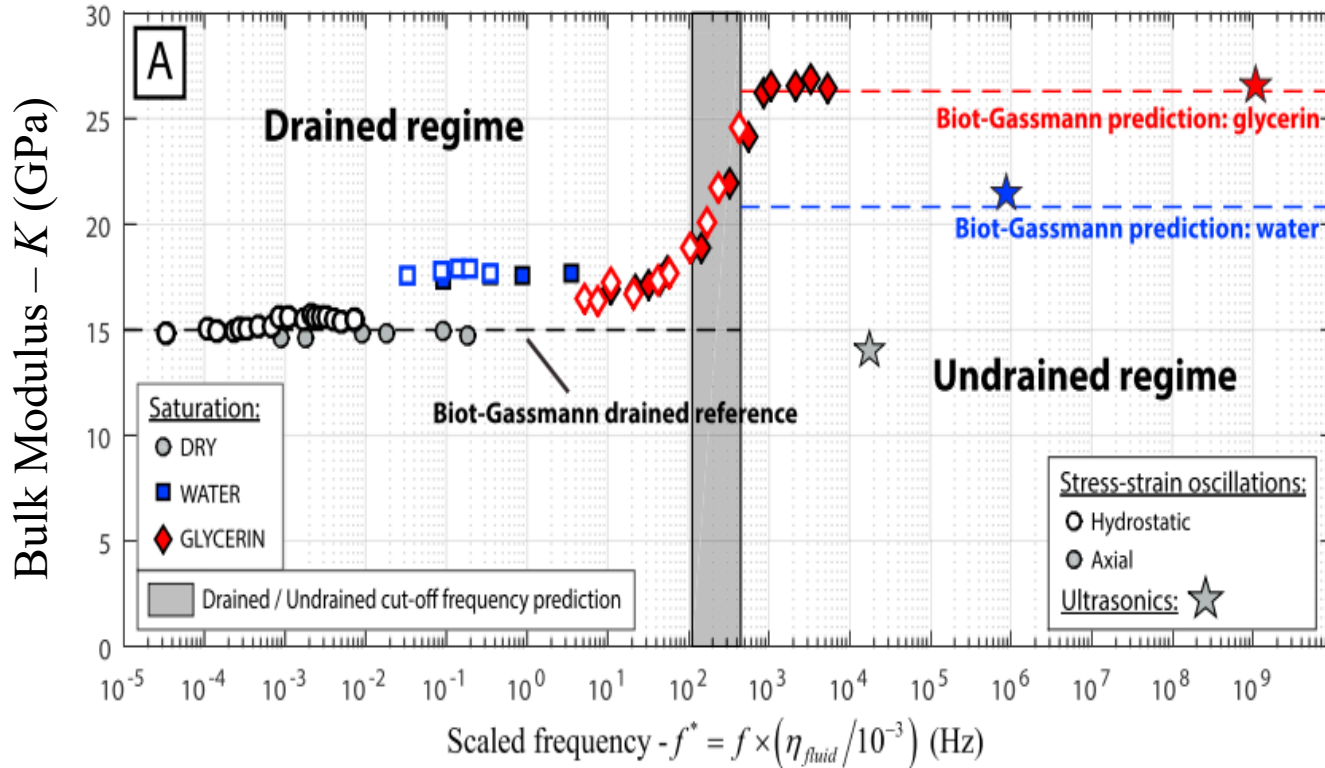


Borgomano et al., 2017

# Résultats expérimentaux

Calcaire oolitique de Lavoux

Oscillations hydrostatiques + axiales – Peff = 2,5 MPa



Biot-Gassmann:

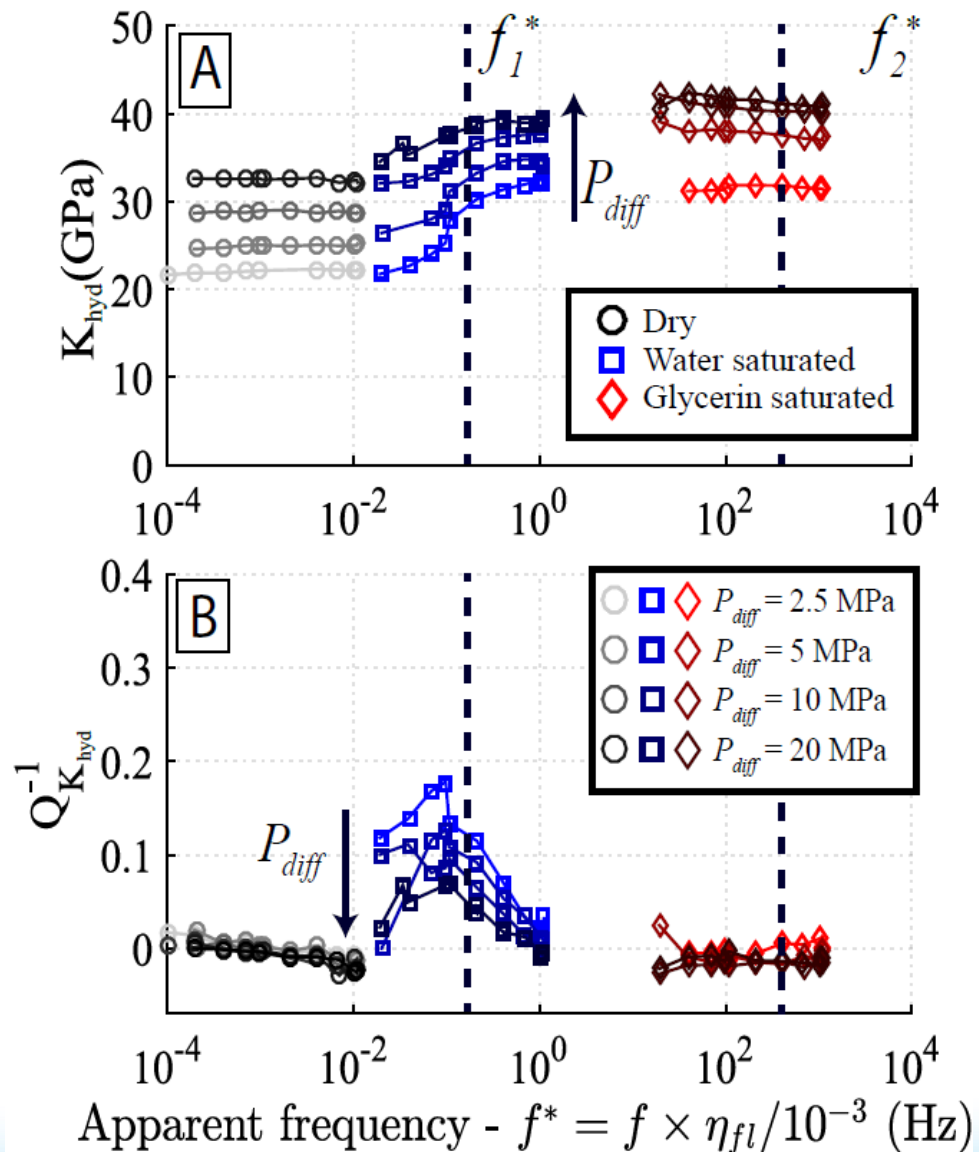
$$K_u = K_d + \frac{K_f \left(1 - \frac{K_d}{K_s}\right)^2}{\Phi + \left(\left(1 - \frac{K_d}{K_s}\right) - \Phi\right) \frac{K_f}{K_s}} \quad \text{and} \quad G_u = G_d,$$

$K_{gly} = 4,36$  GPa  
 $K_{wat} = 2,24$  GPa  
 $K_s = 77$  GPa

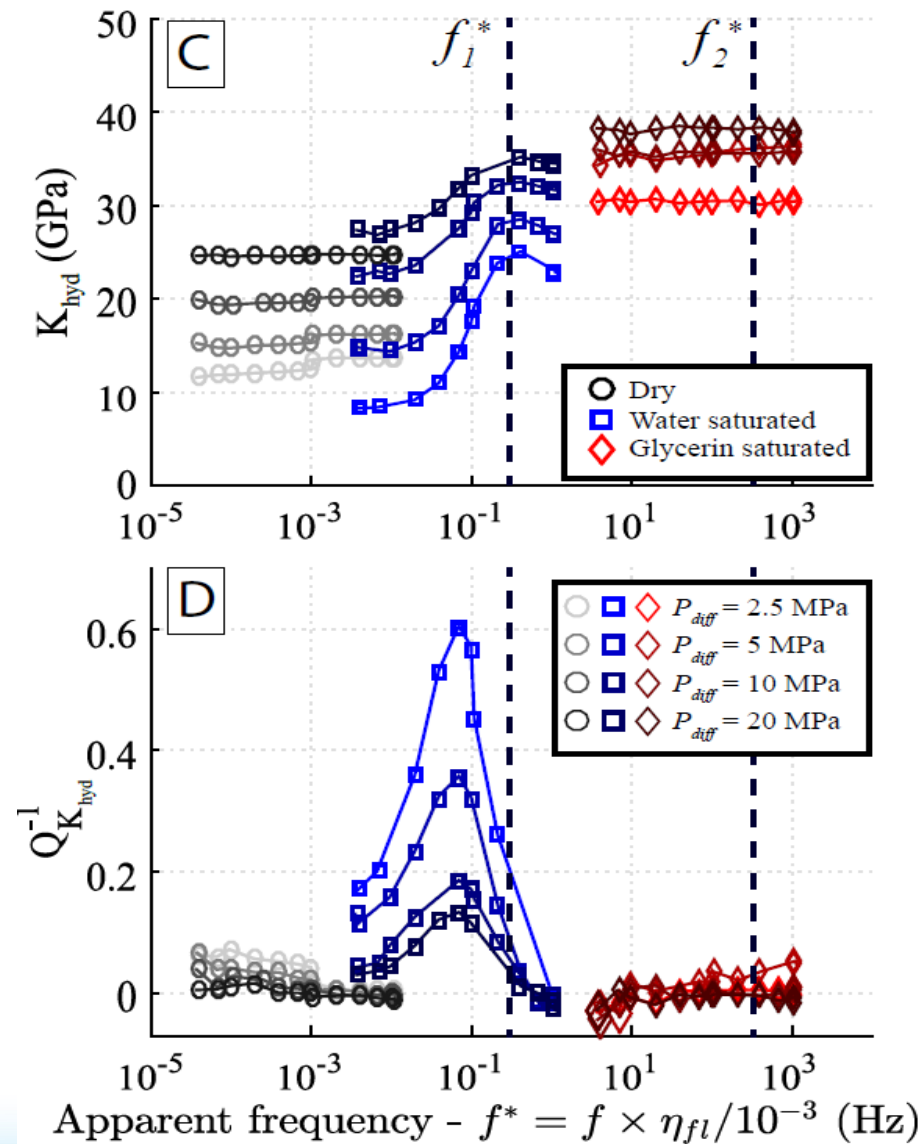
*Borgomano et al., 2017*

# Résultats expérimentaux

Calcaire bioclastique de Indiana



Calcaire à rudistes de Rustrel

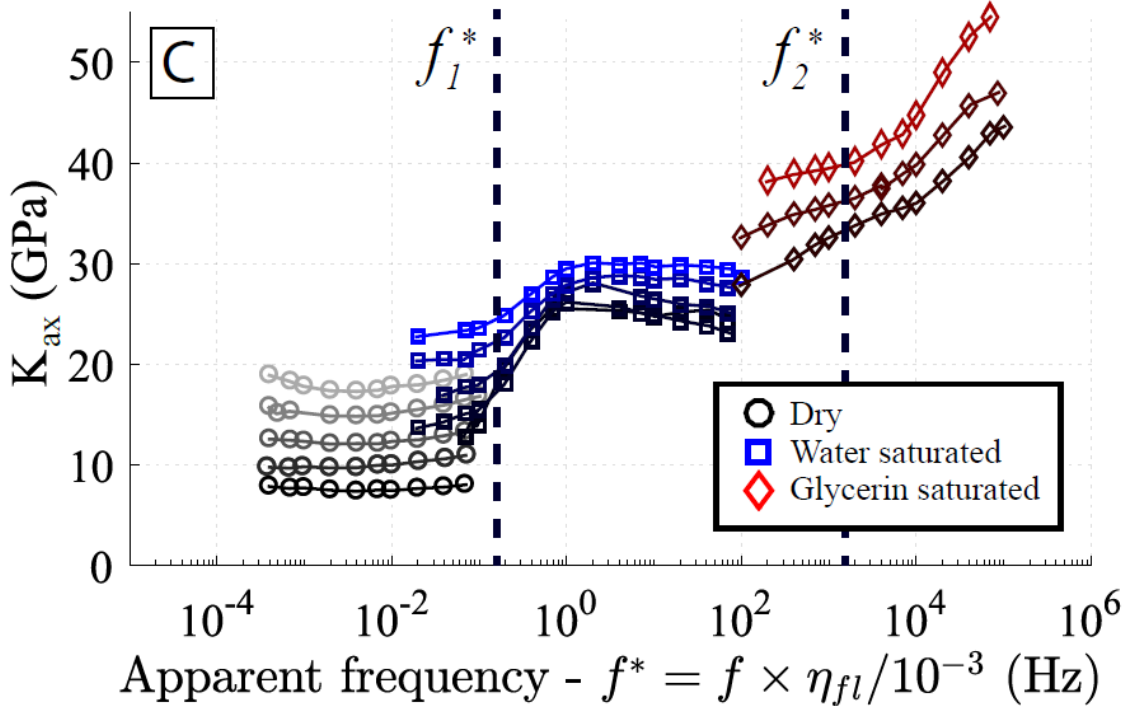




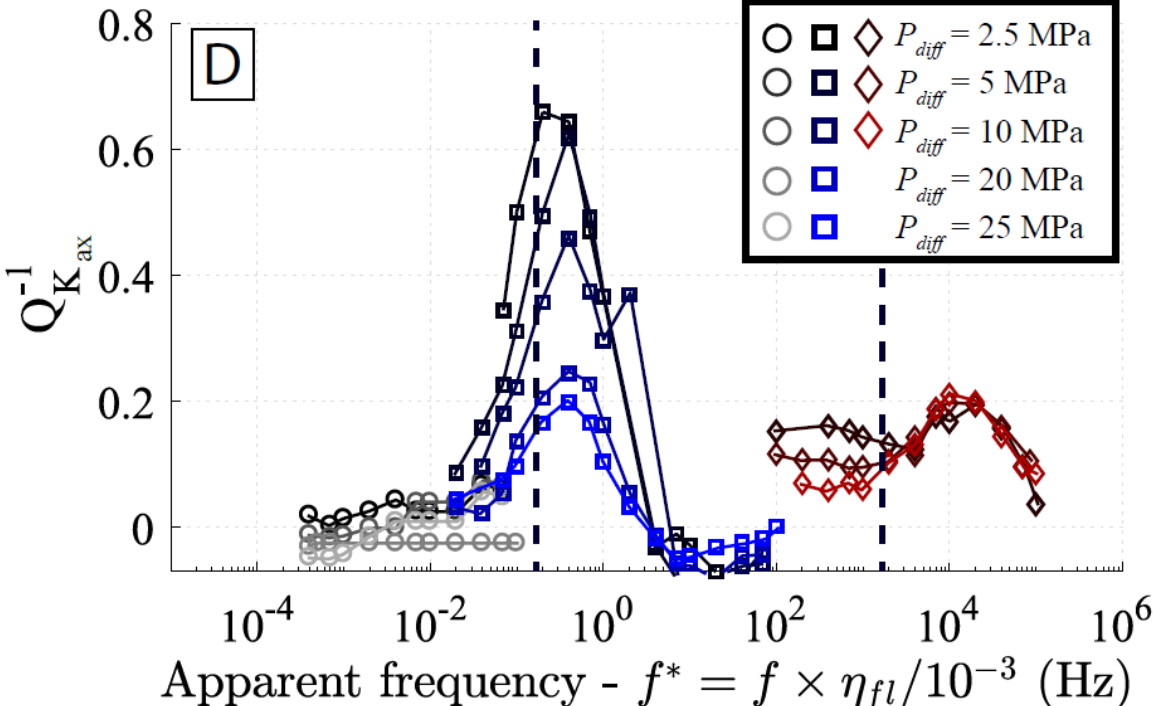
# Résultats expérimentaux

Coquina « pré-sel »

Dispersion



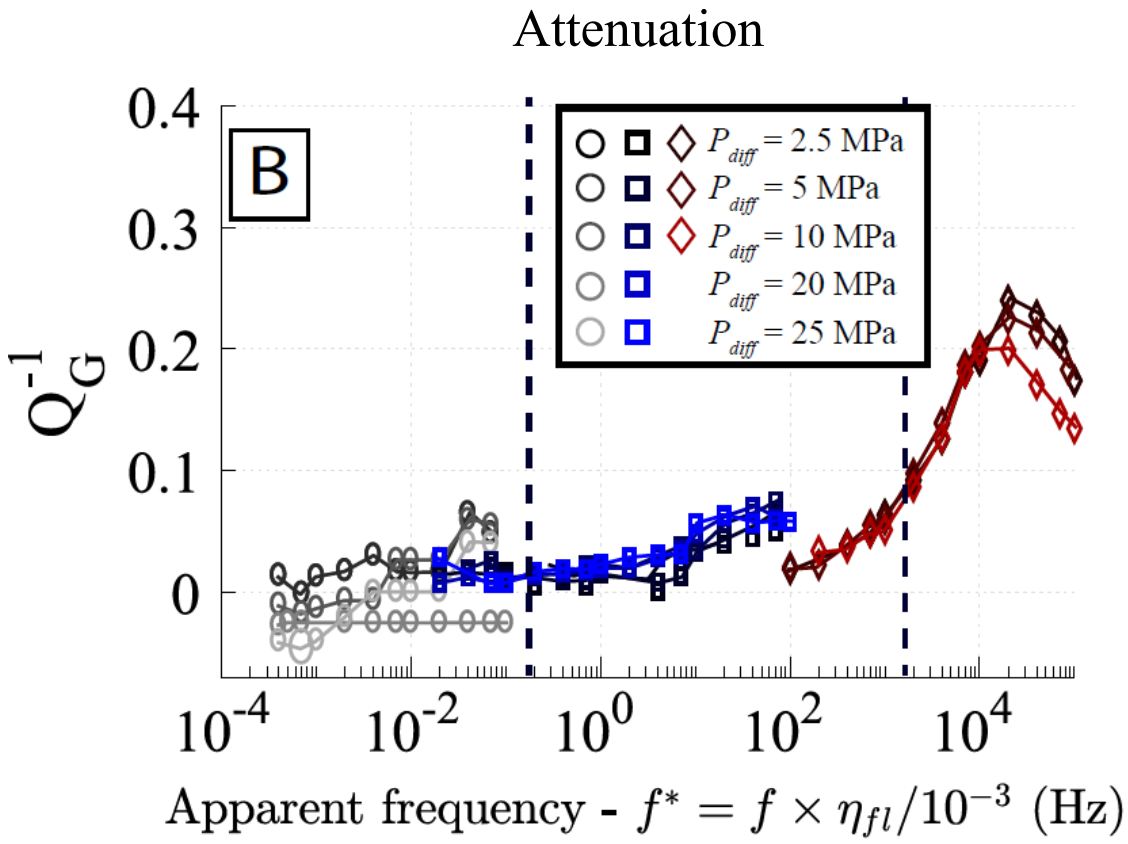
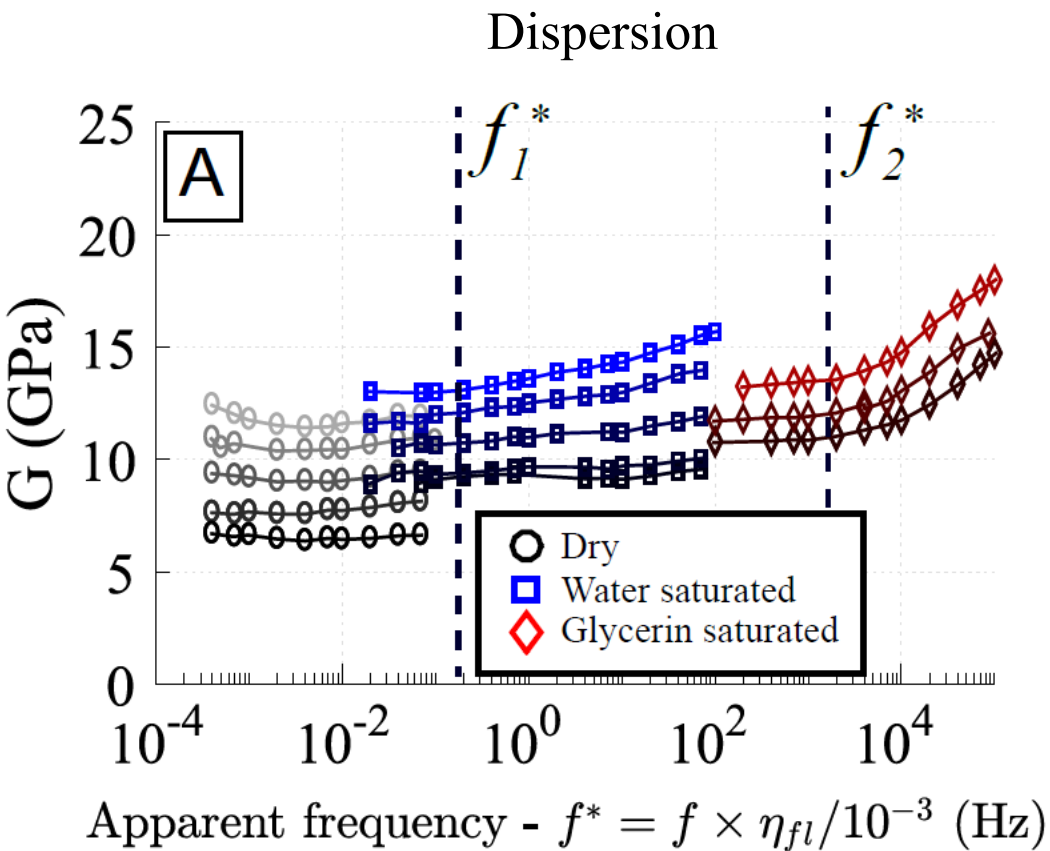
Attenuation



Borgomano et al., 2019

# Résultats expérimentaux

Coquina « pré-sel »



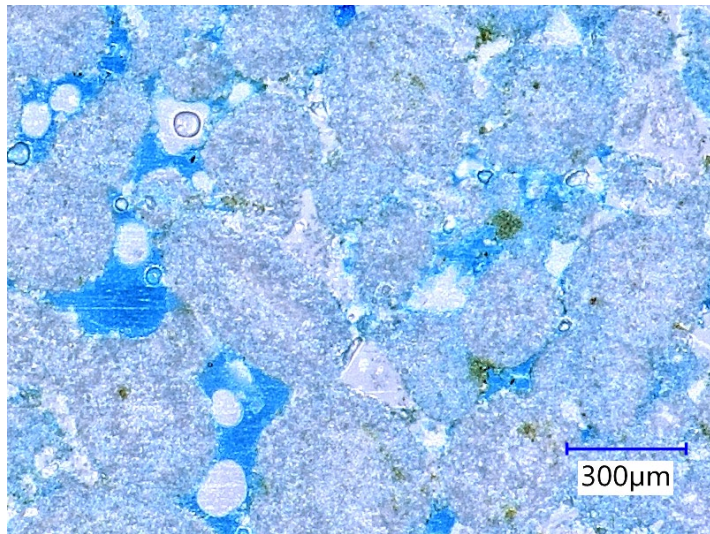
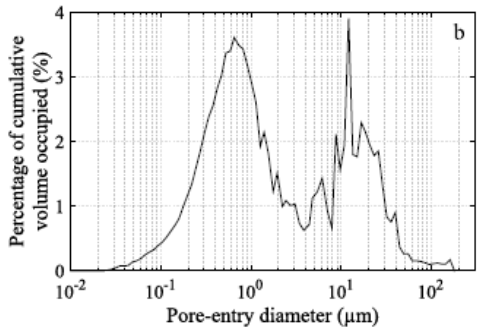
Borgomano et al., 2019



# Résultats expérimentaux

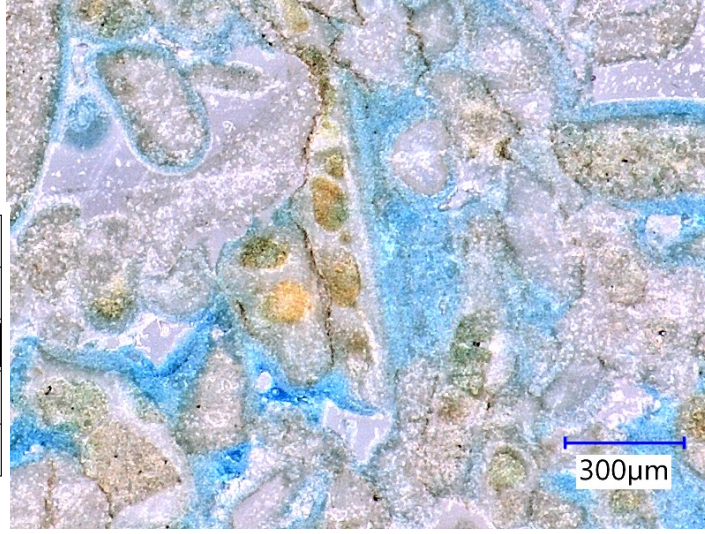
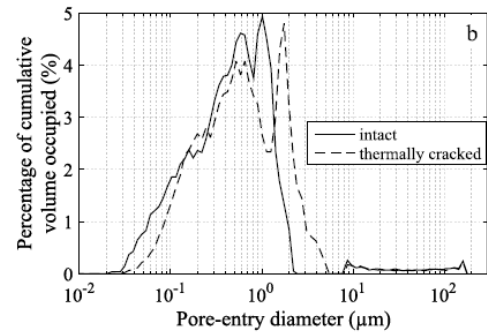
## Calcaire oolitique de Lavoux

$\Phi = 23.0\%$   
 $k = 10 \text{ mD}$



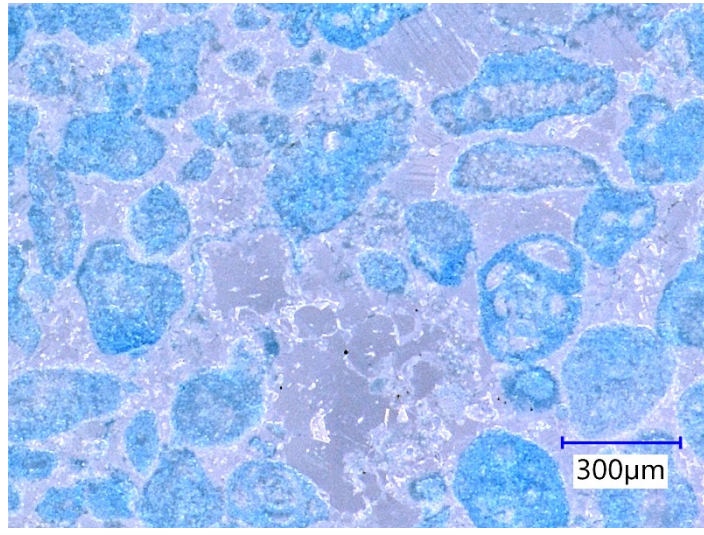
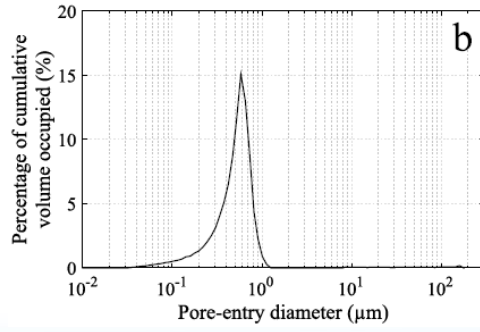
## Calcaire bioclastique de Indiana

$\Phi = 11.4\%$   
 $k = 0.02 \text{ mD}$



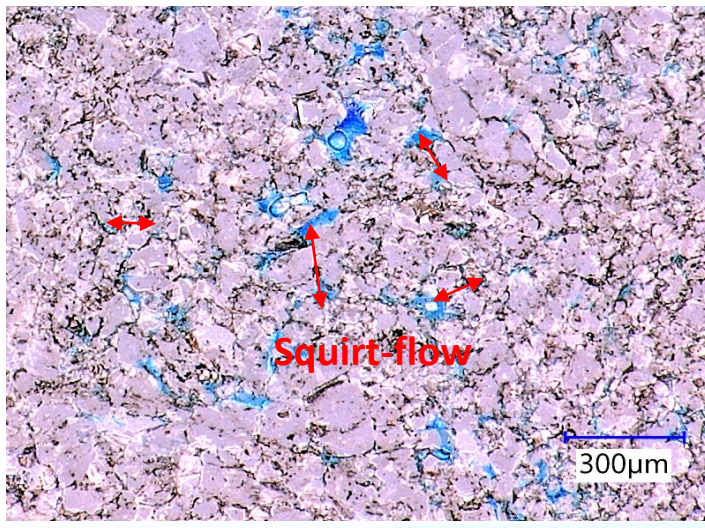
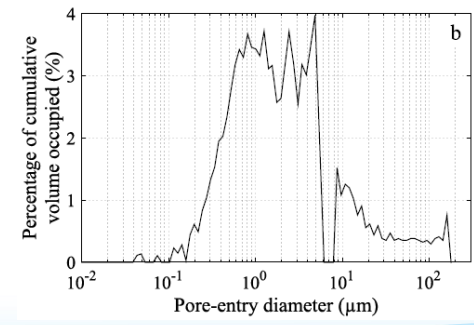
## Calcaire à rudistes de Rustrel (Urgonien de Provence)

$\Phi = 14.9\%$   
 $k = 0.04 \text{ mD}$



## Coquina « pré-sel », offshore Congo, 4100m.

$\Phi = 7.5\%$   
 $k = 0.05 \text{ mD}$

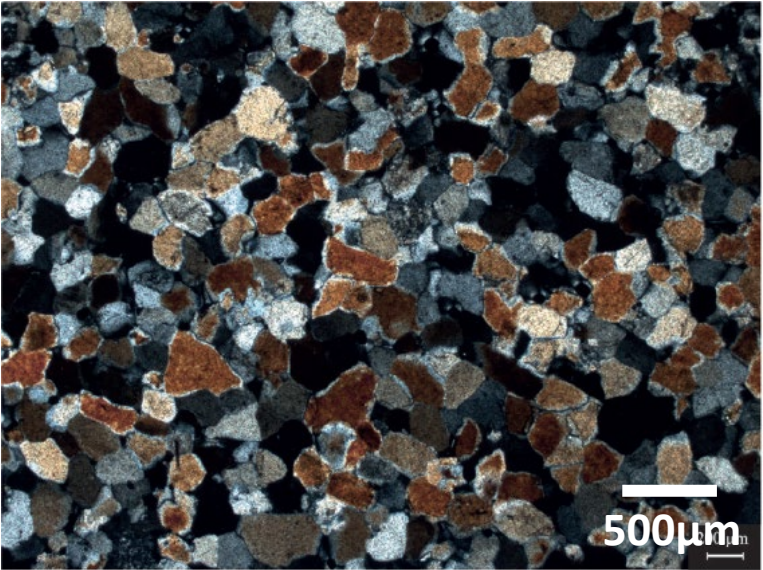




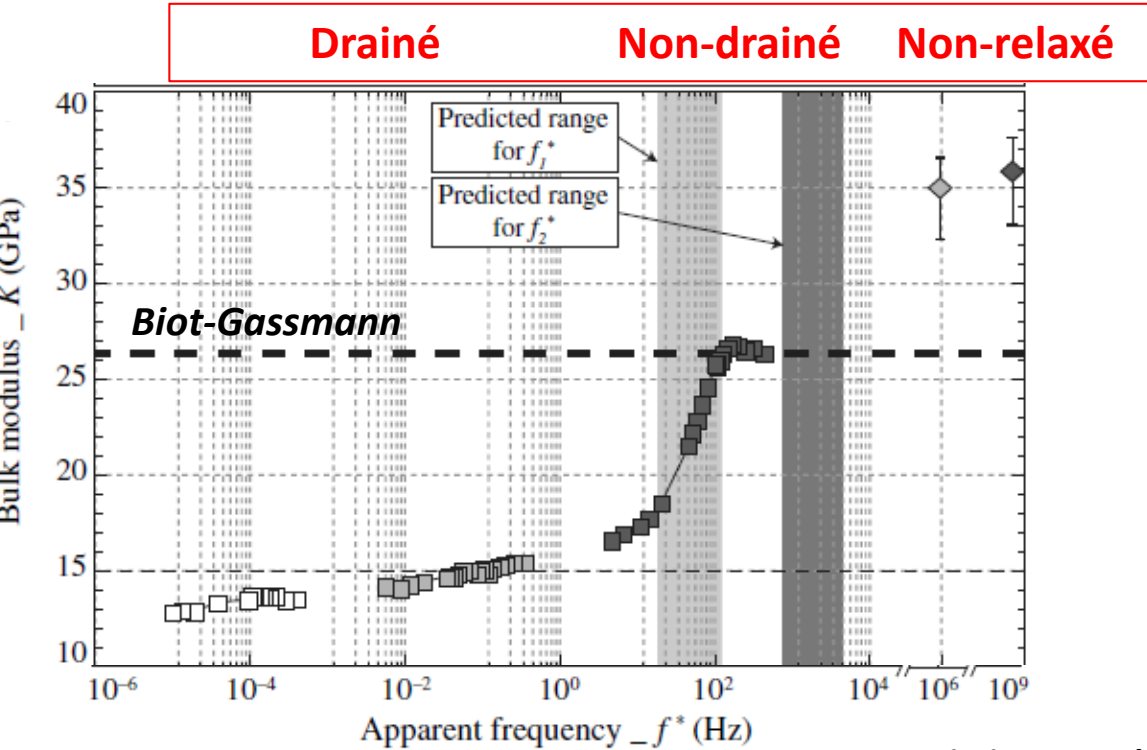
# Résultats expérimentaux

## Dispersion dans les grès

### Grès de Fontainebleau



Porosité 7%  
Permeabilité 10 mD  
100% Quartz



Pimienta et al., 2015

Microstructure « simple » : les contacts entre grains peuvent agir comme des cracks



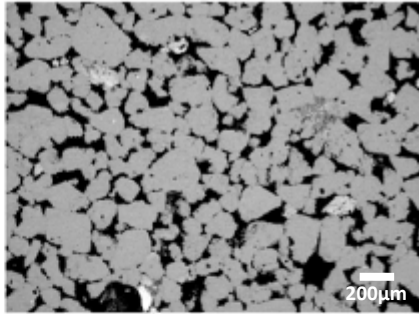
Mécanisme de « squirt-flow »

# Résultats expérimentaux

## Dispersion dans les grès

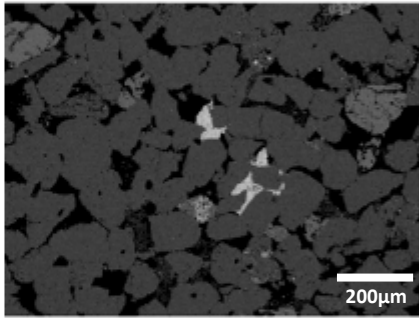
Bentheim  
Sandstone

Porosité 25%  
Permeabilité 500 mD



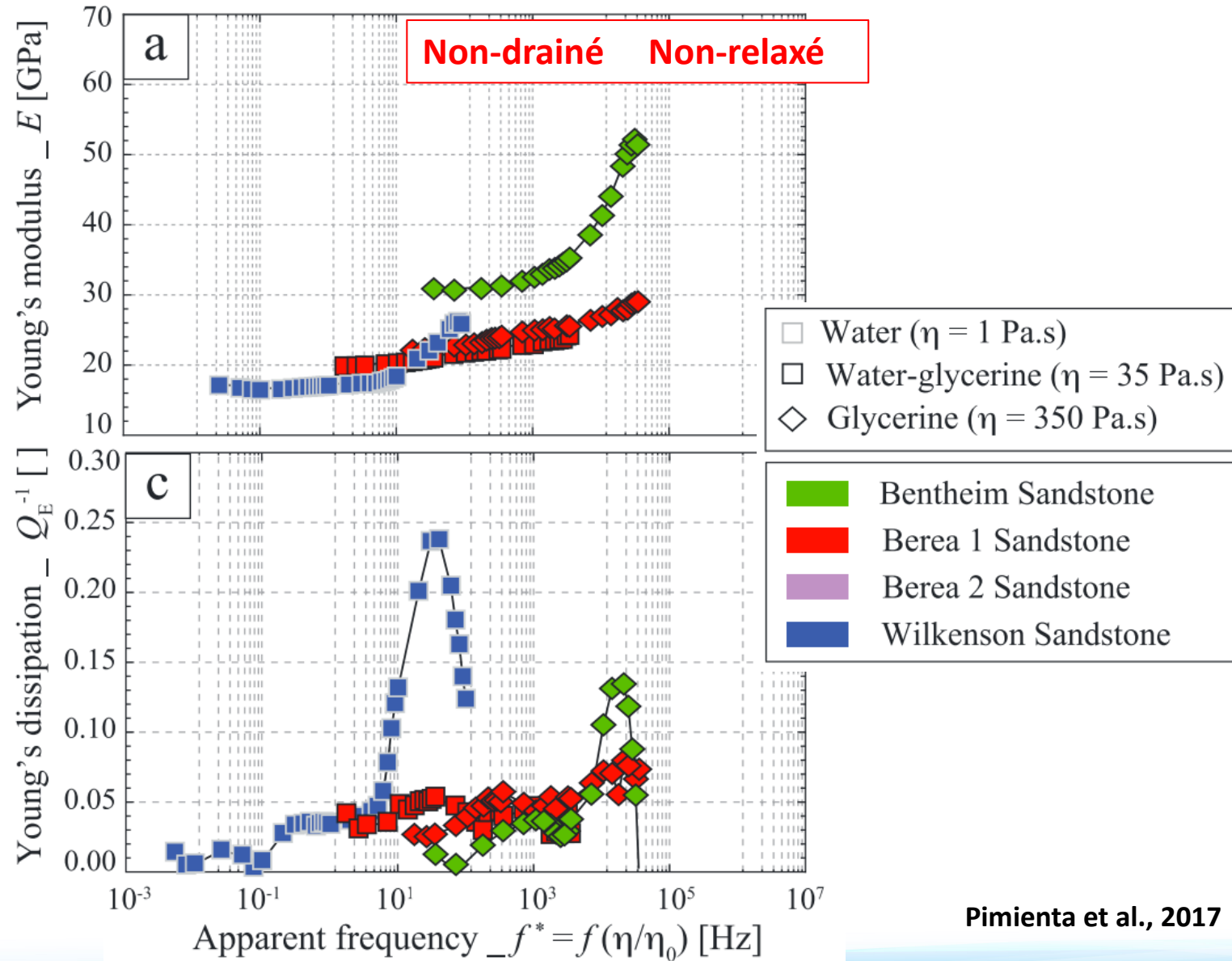
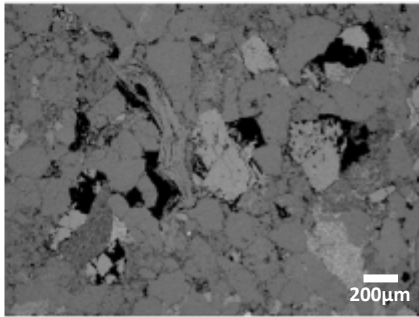
Berea  
Sandstone

Porosité 22%  
Permeabilité 20 mD



Wilkinson  
Sandstone

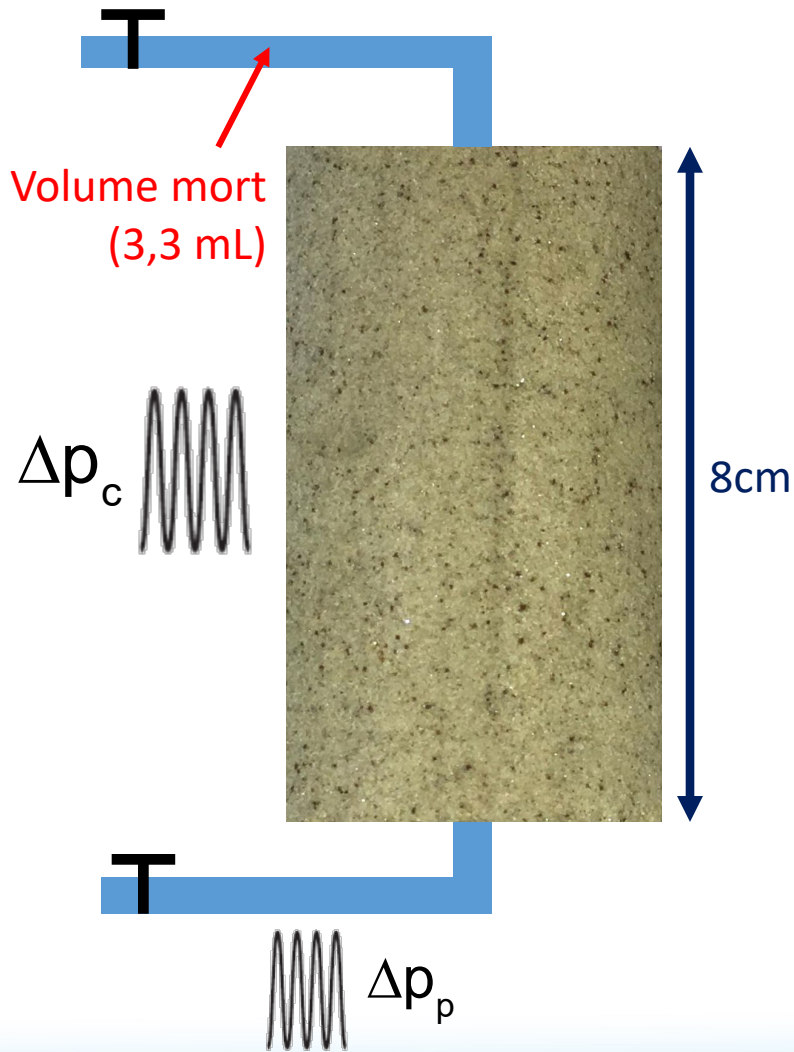
Porosité 10%  
Permeabilité 3e-3 mD



Pimienta et al., 2017

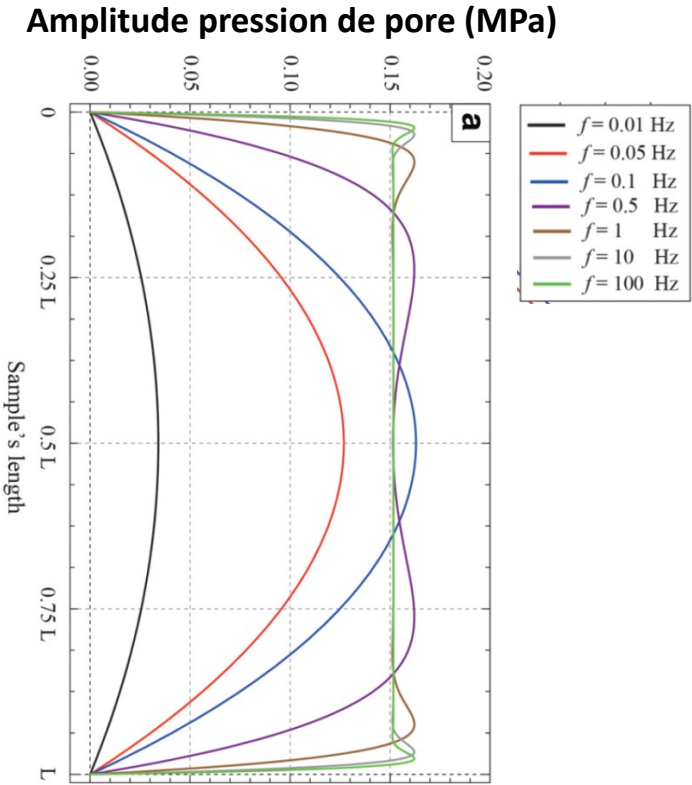
# Transition drainé / non-drainé

Modèle poroélastique 1D



$$\frac{\partial p_f}{\partial t} - \frac{\kappa B K_d}{\eta \alpha} \frac{\partial^2 p_f}{\partial z^2} = B \frac{\partial P}{\partial t}$$

(Equation de diffusion)



Conditions aux limites :

Drainé

$$p_f(L, t > 0) = 0$$

$$p_f(0, t > 0) = 0$$

Vannes fermées

$$S_1 \left( \frac{\partial p_1}{\partial t} \right)_{z=L} + \frac{\kappa A}{\eta} \left( \frac{\partial p_f}{\partial z} \right)_{z=L} = 0$$

$$S_2 \left( \frac{\partial p_2}{\partial t} \right)_{z=0} - \frac{\kappa A}{\eta} \left( \frac{\partial p_f}{\partial z} \right)_{z=0} = 0$$

B: Skempton coefficient

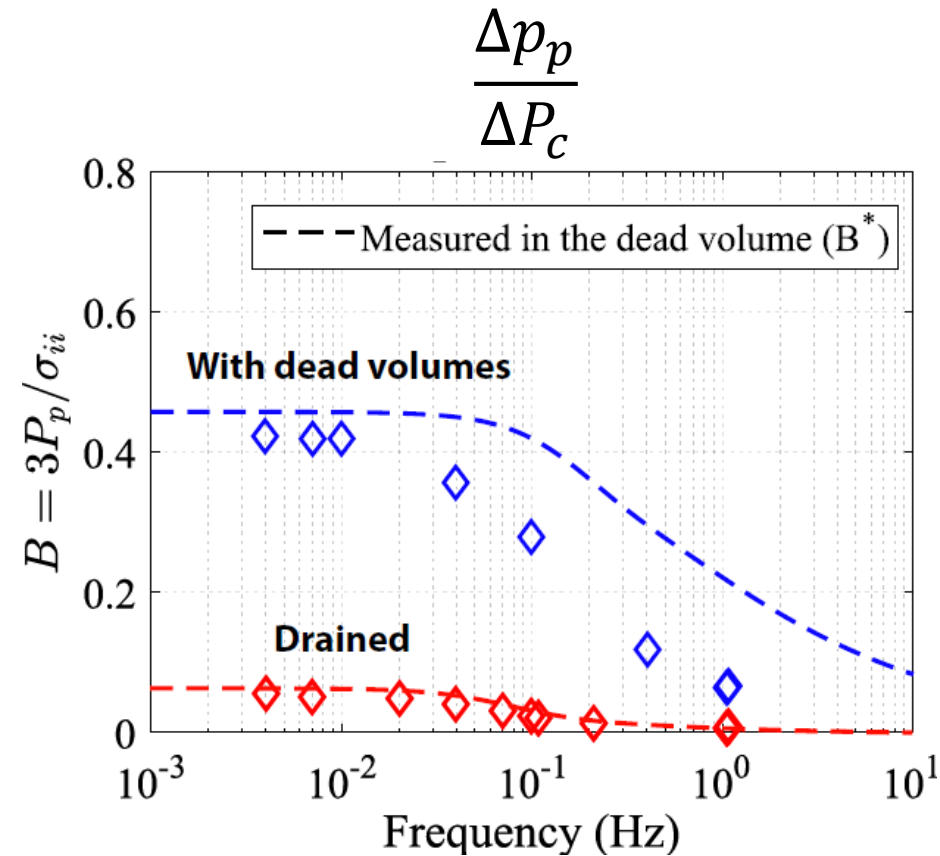
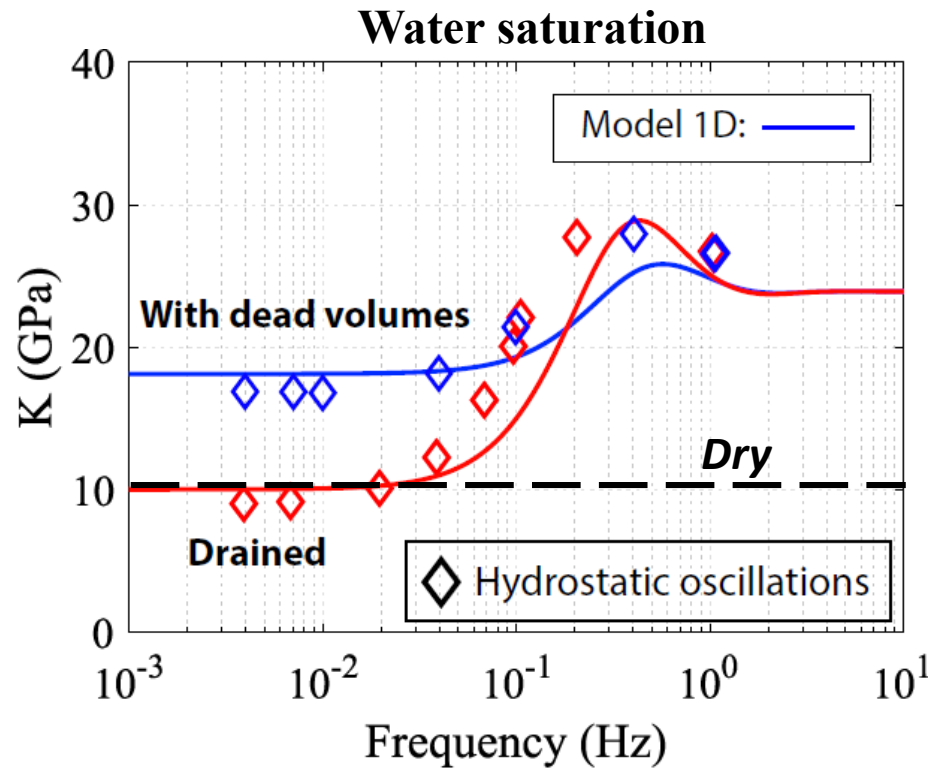
S1 = S2: Storage capacity dead volume (S = V/Kf)



# Transition drainé / non-drainé

## Modèle poroélastique 1D

Exemple, calcaire de Rustrel à  $P_{eff} = 2,5$  MPa



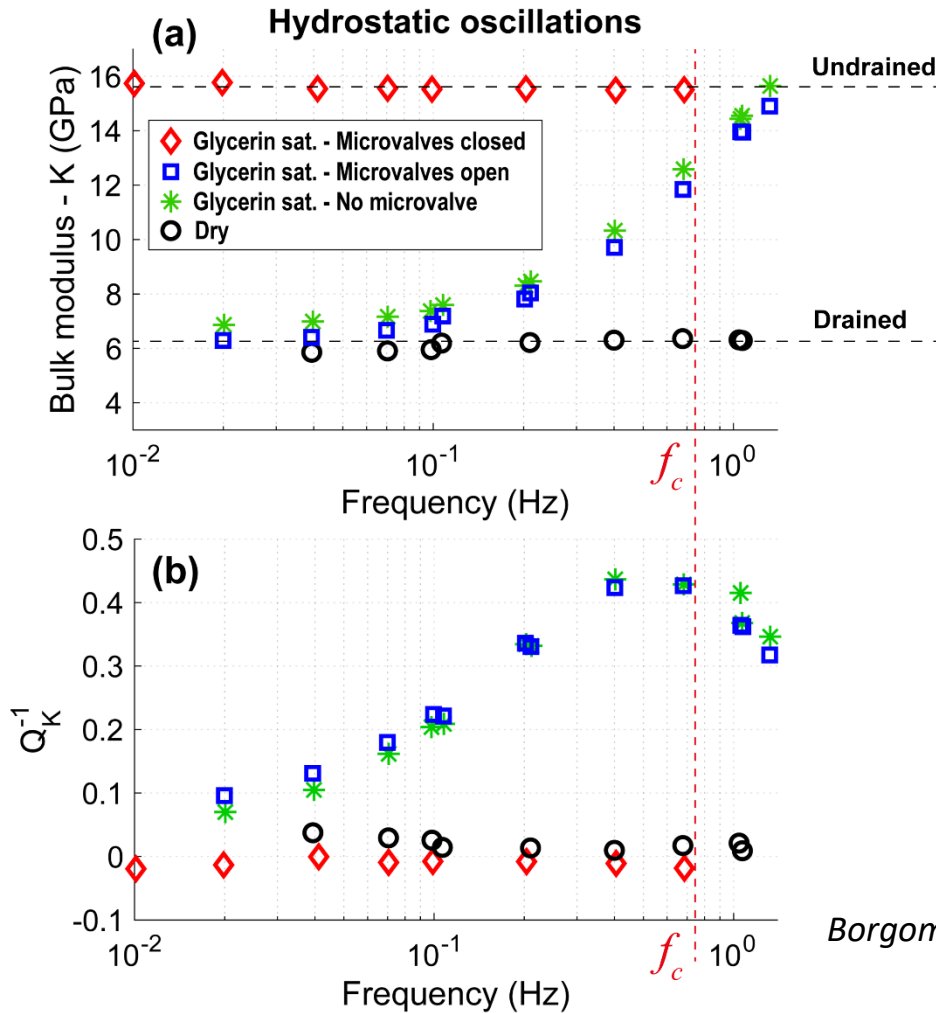
Drainé – Vannes ouvertes - volume pompes 100 mL  
« Non-drainé » - Vannes fermées – volumes morts 3,3 mL

# Transition drainé / non-drainé

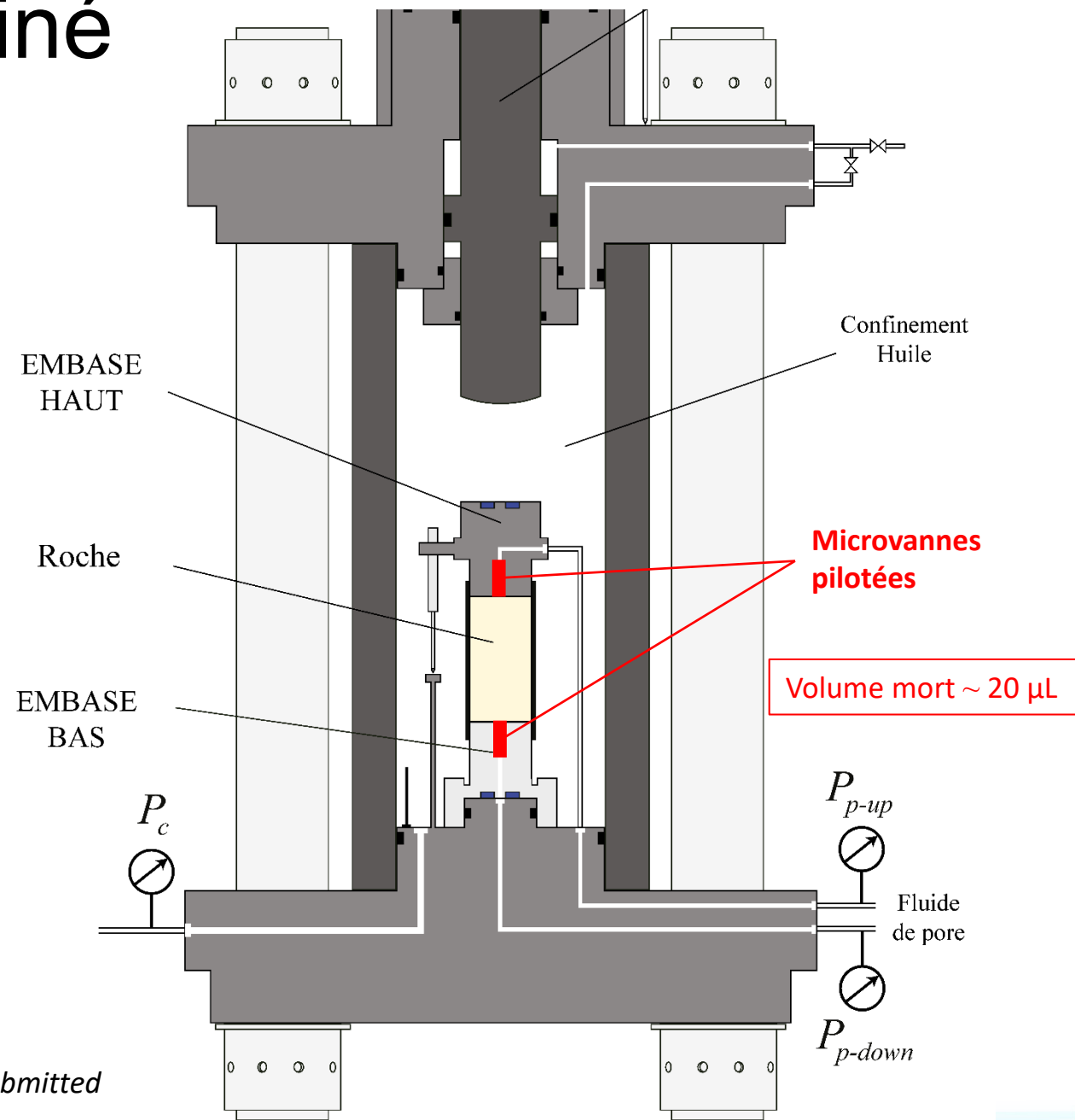
## Développement de nouvelles microvannes

### Bleurswiller sandstone

(Poro = 25%, perm = 200 mD)

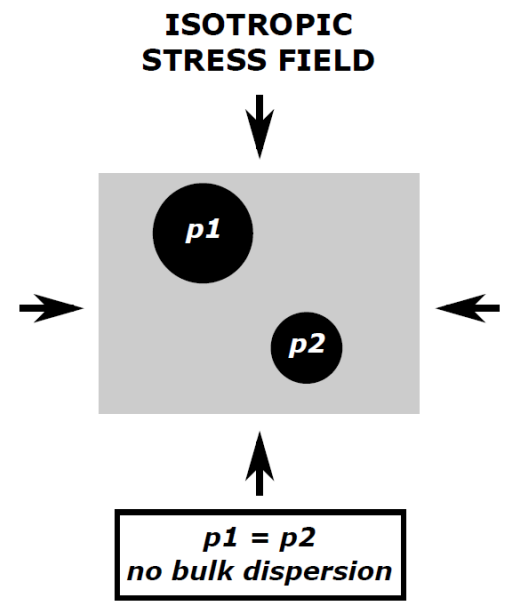


Borgomano et al., submitted

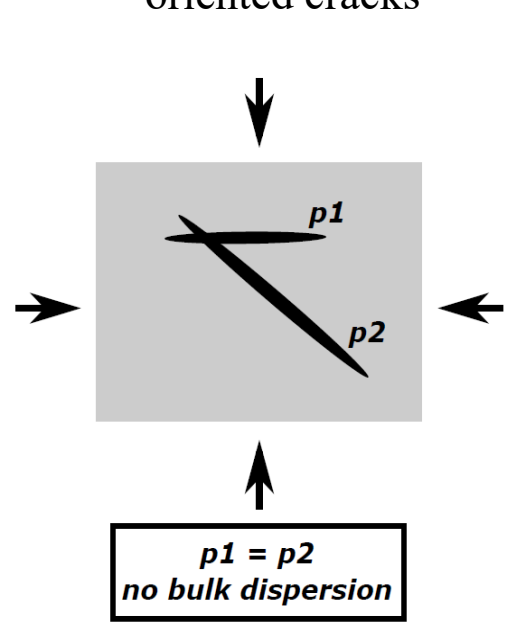


# Transition liée au « Squirt-flow »

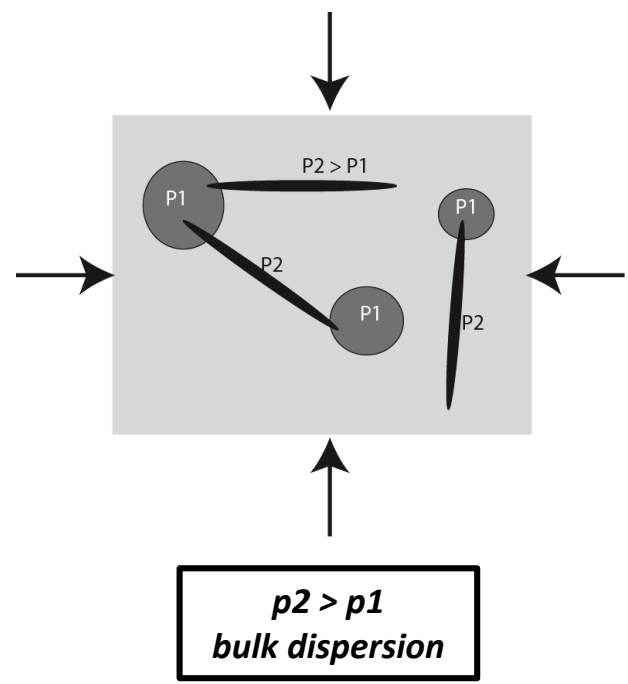
Medium with equant pores



Medium with randomly oriented cracks



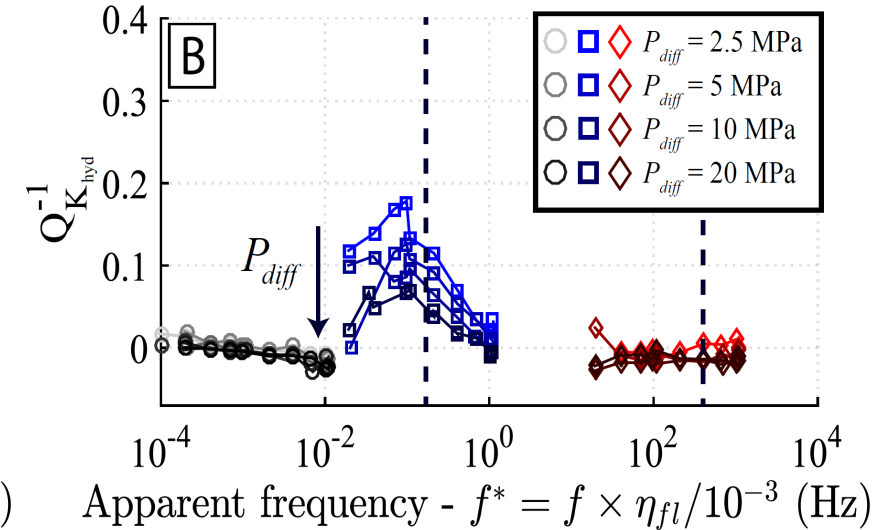
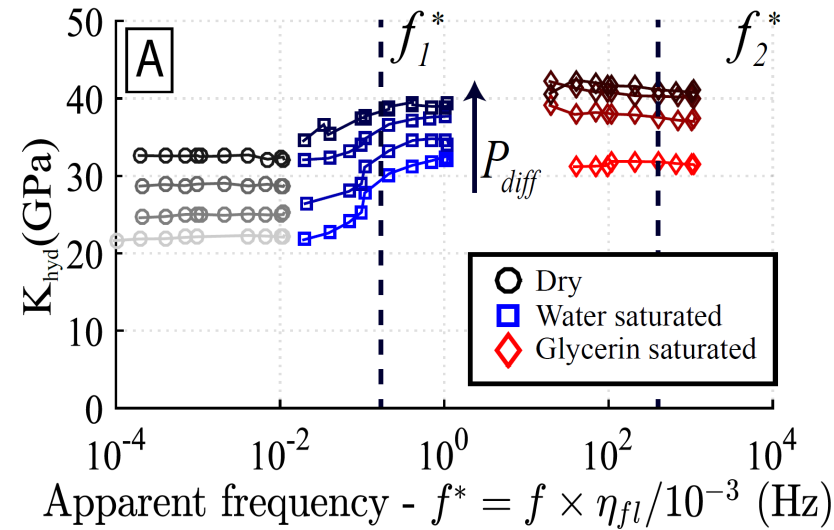
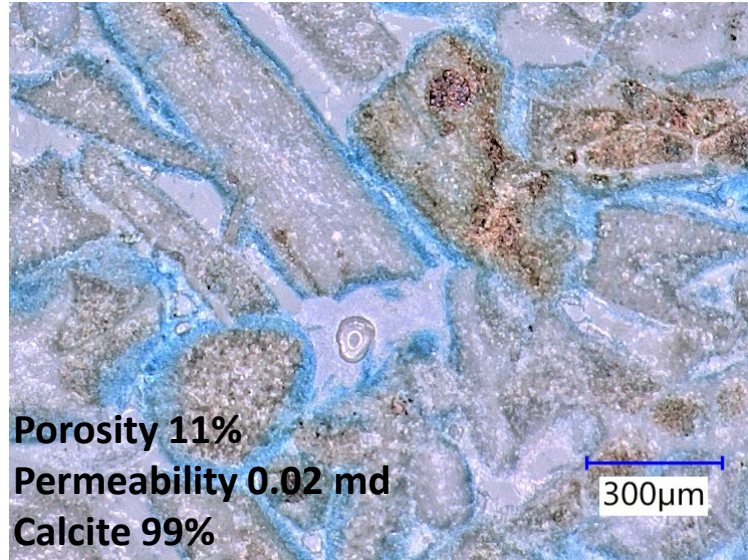
**In rocks**  
« pores and cracks »



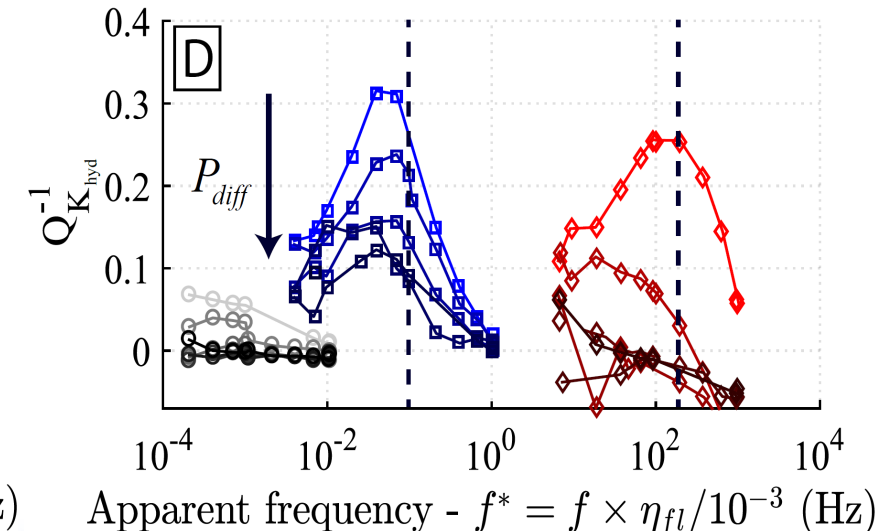
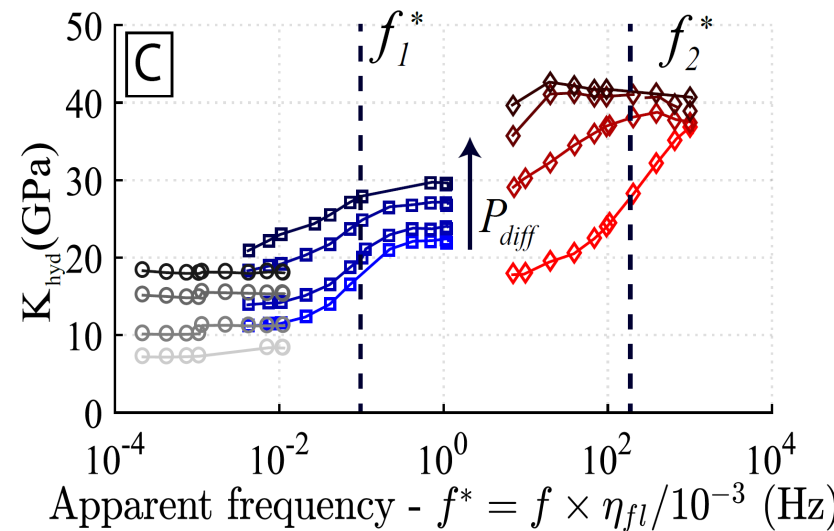
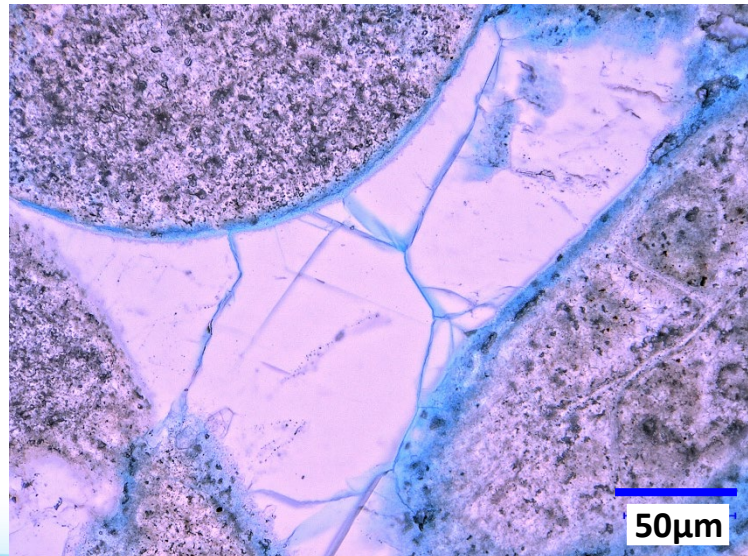
# Transition liée au « Squirt-flow »

Borgomano et al., 2019

Calcaire bioclastique de Indiana



Thermocrackage 1 heure 500°C



# Transition liée au « Squirt-flow »

## Modélisation

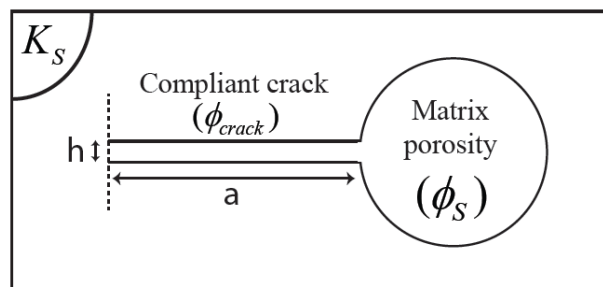
Milieu effectif :  
(e.g. Kachanov 1993)

$$K_{sat} = \frac{K_S}{1 + \rho \frac{16(1-\nu_S^2)}{9(1-2\nu_S)} \left( \frac{\delta_c}{1 + \delta_c} \right)}$$



$\delta_c = \text{couplage fluide/solide}$

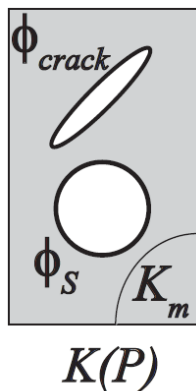
Modèle micromécanique de squirt-flow :  
(e.g. Murphy III et al., 1986)



$$\delta_c^*(\omega) = \frac{3\pi(1-2\nu_S)}{4(1-\nu_S^2)} \frac{\hat{\xi}}{C_S} (C_{fl}^*(\omega) - C_S)$$

$$K_{fl}^*(\omega) = K_{fl} \left( 1 - \frac{J_1(ka)}{\frac{ka}{2} J_0(ka)} \right)$$

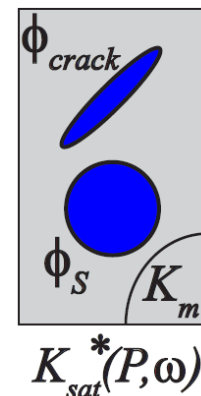
Séquence :



**Squirt-flow**



**Poroelasticity  
on phi\_S  
(modèle 1D)**

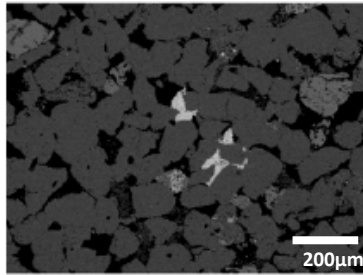




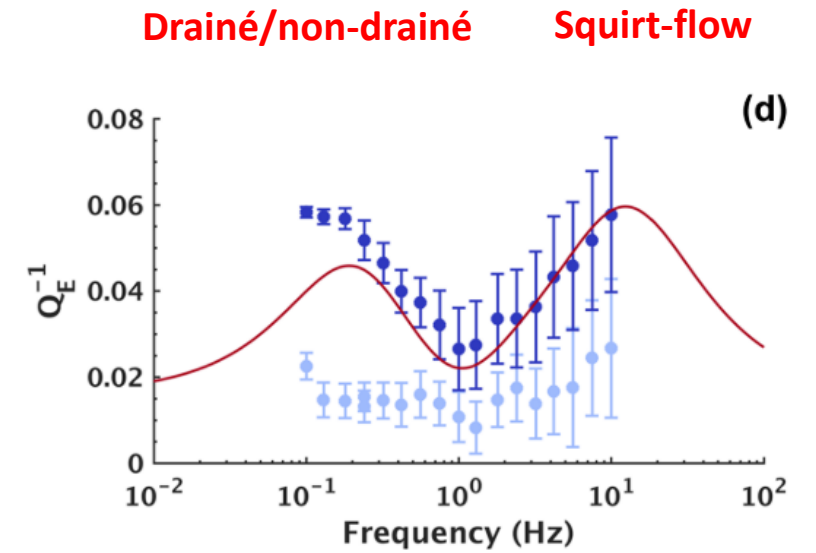
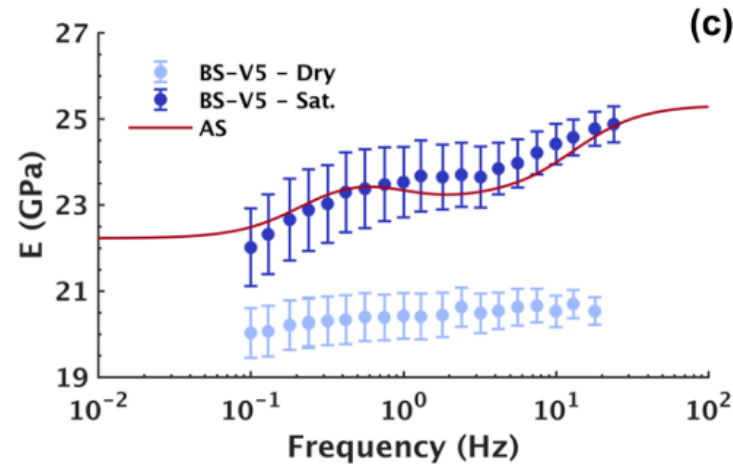
# Transition liée au « Squirt-flow »

## Modélisation

Berea  
Sandstone



Porosity = 22%,  
saturation en glycérine



*Chapman et al. (2018)*



# Conclusions

- ❑ **Développement d'un système expérimental qui permet de mesurer sous pression :**
  - les modules élastiques basses fréquences, dans la gamme 0.01-100 Hz
  - différentes saturations en fluides (eau, glycérine) pour augmenter la fréquence apparente jusqu'à 100 kHz
- ❑ La dispersion des vitesses d'ondes peut être liée à des **écoulements fluide à différentes échelles**
- ❑ La première transition (drainé / non-drainé) est contrôlée par des propriétés macroscopique de la roche, telle que la permeability mais aussi la longueur de l'échantillon. Se modélise dans le cadre de la poroélasticité.
- ❑ La seconde fréquence de coupure (non-drainé / non-relaxé) est **contrôlée par la microstructure**. Elle est susceptible d'affecter les mesures sur le terrain (**particulièrement les diagaphies**).
- ❑ Les carbonates semblent **moins susceptibles** que les grès à générer de la dispersion liée au "s squirt-flow", **sauf si fortement fissurés** ou avec des **contacts de grains similaires aux grès**.

# Perspectives / En cours...

Comparaison avec terrain - Thèse Ariel Gallagher

Labo (statique/dynamique) vs diaggraphie de puits

Faciès : Granulaires / Coquina / Shrub

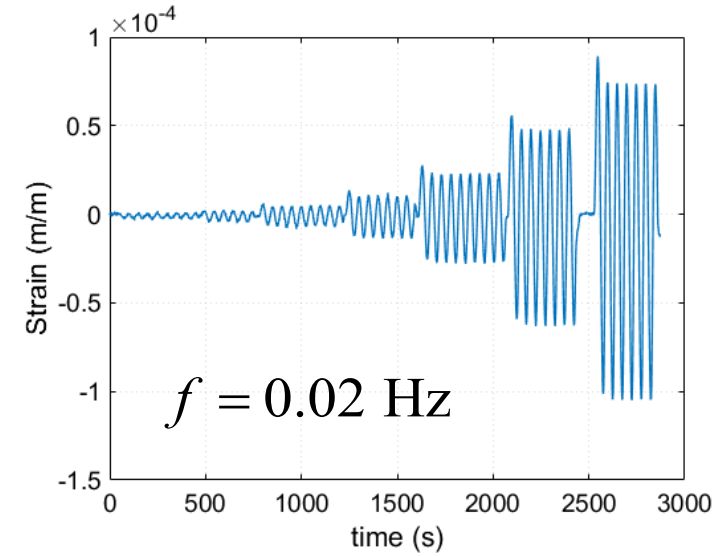
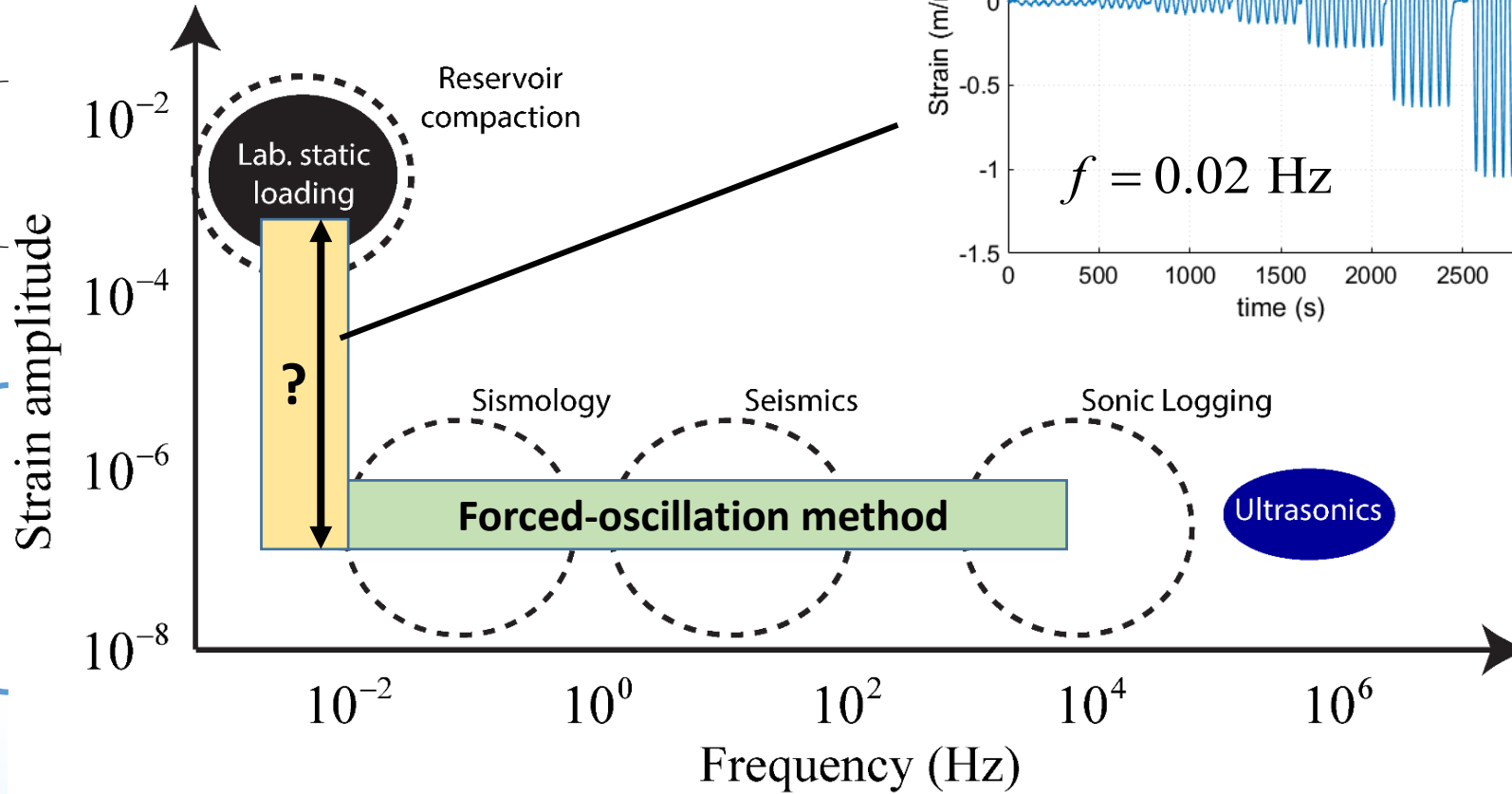


# Perspectives / En cours...

Effet d'amplitude ?

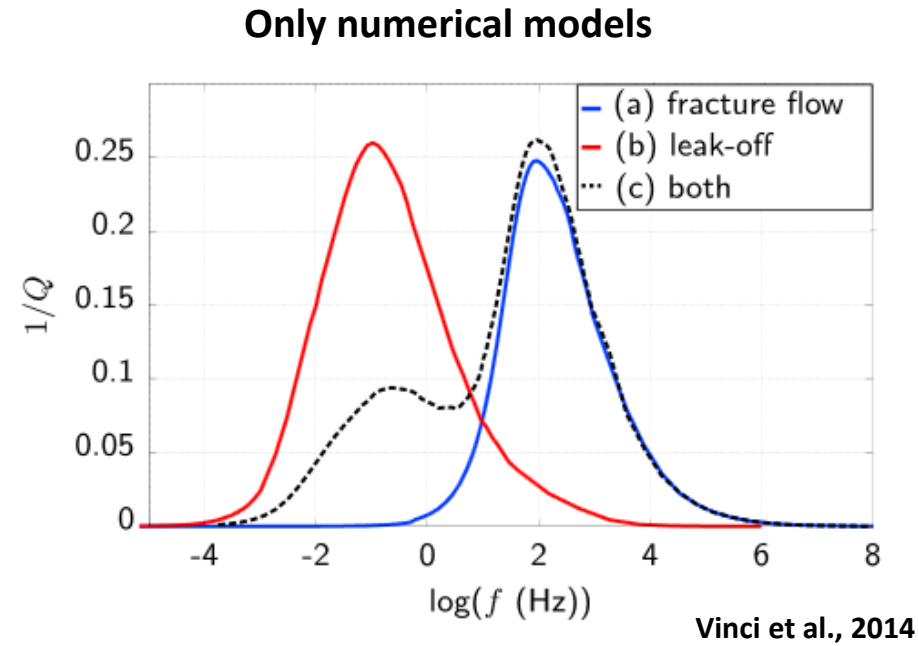
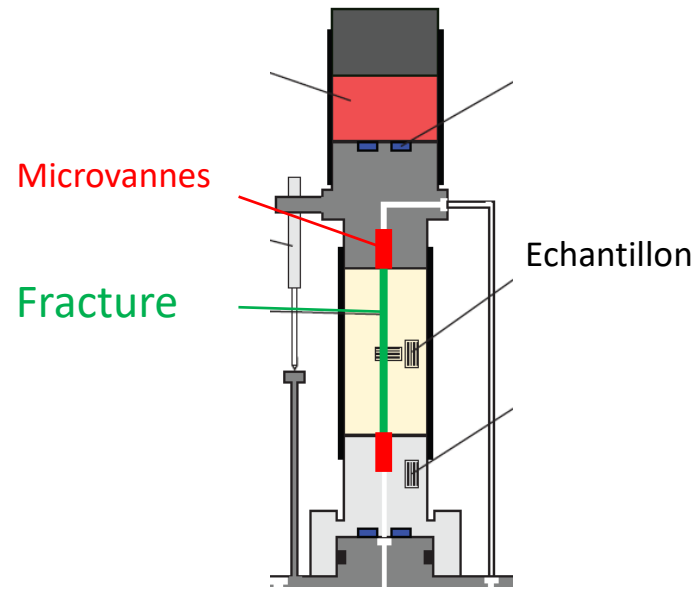
Module(s)  
statique(s)

Modules  
dynamiques



# Perspectives / En cours...

- Changement d'échelle, problème d'une fracture – Thèse Ariel Gallagher



- Saturations partielles



Merci de votre attention