



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

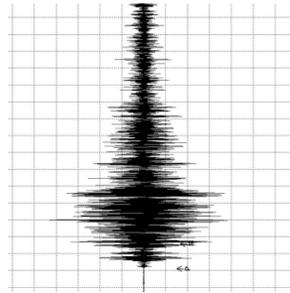
Jan Borgomano

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

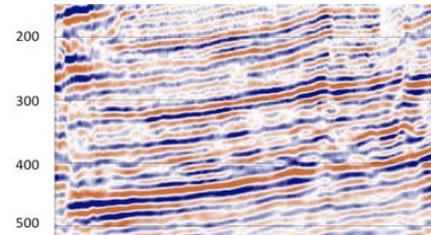
Dirigée par
Yves Guéguen et Jérôme Fortin

Motivation

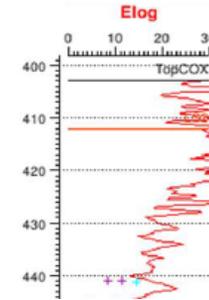
Ondes élastiques, un fossé entre le **terrain** et le **laboratoire**



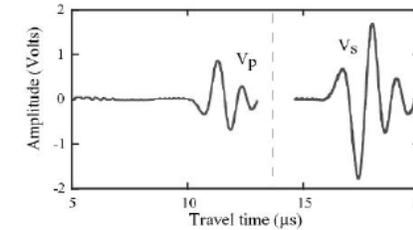
Sismologie



Sismique de surface

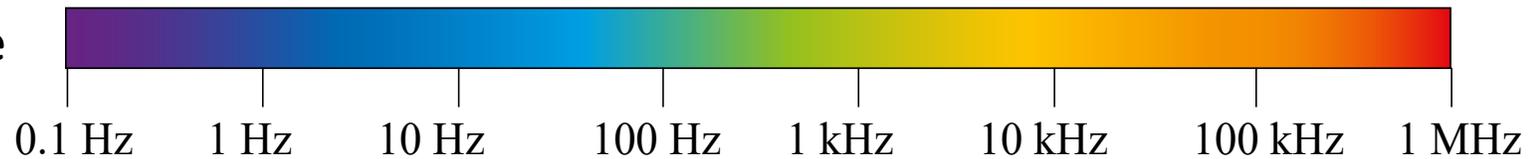


Diagraphies de puits



Laboratoire "classique" (ultrasons)

Fréquence



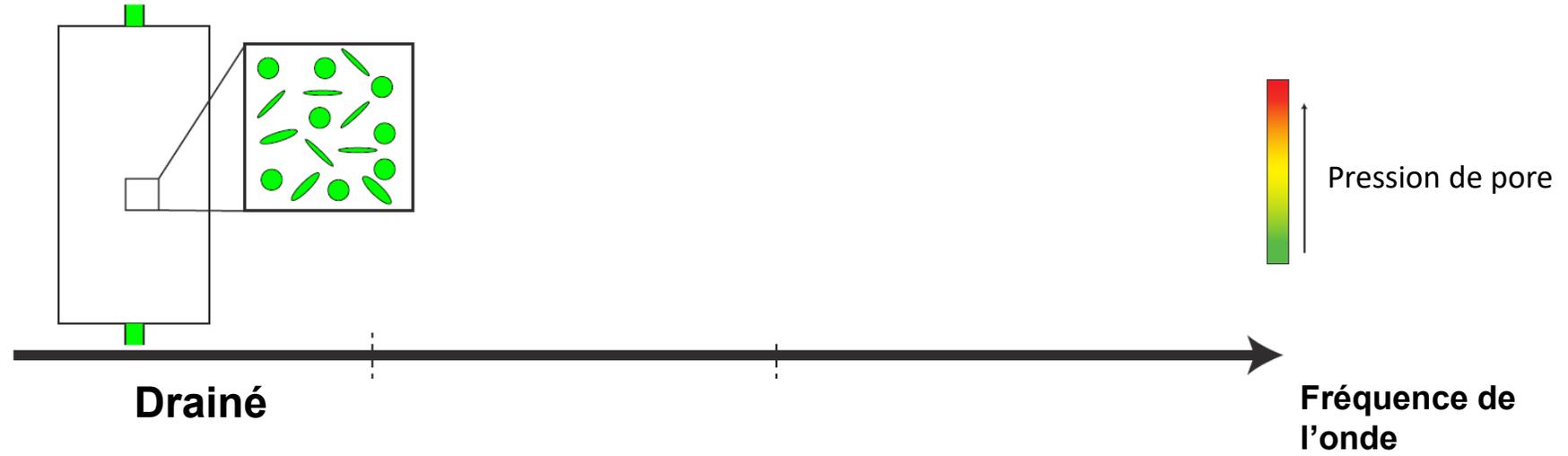
❑ Entre les mesures de terrain et de laboratoire "classique" (ultrasons), la **fréquence des ondes varie de plusieurs ordres de magnitudes**

❑ 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

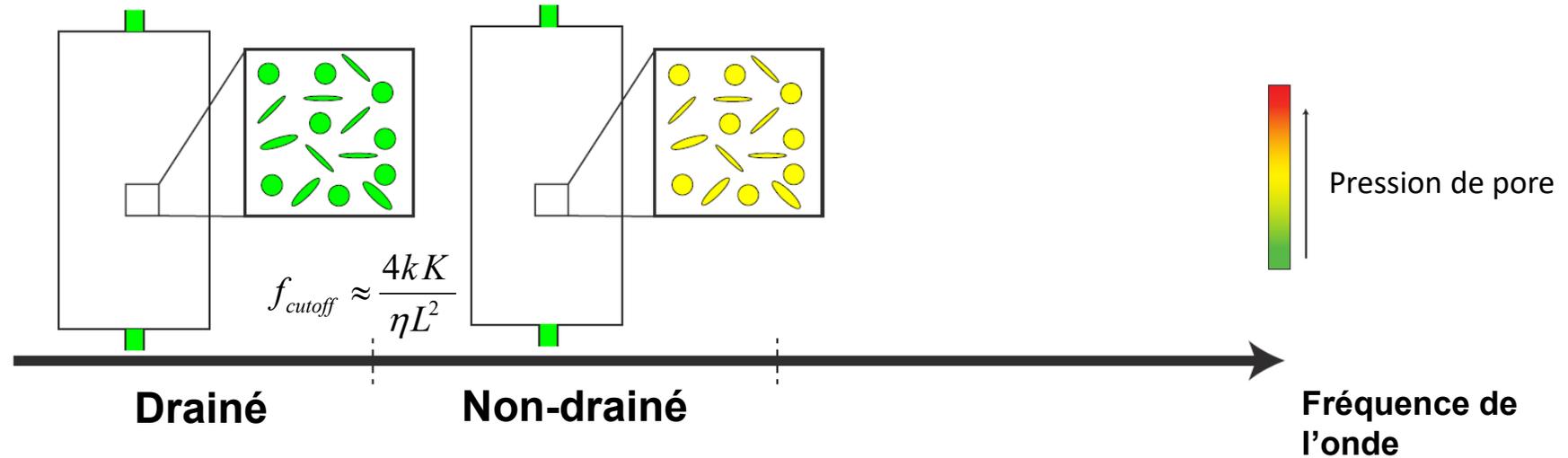


Très basse fréquence : **régime drainé**

→ 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



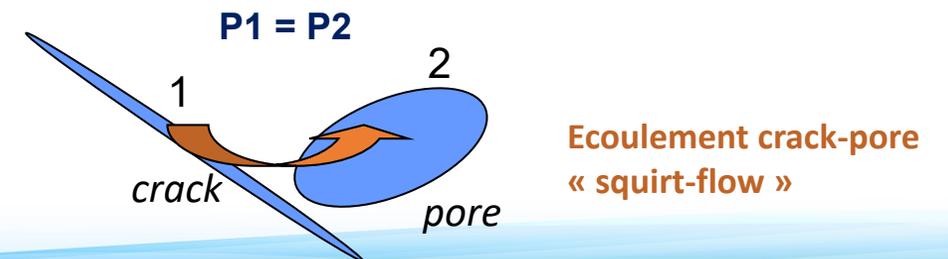
Très basse fréquence : **régime drainé**

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

Fréquence intermédiaire : **régime non-drainé**

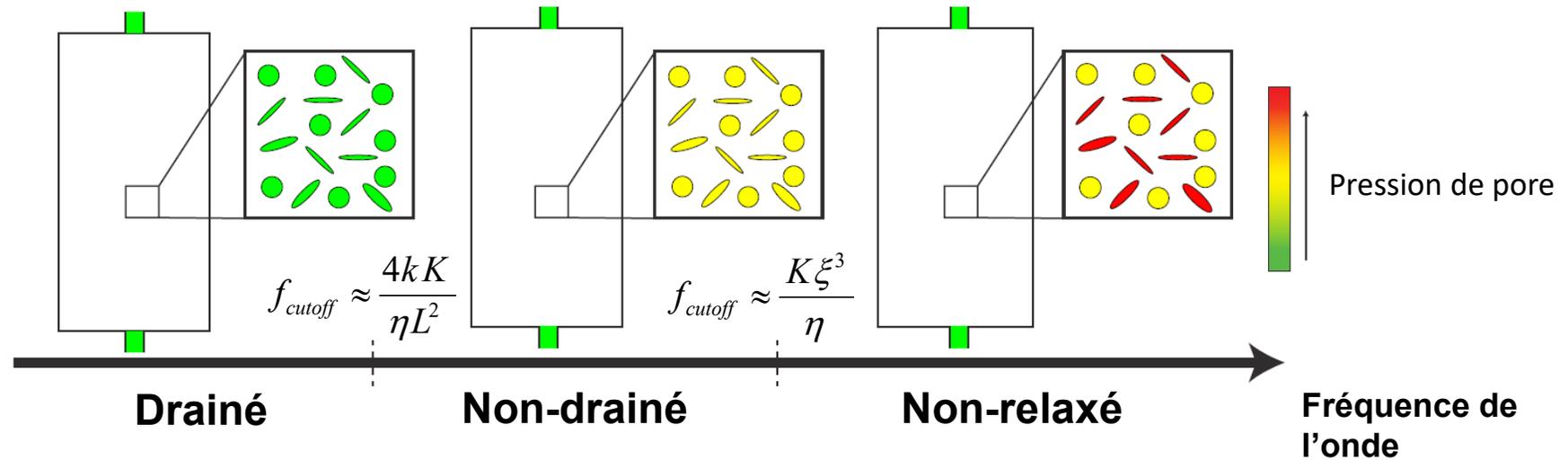
→ P_p localement uniforme, mais varie au passage de l'onde

→ 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

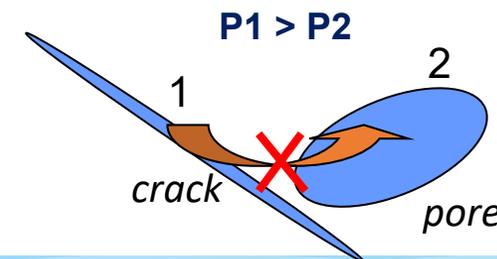
→ Cadre de la **poroélasticité** (e.g. **Biot-Gassmann**)

Haute fréquence: **régime non-relaxé**

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

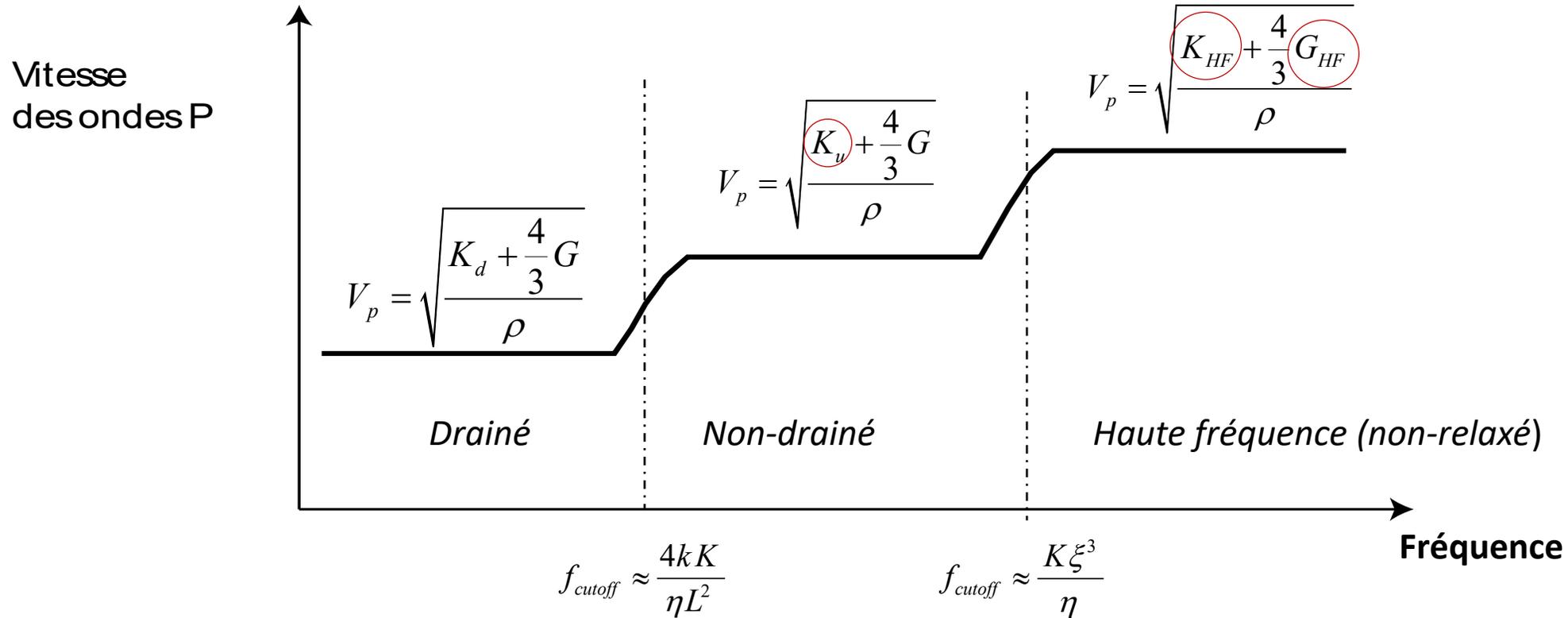
→ Incompatible avec la poroelasticité

→ 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)

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

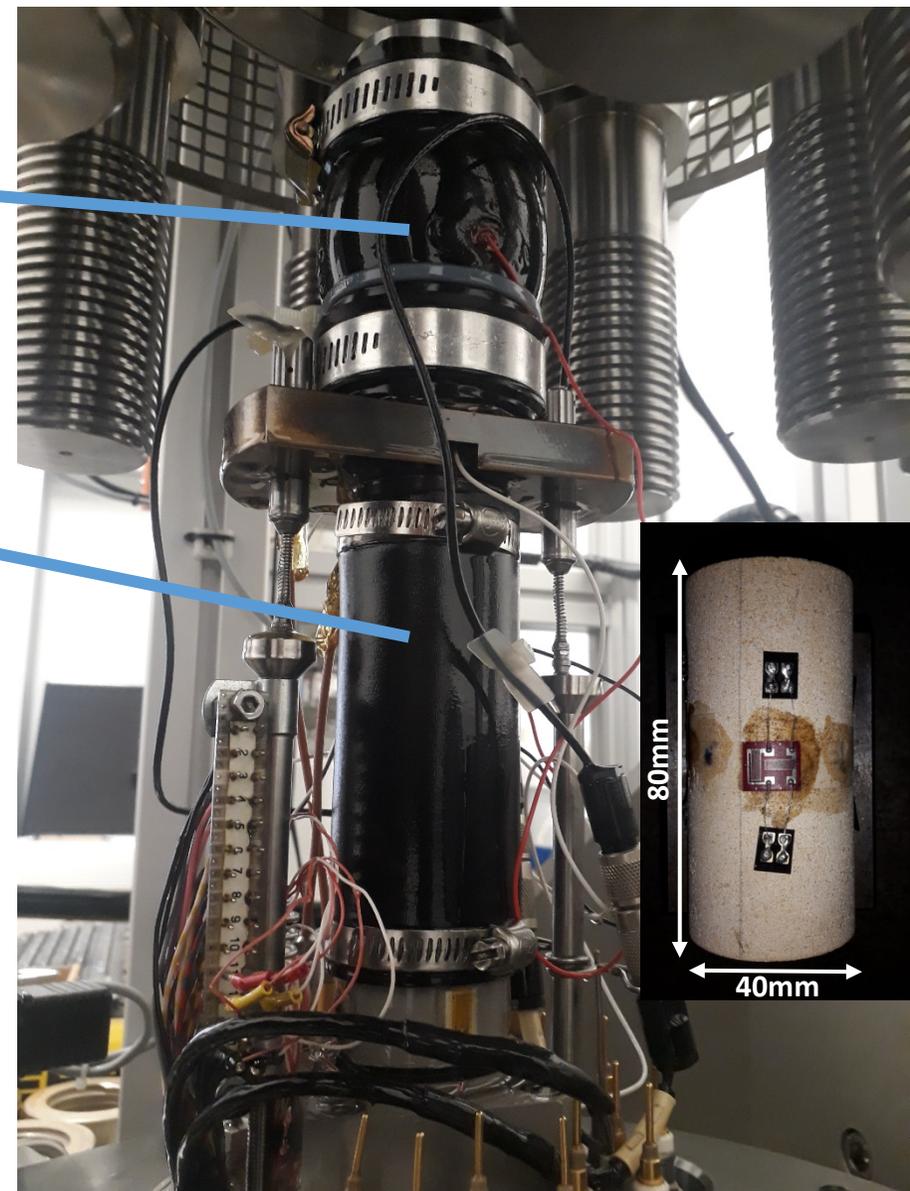
Méthode expérimentale



 **TOP INDUSTRIE**
La Technologie Haute Pression

OSCILLATEUR
PIEZOELECTRIQUE

ECHANTILLON

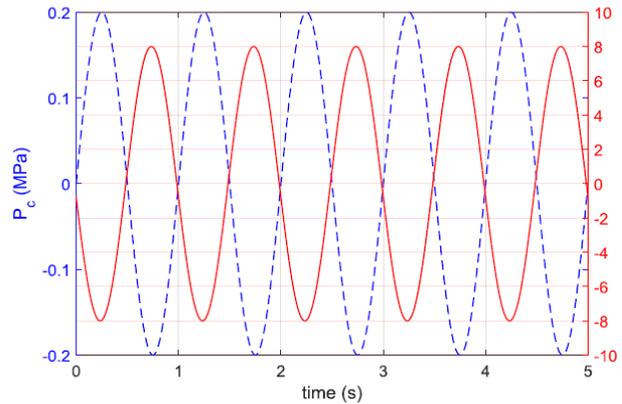


- ❑ Technique des **oscillations forcées** – Basses fréquences
 - **Axiales** = Young (E) et Poisson (ν), $f = [0,01-100]$ Hz
 - **Hydrostatiques** = Module incompressibilité (K), $f = [0,001-1]$ Hz
- ❑ Mesures **ultrasoniques** – Haute fréquence (1 MHz)
- ❑ Sous **pression effective (0-30 MPa)**, avec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

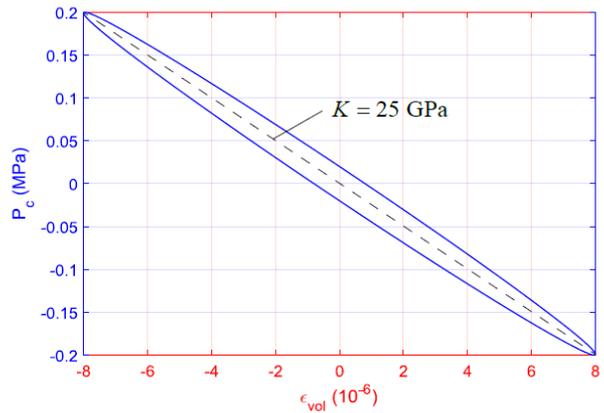
Méthode expérimentale

Module d'incompressibilité

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



Oscillations hydrostatiques

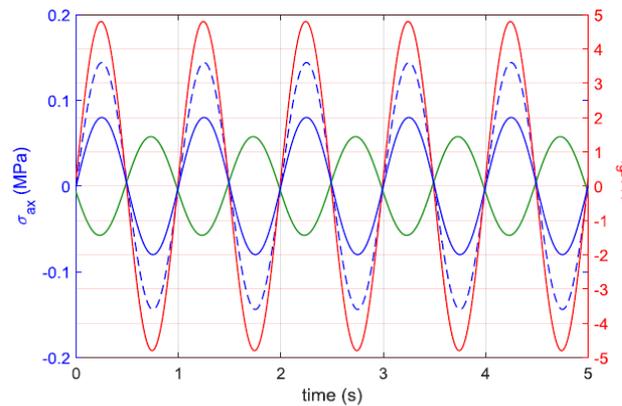


Module de Young

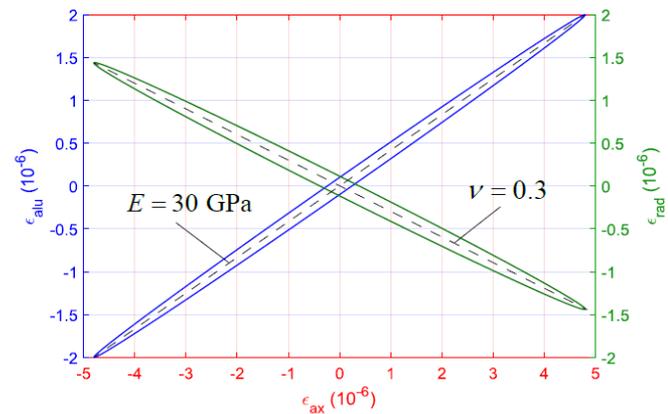
$$E = \frac{\Delta \sigma_{ax}}{\epsilon_{ax}}$$

Coefficient de Poisson

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

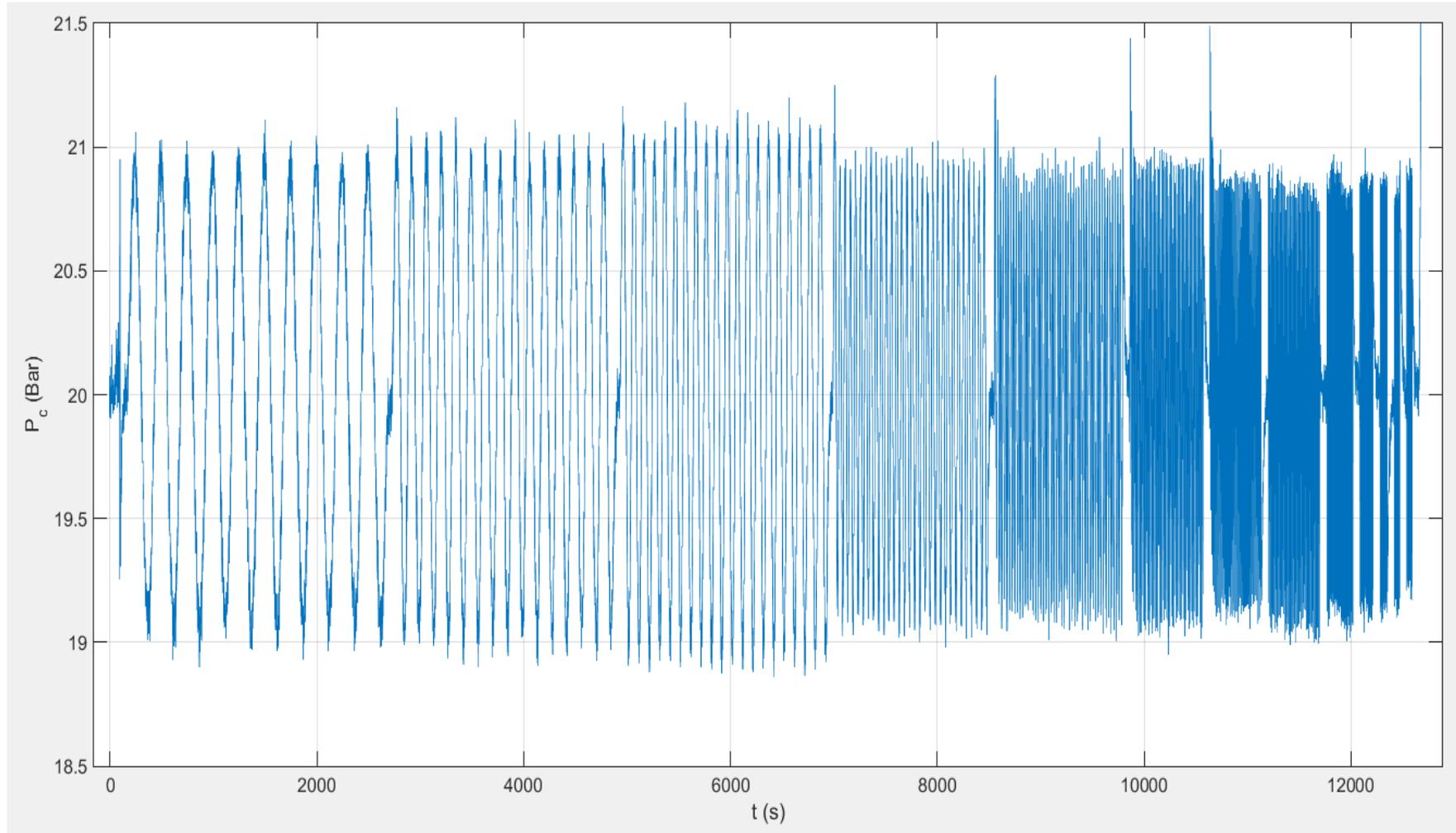


Oscillations axiales

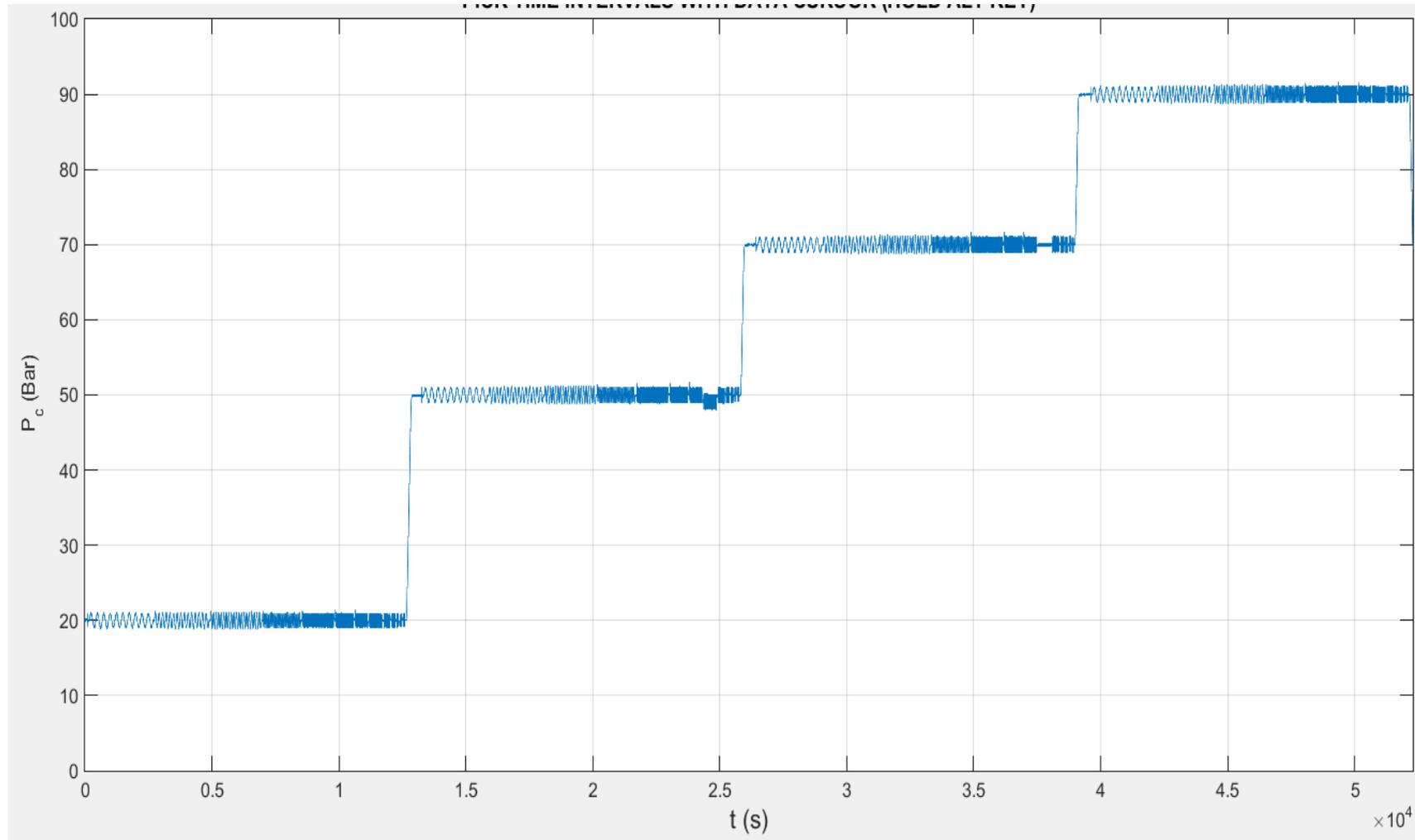


 Les déformations doivent être de l'ordre de 10^{-6} (déformation purement élastique)

Méthode expérimentale



Méthode expérimentale



Méthode expérimentale

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

Dispersion d'un module \longrightarrow Atténuation

$$\sigma = M \varepsilon$$

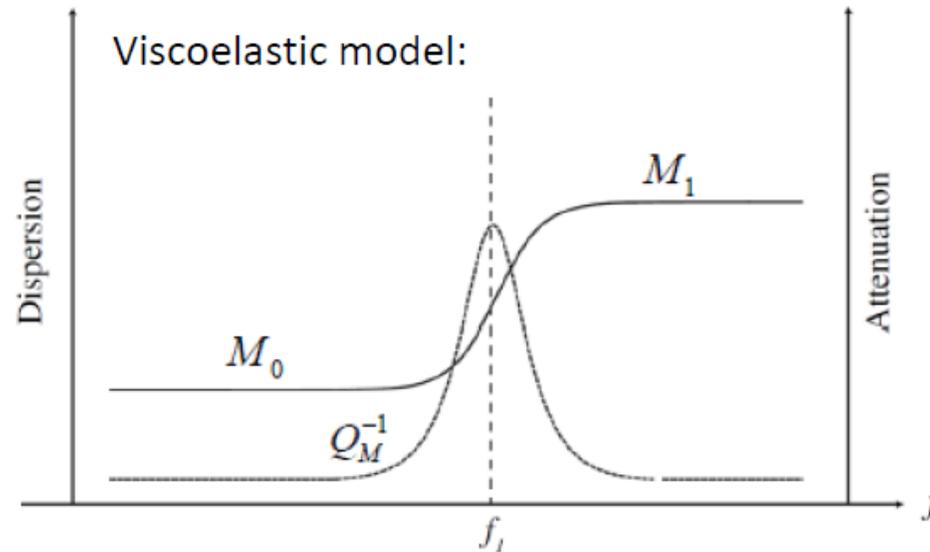
$$M(\omega)$$

$$Q_M^{-1}$$

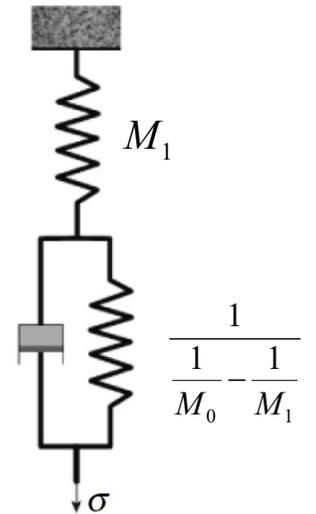
Q : facteur de qualité

« Atténuation »

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



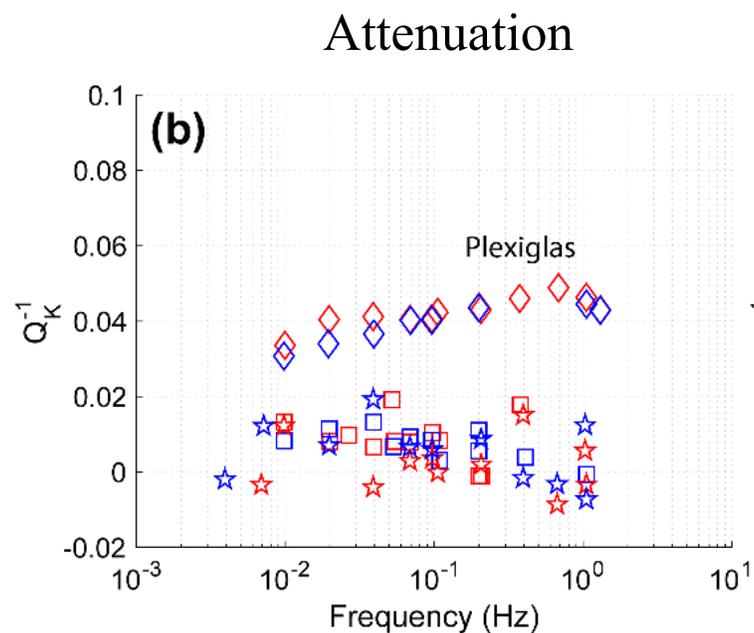
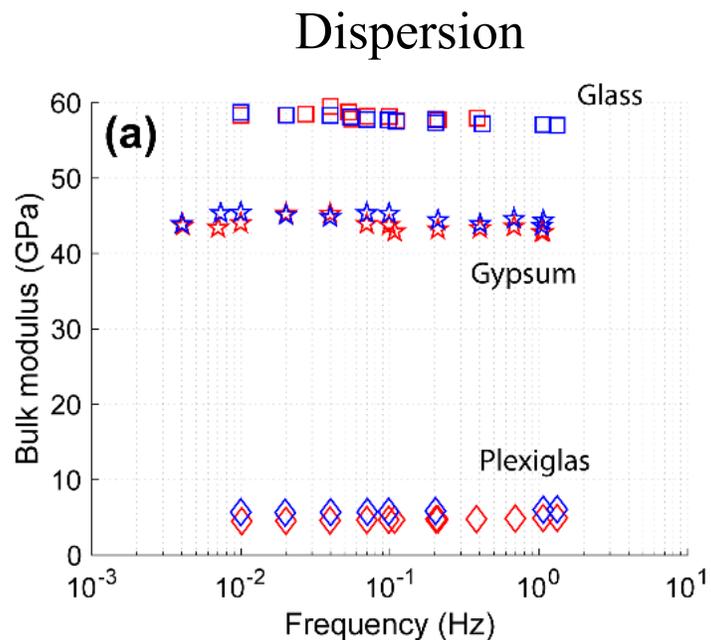
Modèle de Zener



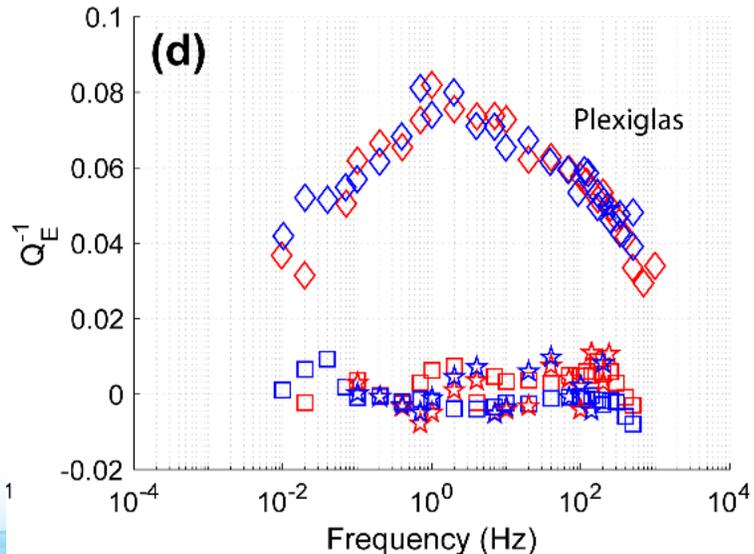
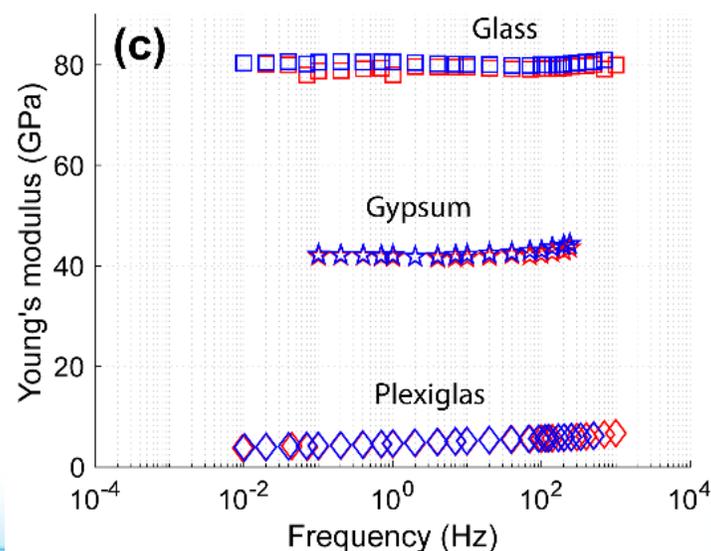
Méthode expérimentale

Calibrations

Oscillations
hydrostatiques



Oscillations
axiales

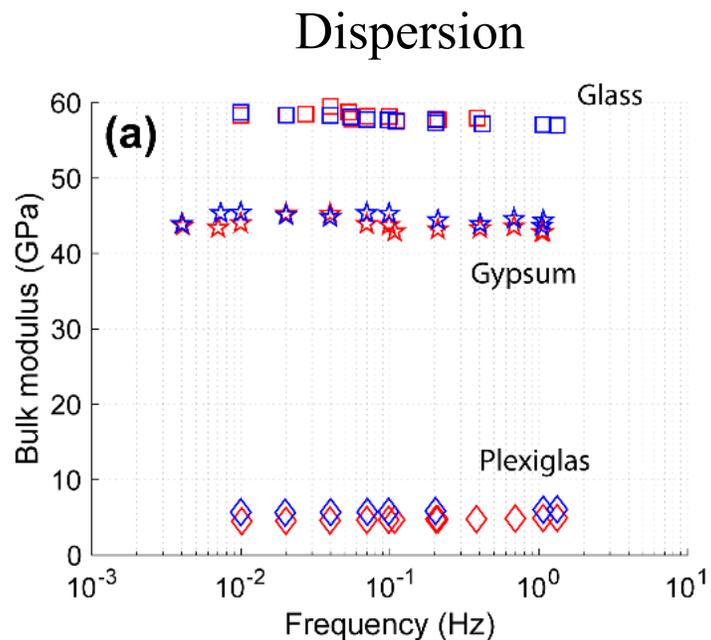


- ◇ Plexiglas $P_c = 5$ MPa
- ◇ Plexiglas $P_c = 30$ MPa
- Glass $P_c = 5$ MPa
- Glass $P_c = 30$ MPa
- ☆ Gypsum $P_c = 5$ MPa
- ☆ Gypsum $P_c = 30$ MPa

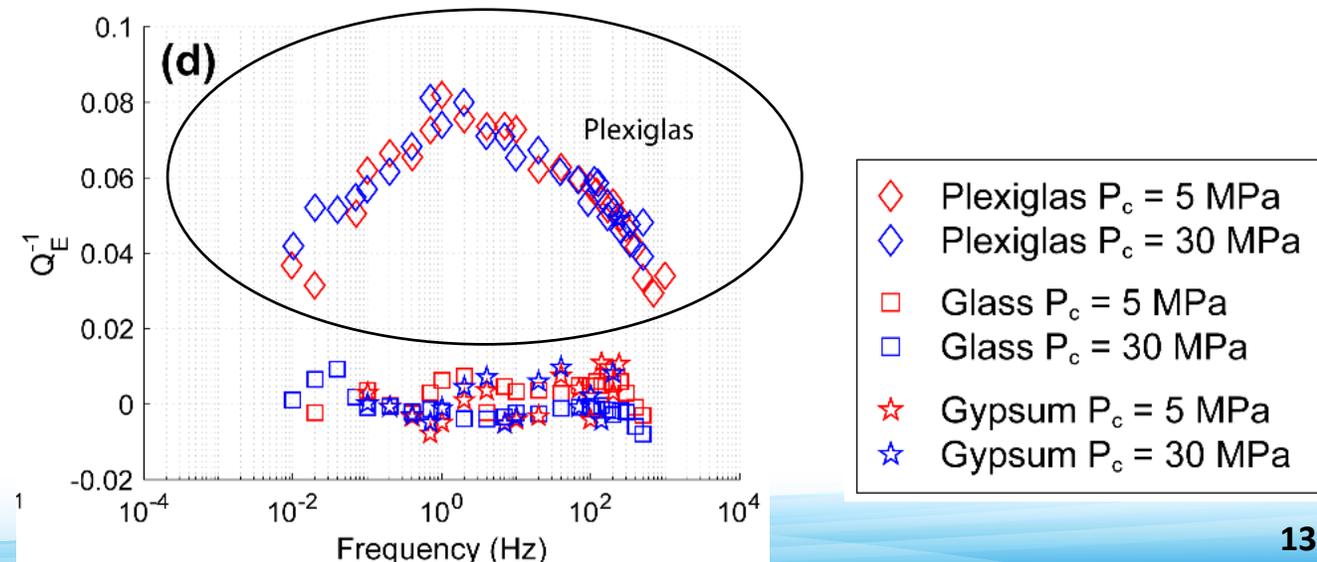
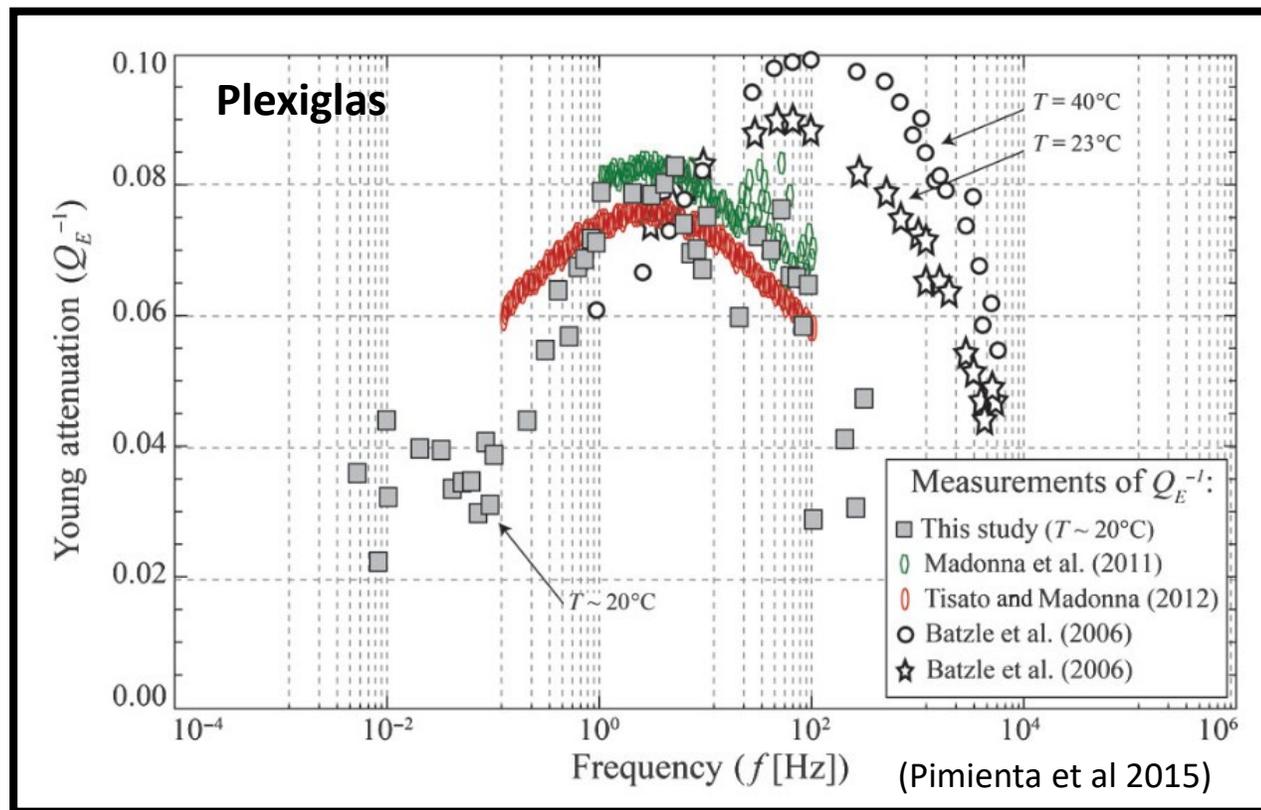
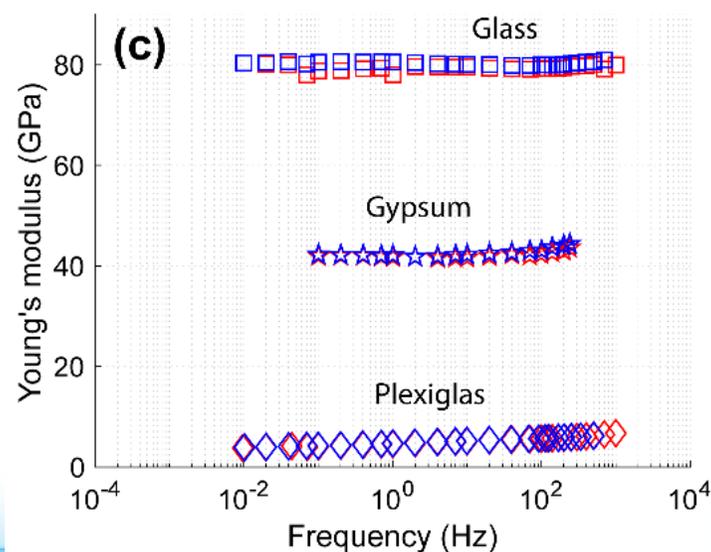
Méthode expérimentale

Calibrations

Oscillations
hydrostatiques



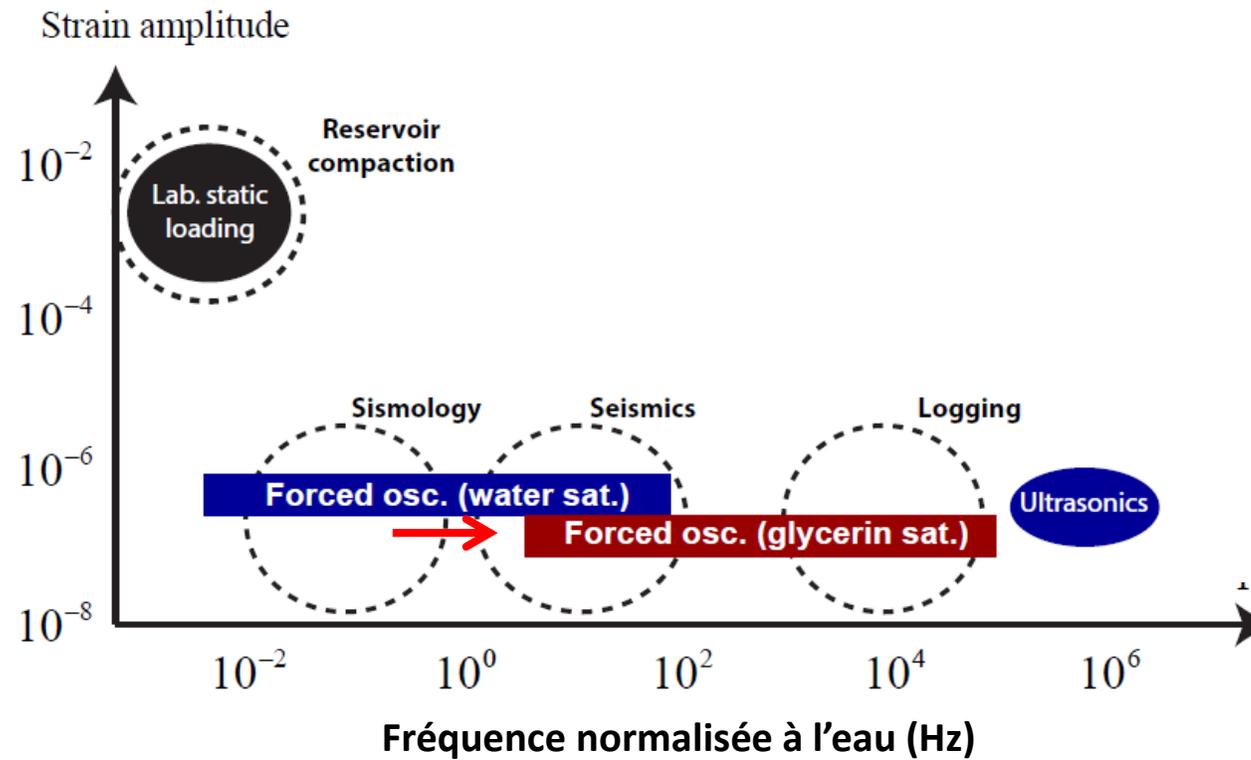
Oscillations
axiales



Méthode expérimentale

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

Saturations : Sec, **Glycérine**, Eau



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

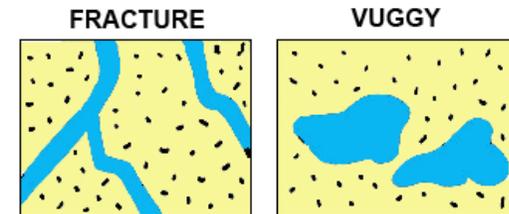
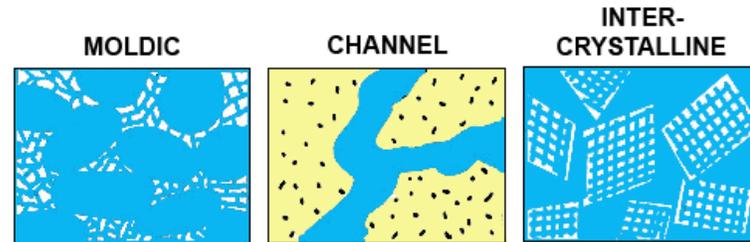
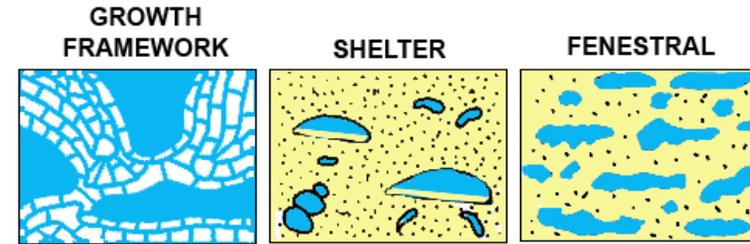
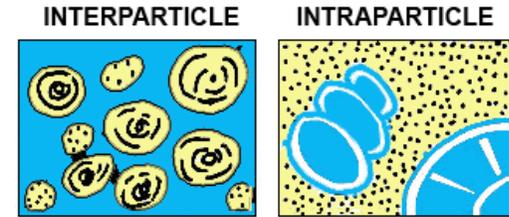
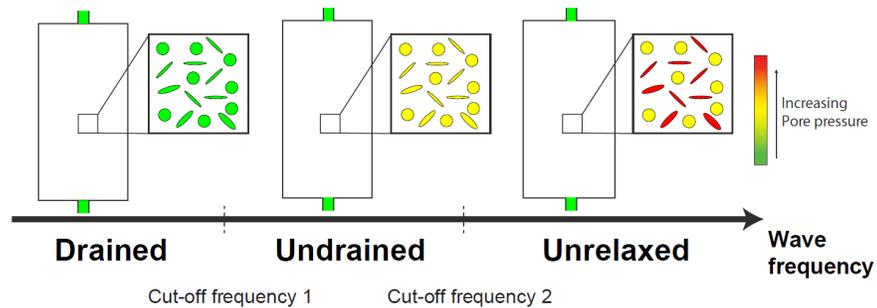
$$f^* = f \times \frac{\eta_{fluid}}{\eta_{water}}$$

Carbonates

Microstructures complexes et hétérogènes



Effet de fréquence lié au fluide ?

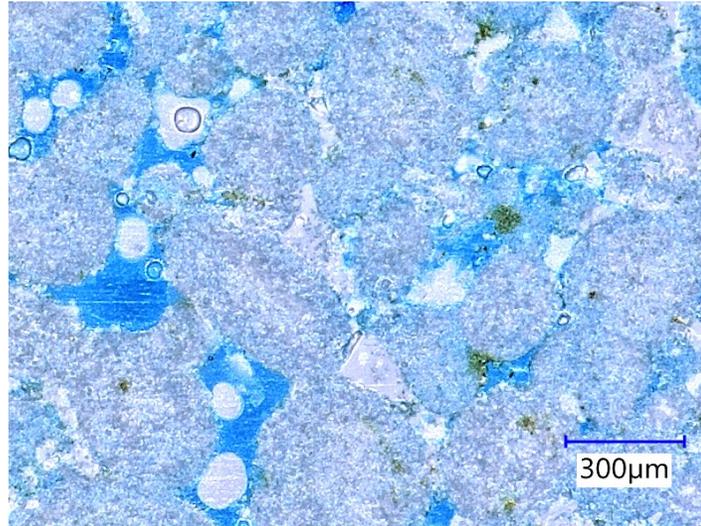
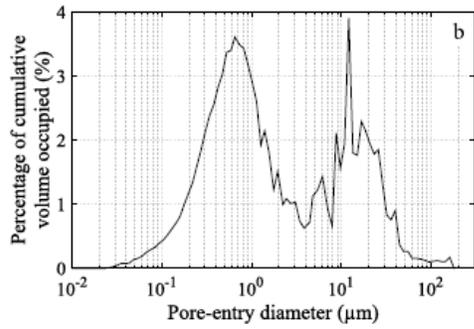


Choquette & Pray 1979

Carbonates

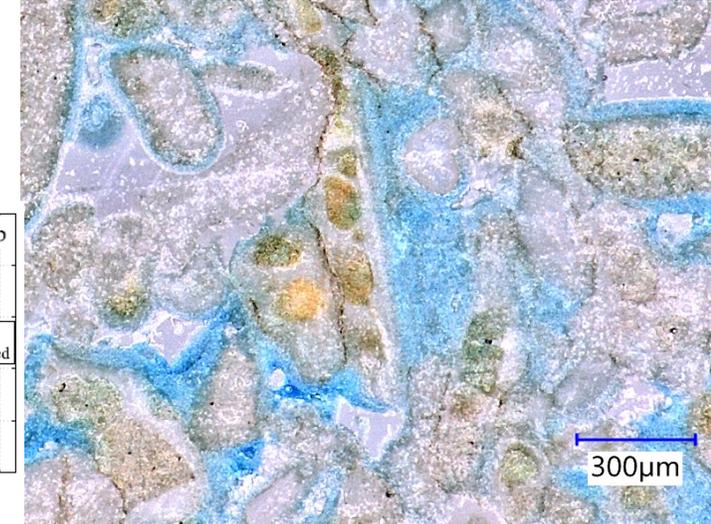
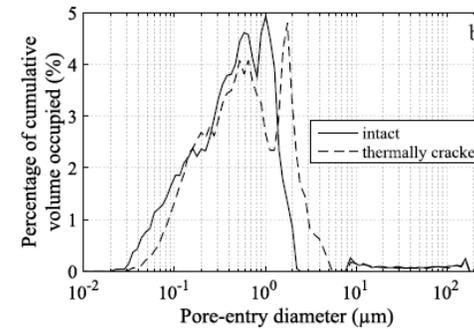
Calcaire oolitique de Lavoux

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



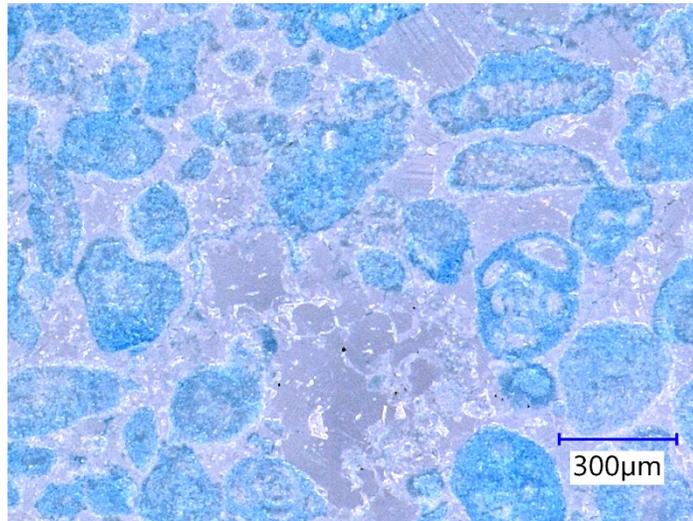
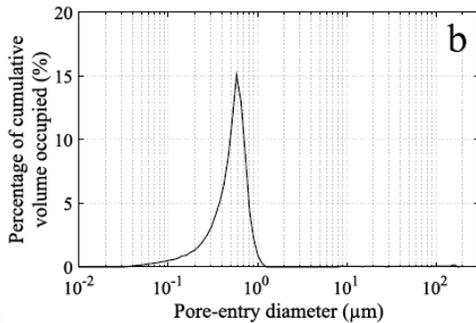
Calcaire bioclastique de Indiana

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



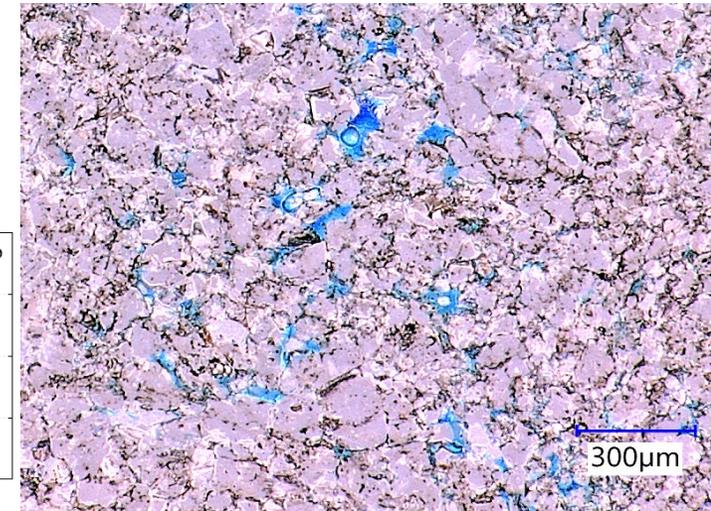
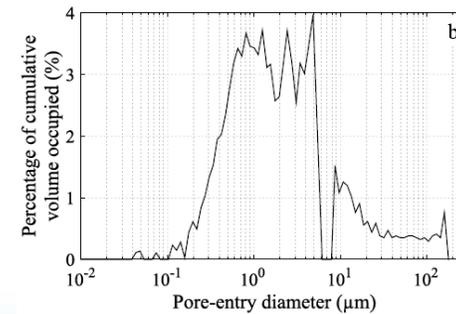
Calcaire à rudistes de Rustrel (Urgonien de Provence)

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



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

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

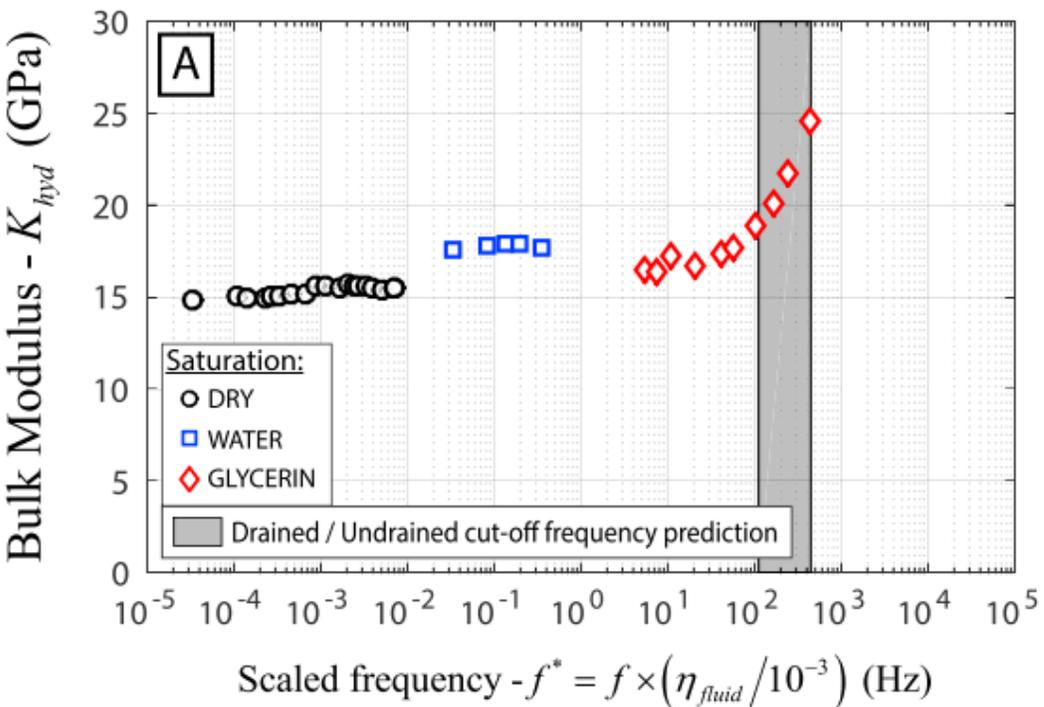


Résultats expérimentaux

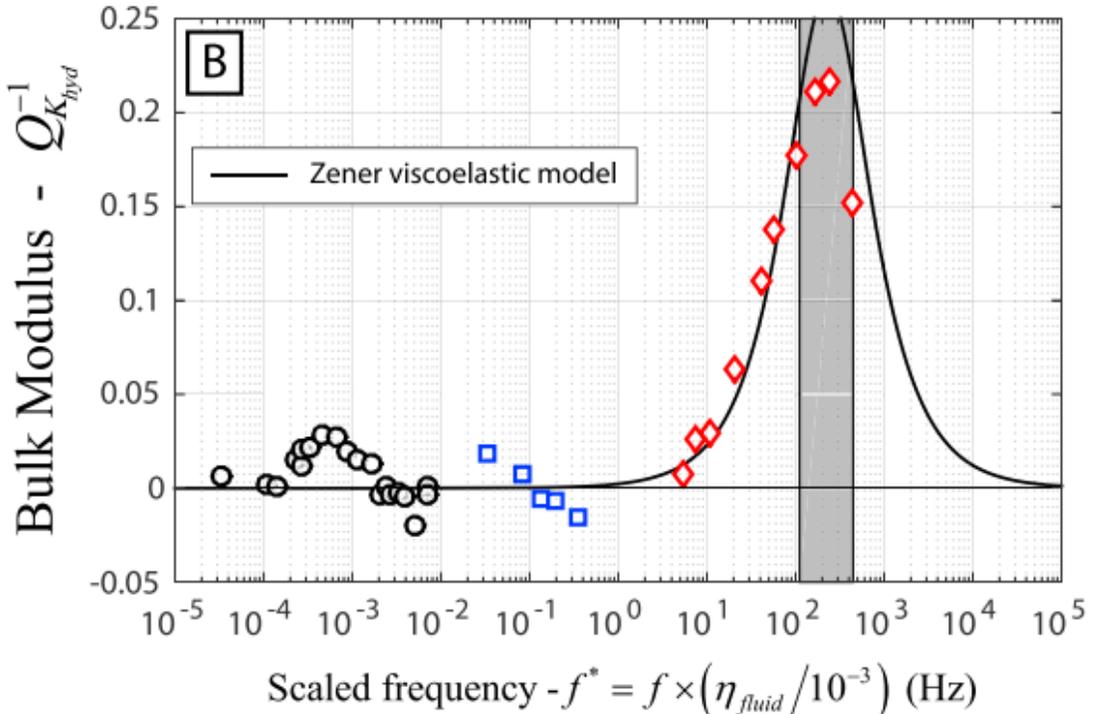
Calcaire oolitique de Lavoux

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

Dispersion



Attenuation



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

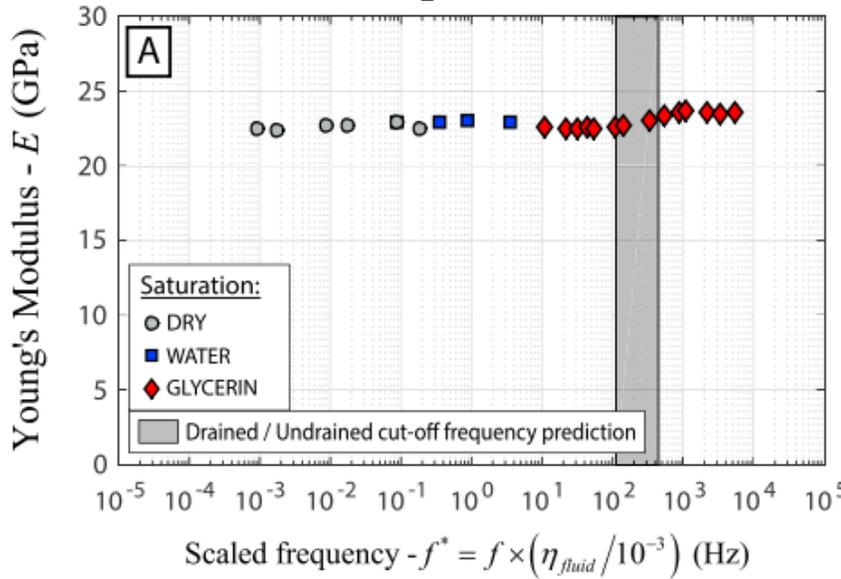
Borgomano et al., 2017

Résultats expérimentaux

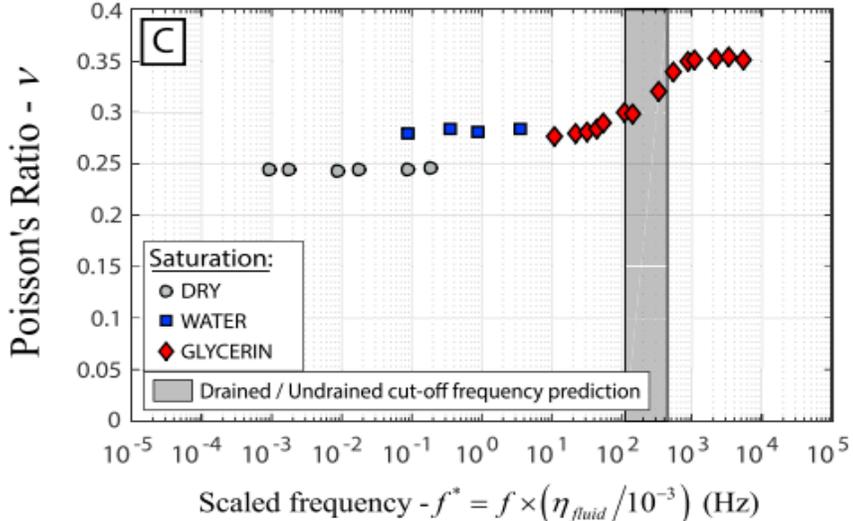
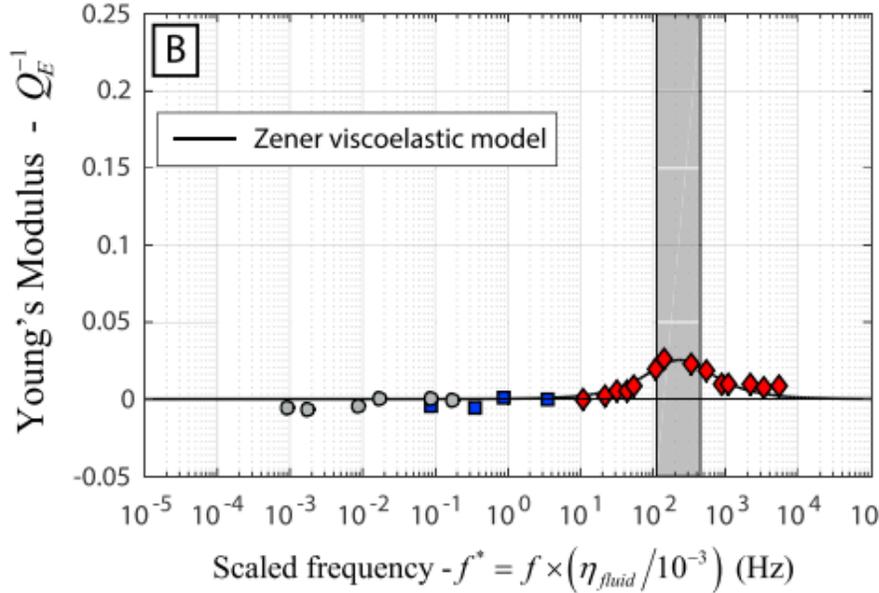
Calcaire oolitique de Lavoux

Oscillations axiales – Peff = 2,5 MPa

Dispersion



Attenuation

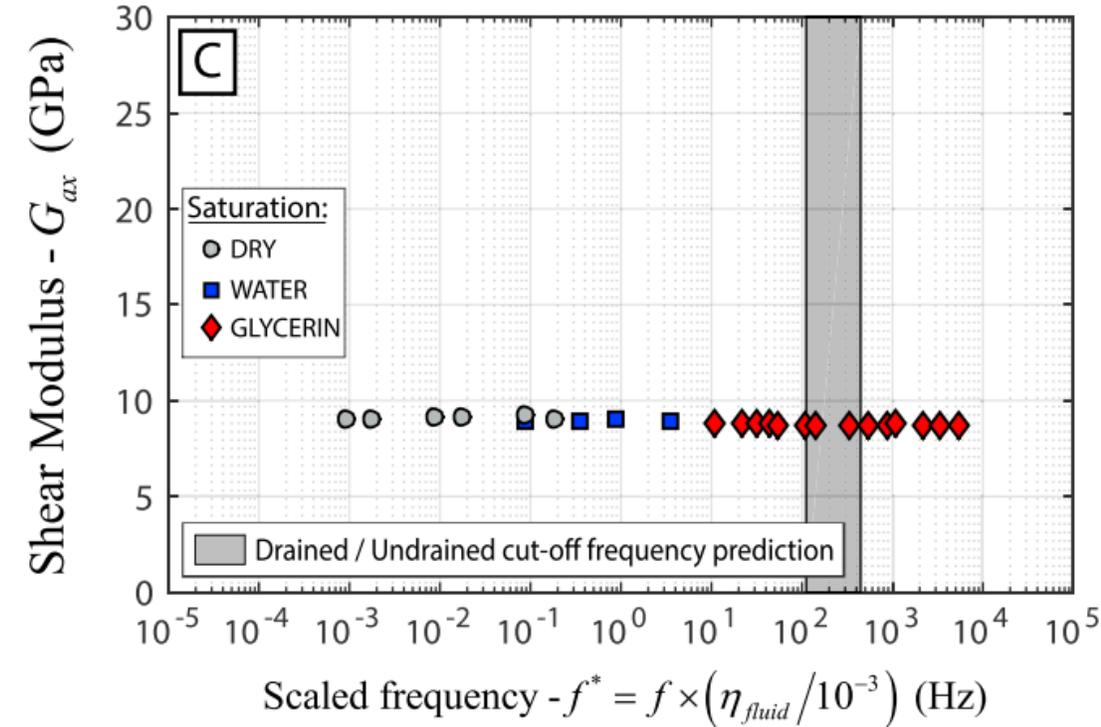
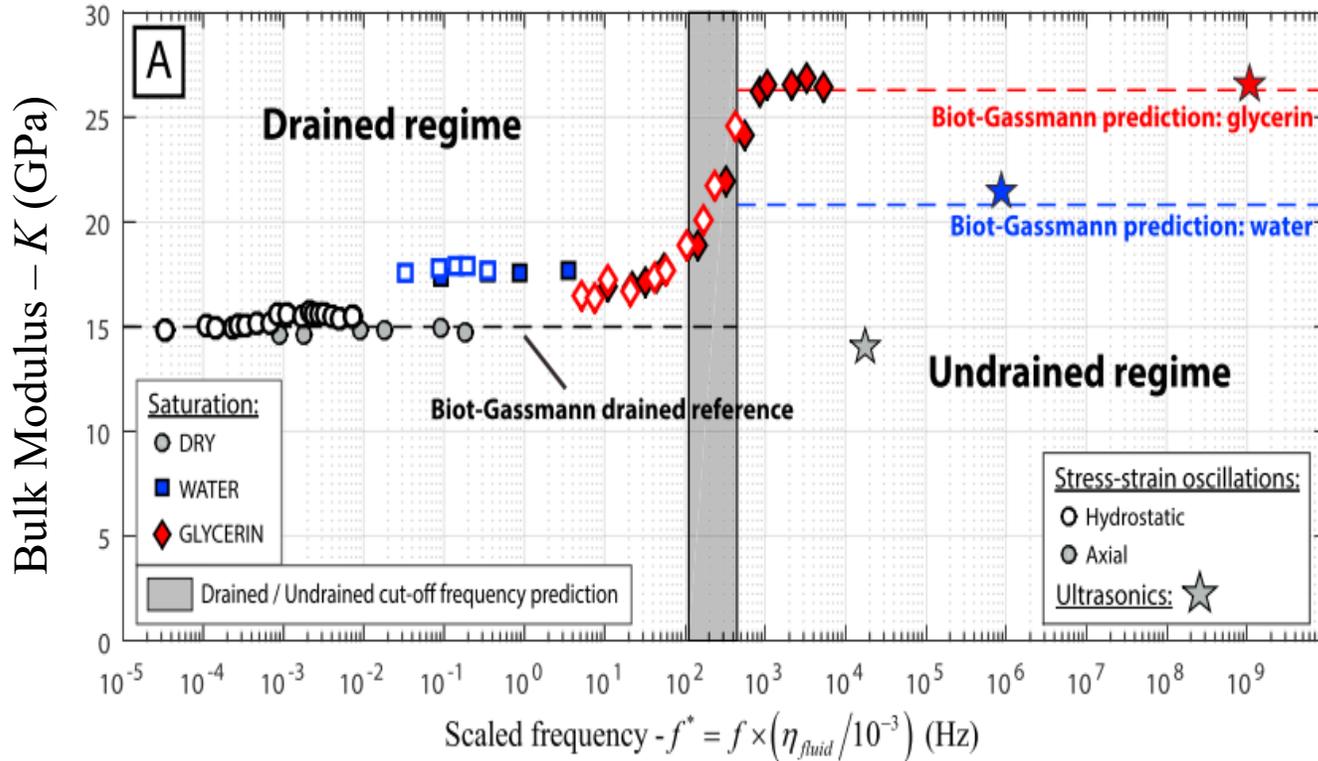


Borgomano et al., 2017

Résultats expérimentaux

Calcaire oolitique de Lavoux

Oscillations hydrostatiques + axiales – Peff = 2,5 MPa



Biot-Gassmann:

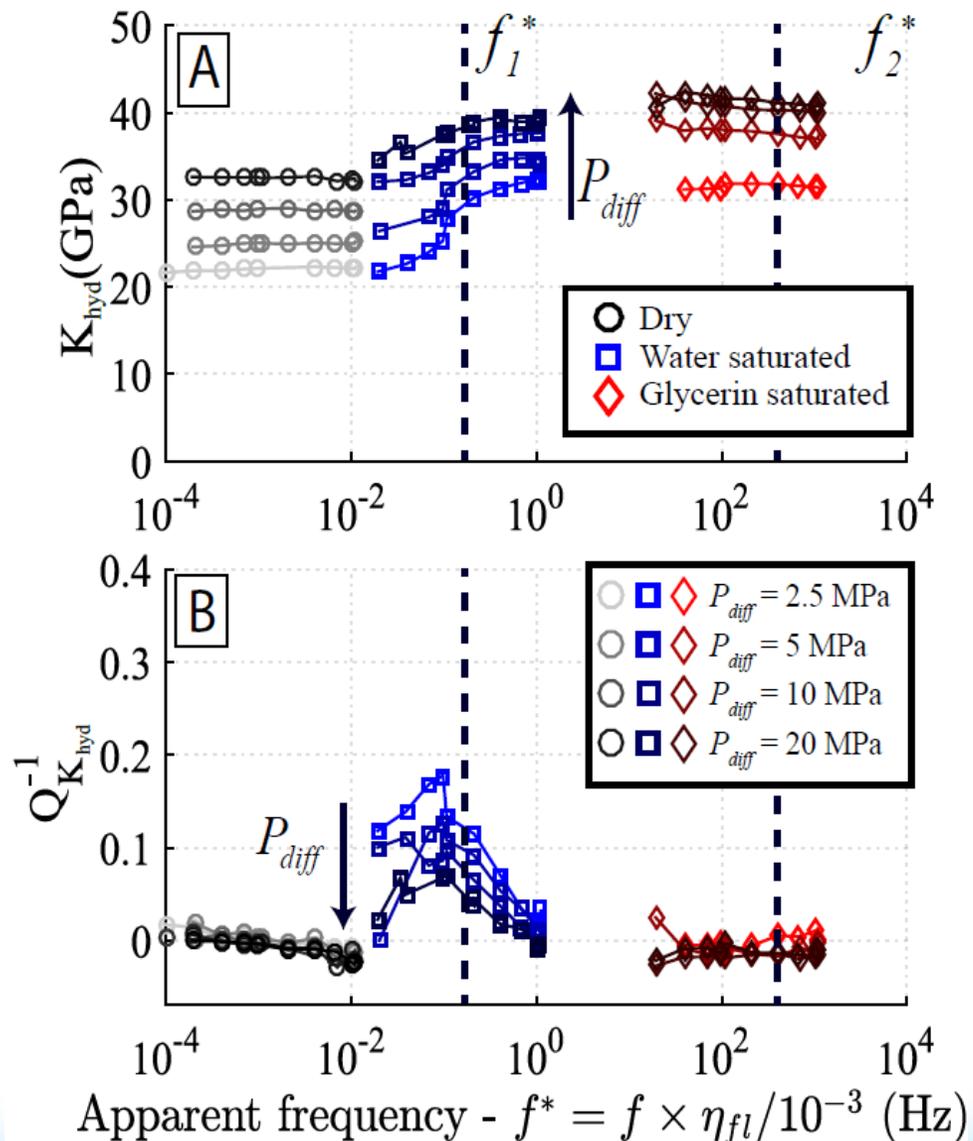
$$K_u = K_d + \frac{K_f \left(1 - \frac{K_d}{K_s}\right)^2}{\Phi + \left(\left(1 - \frac{K_d}{K_s}\right) - \Phi\right) \frac{K_f}{K_s}} \quad \text{and} \quad G_u = G_d,$$

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

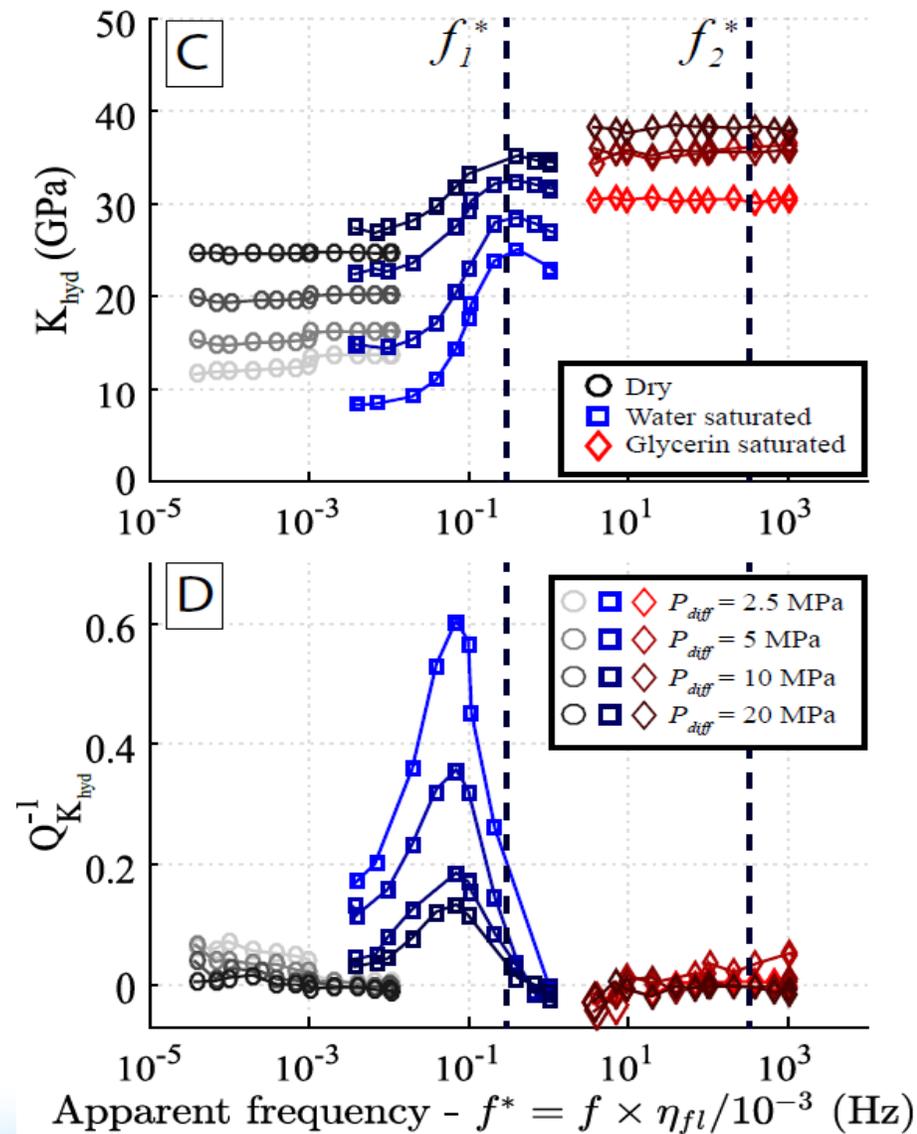
Borgomano et al., 2017

Résultats expérimentaux

Calcaire bioclastique de Indiana



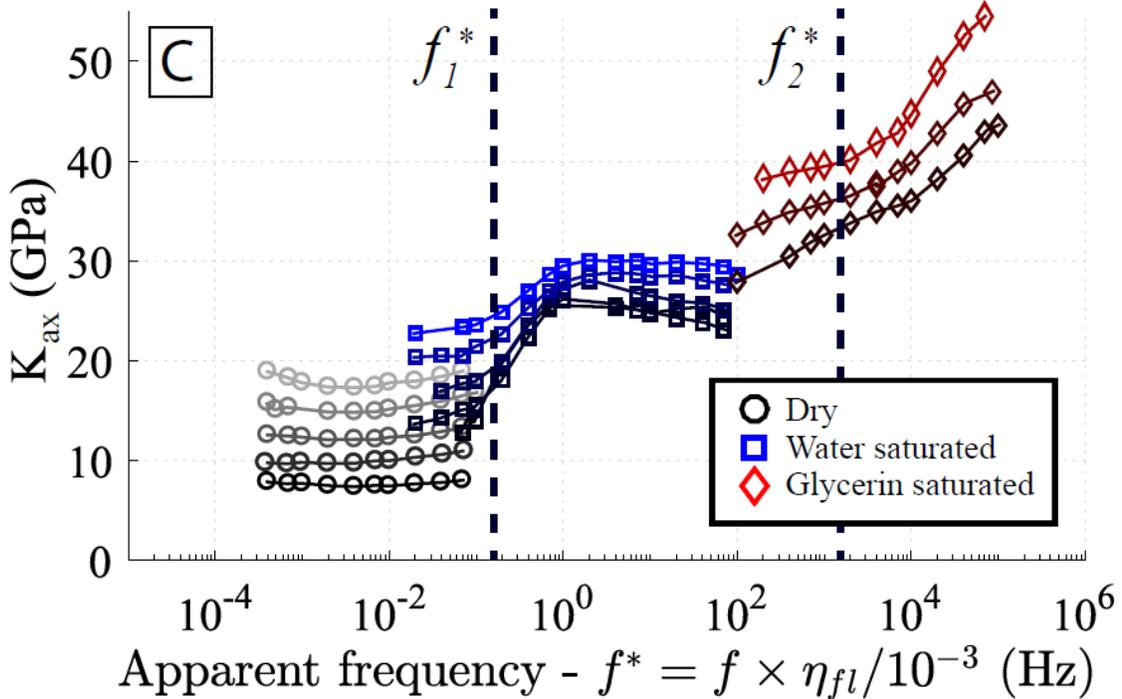
Calcaire à rudistes de Rustrel



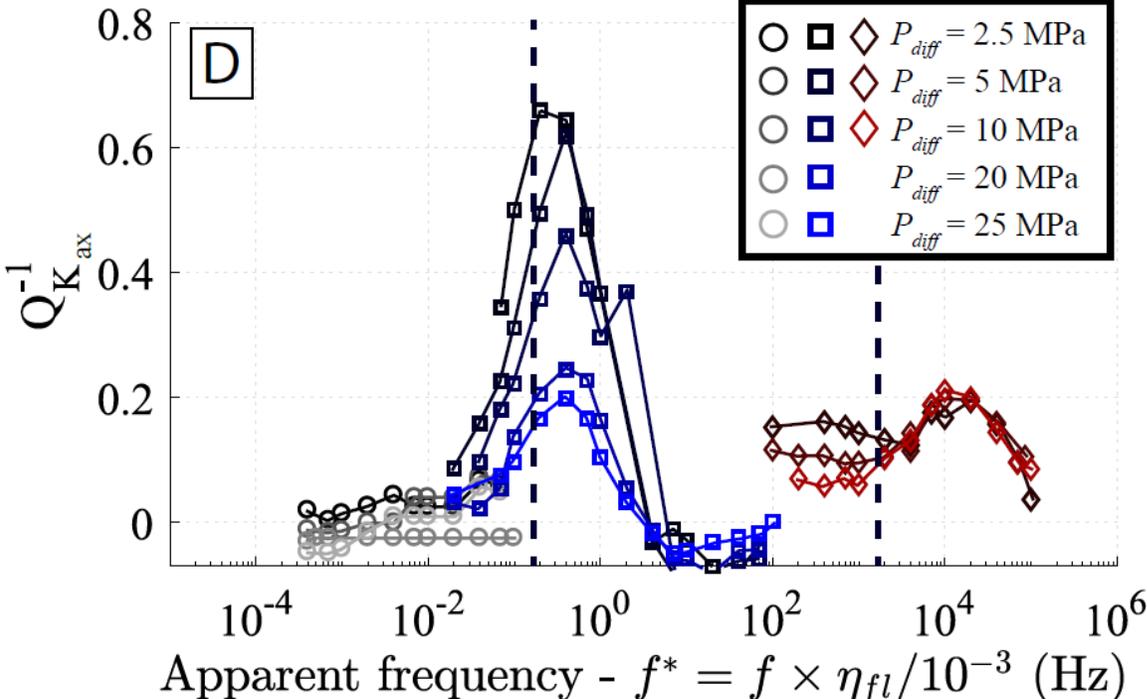
Résultats expérimentaux

Coquina « pré-sel »

Dispersion



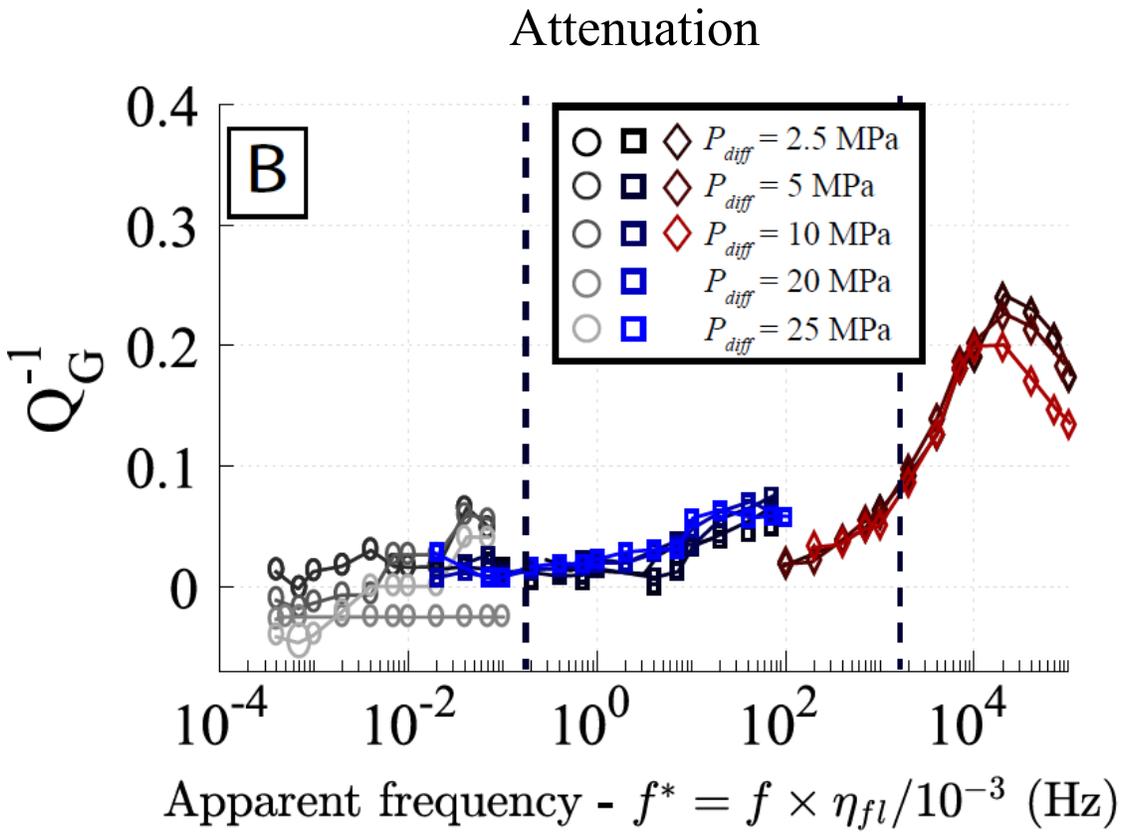
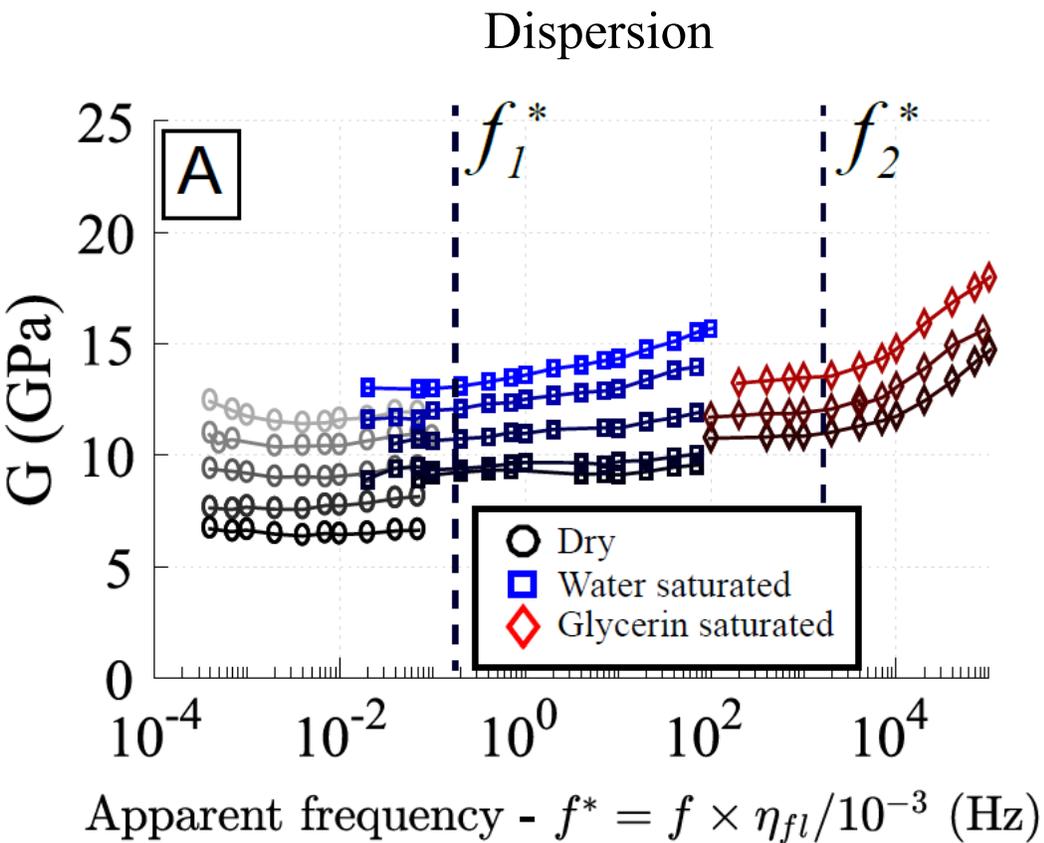
Attenuation



Borgomano et al., 2019

Résultats expérimentaux

Coquina « pré-sel »

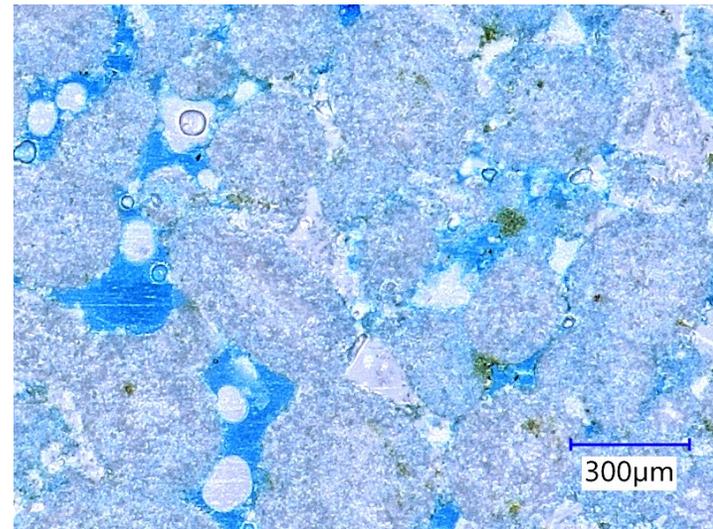
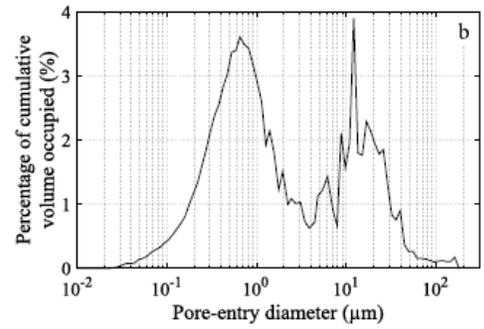


Borgomano et al., 2019

Résultats expérimentaux

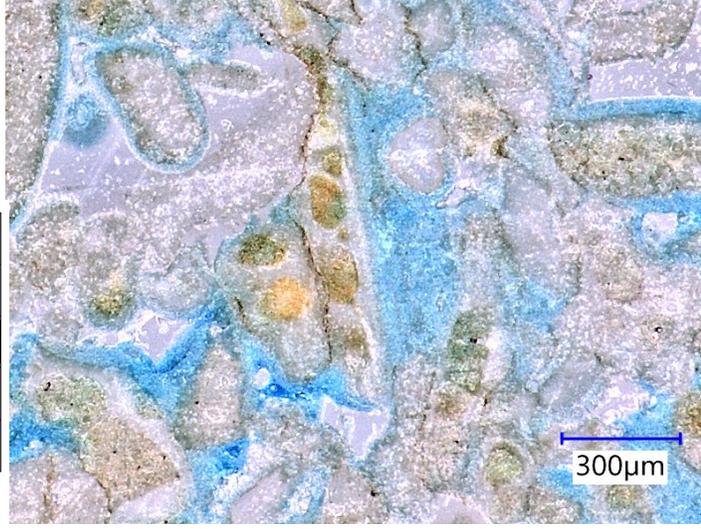
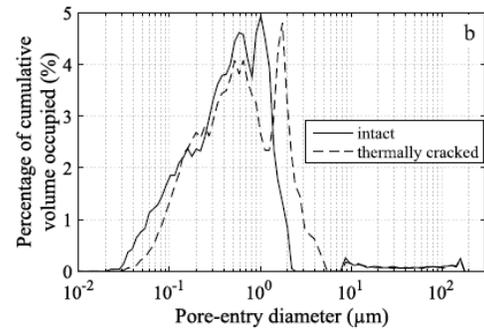
Calcaire oolitique de Lavoux

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



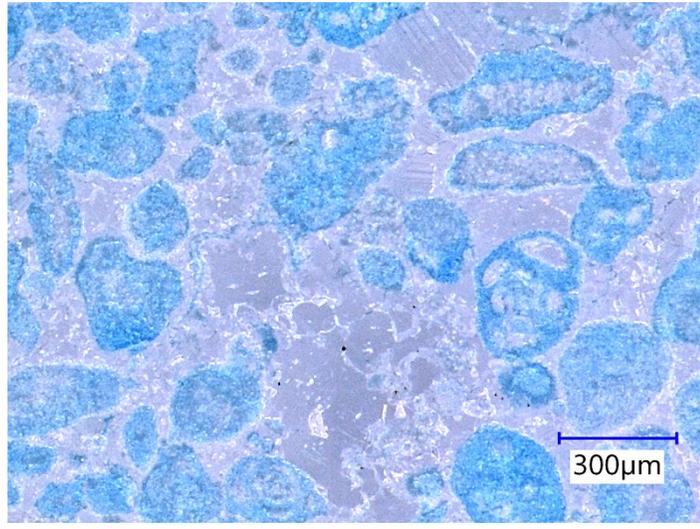
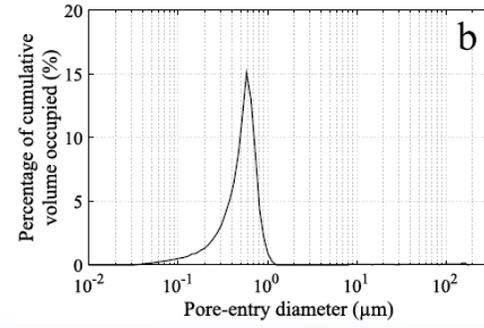
Calcaire bioclastique de Indiana

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



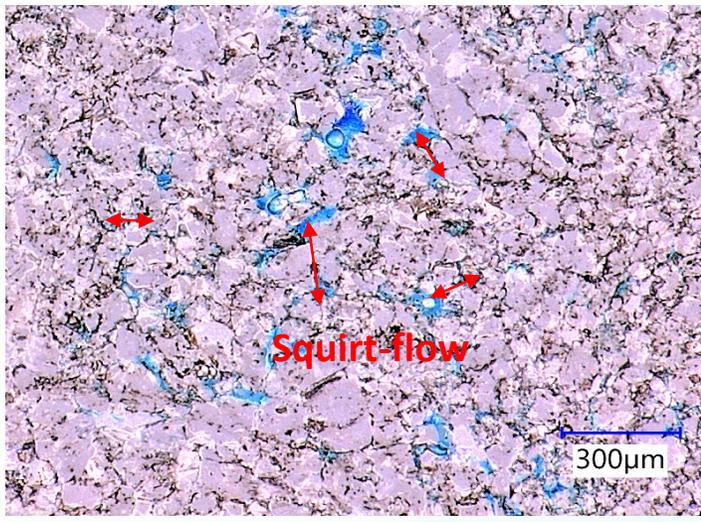
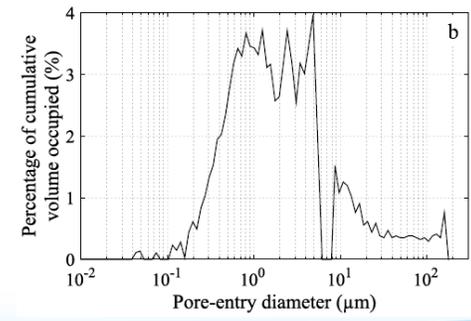
Calcaire à rudistes de Rustrel (Urgonien de Provence)

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



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

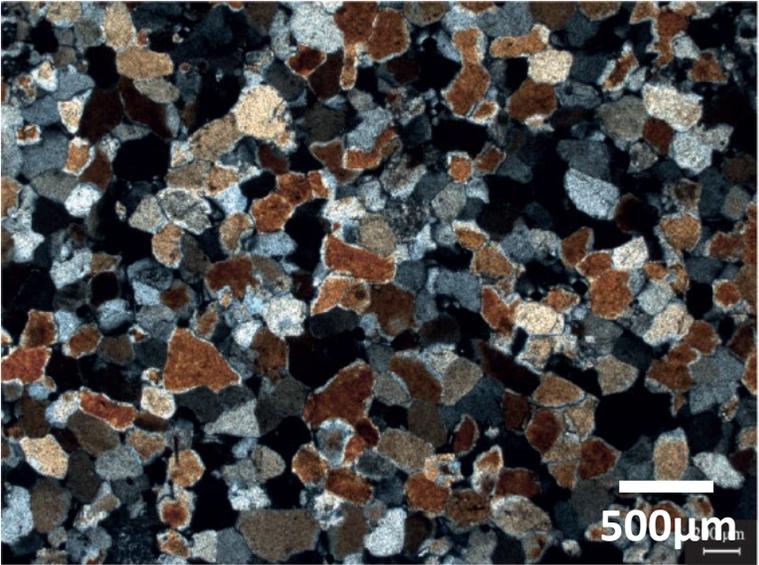
$\Phi = 7.5\%$
 $k = 0.05 \text{ mD}$



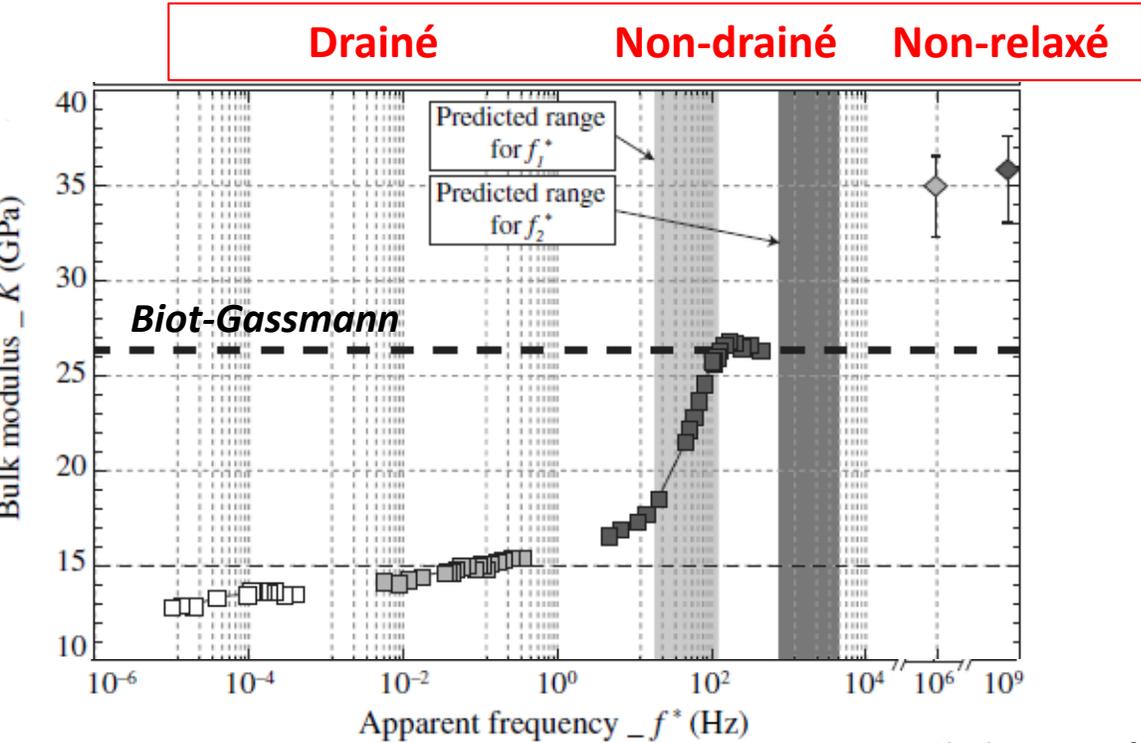
Résultats expérimentaux

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



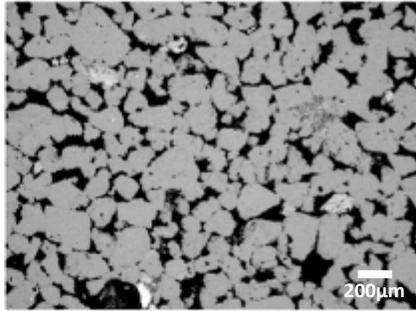
Mécanisme de « squirt-flow »

Résultats expérimentaux

Dispersion dans les grès

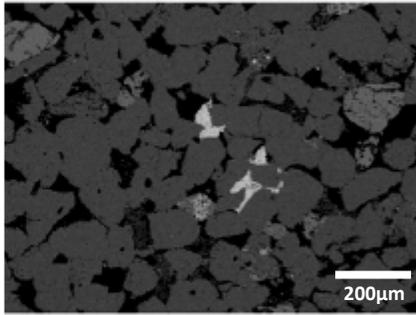
Bentheim
Sandstone

Porosité 25%
Permeabilité 500 mD



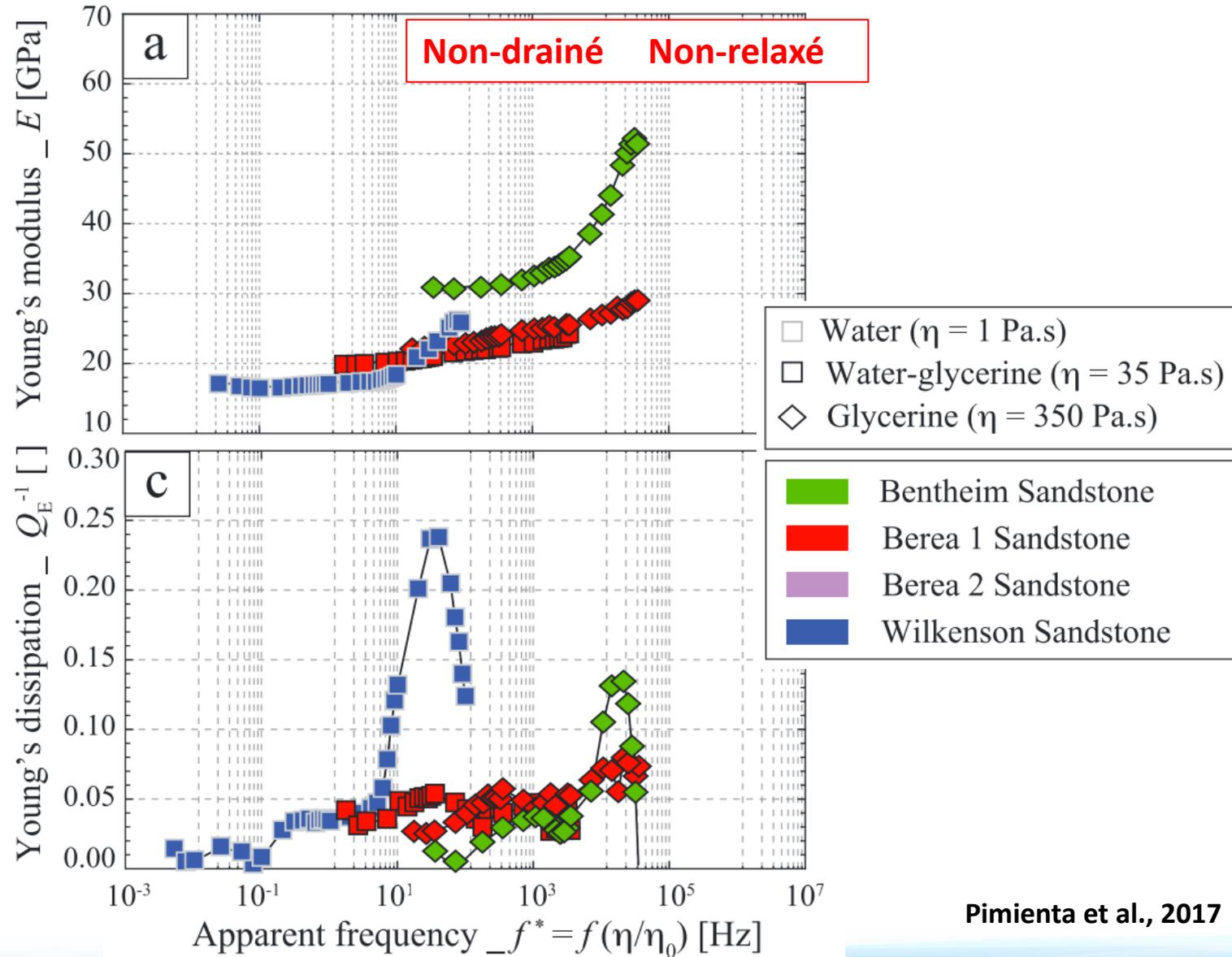
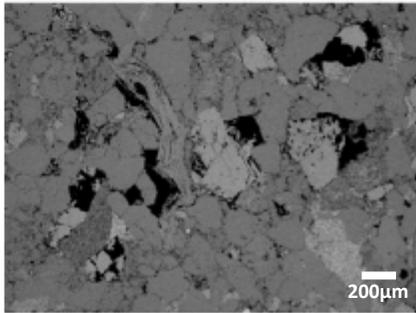
Berea
Sandstone

Porosité 22%
Permeabilité 20 mD



Wilkinson
Sandstone

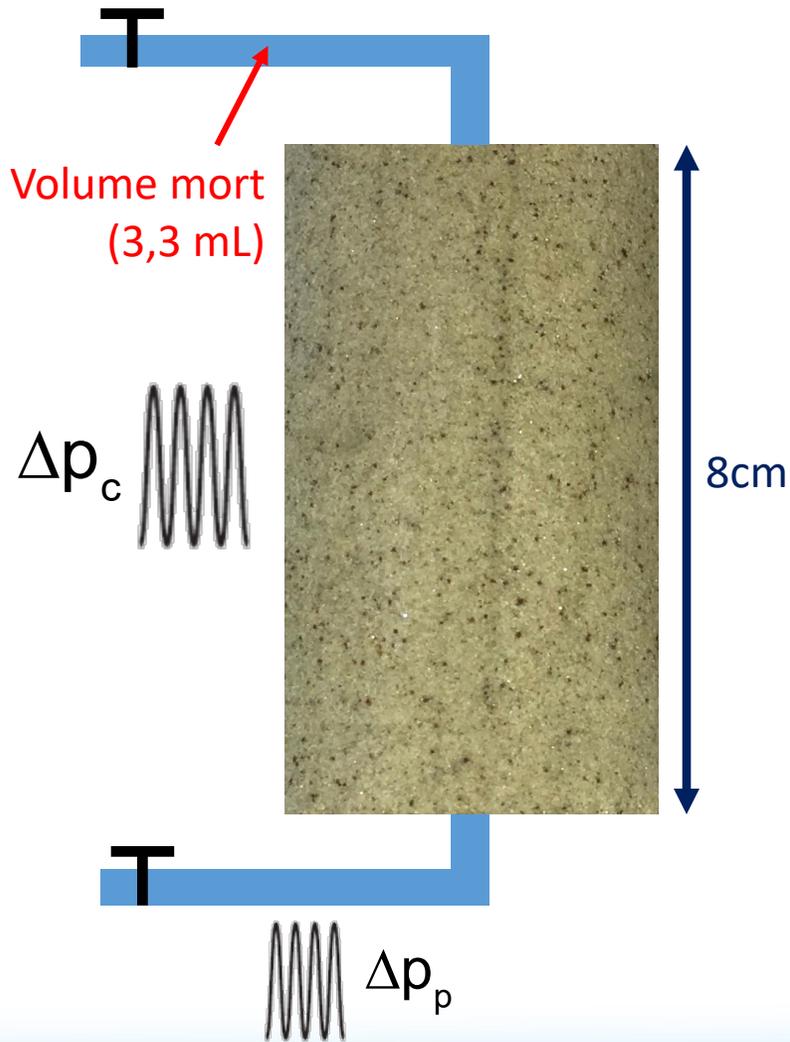
Porosité 10%
Permeabilité 3e-3 mD



Pimienta et al., 2017

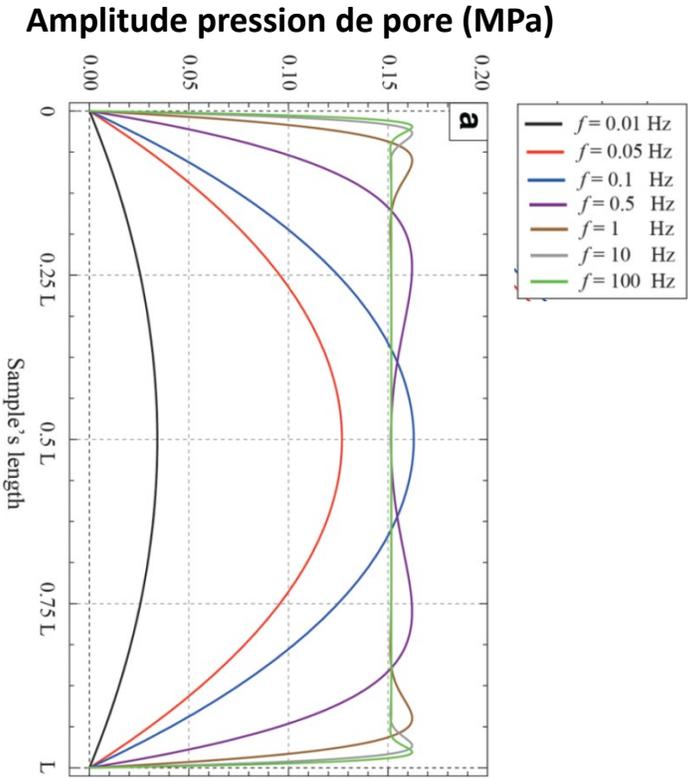
Transition drainé / non-drainé

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

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

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

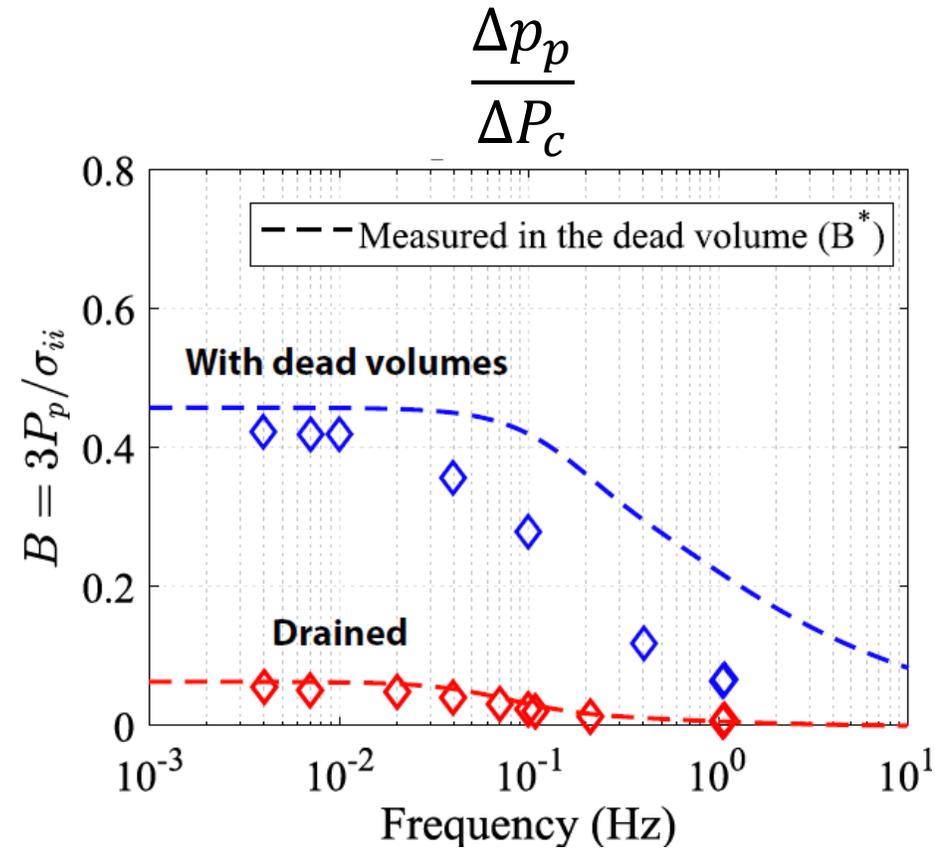
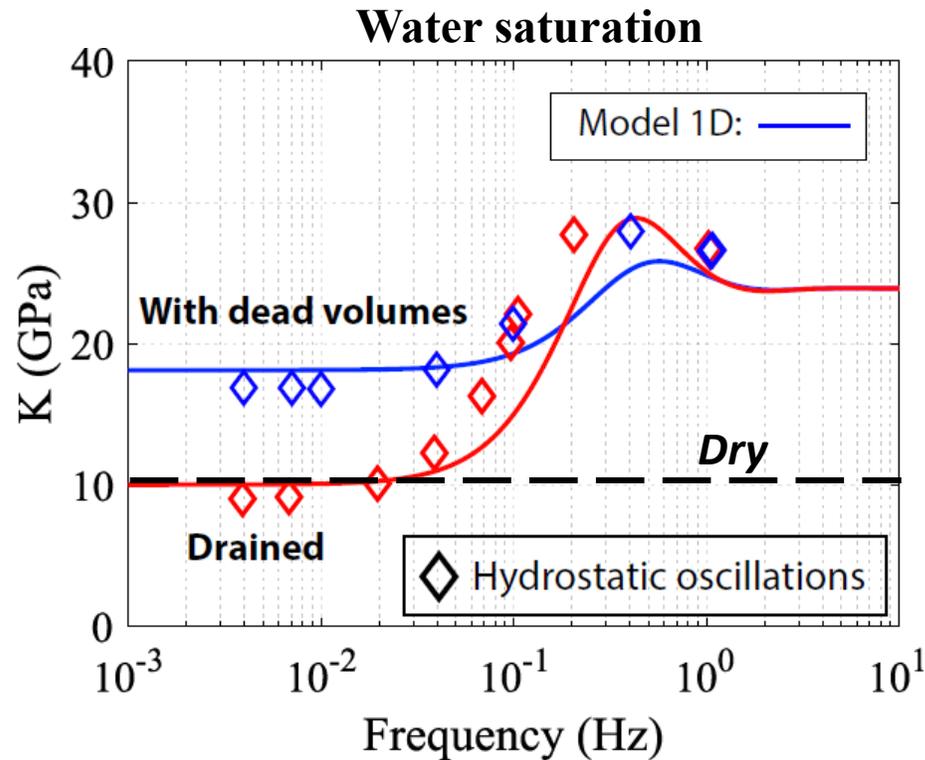
B: Skempton coefficient

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



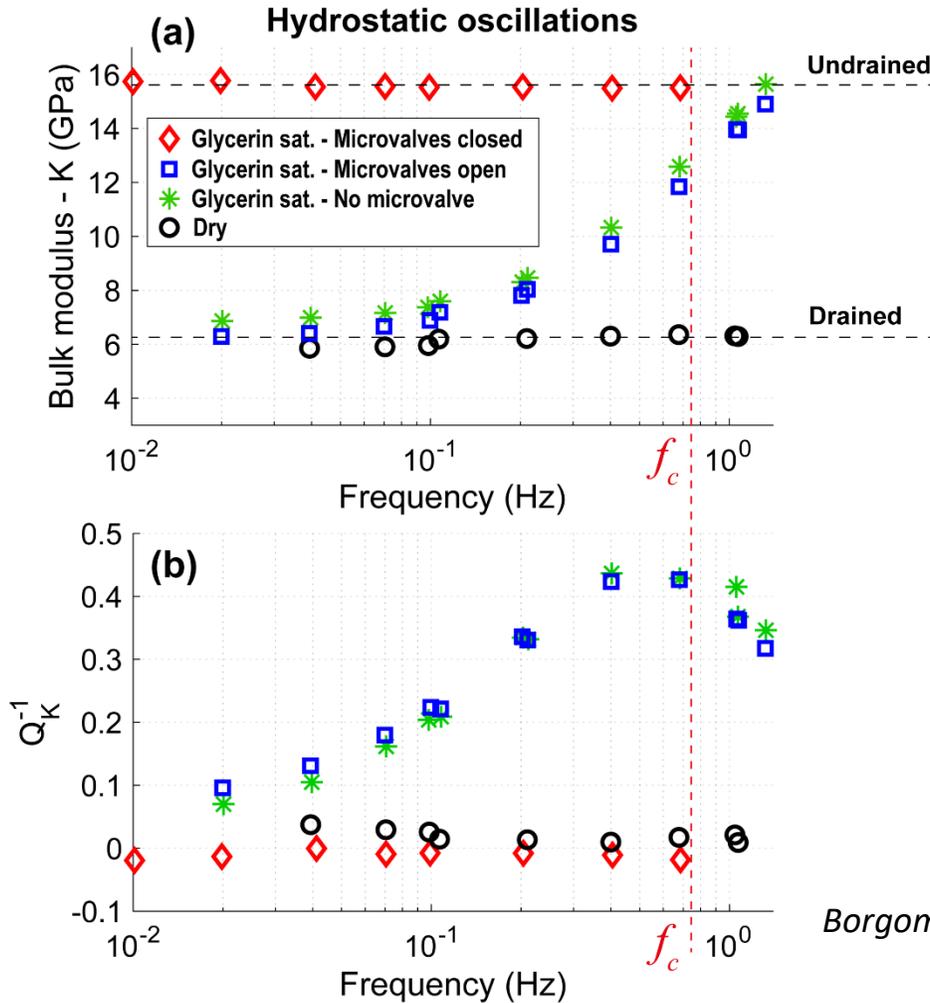
Drainé – Vannes ouvertes - volume pompes 100 mL
 « Non-drainé » - Vannes fermées – volumes morts 3,3 mL

Transition drainé / non-drainé

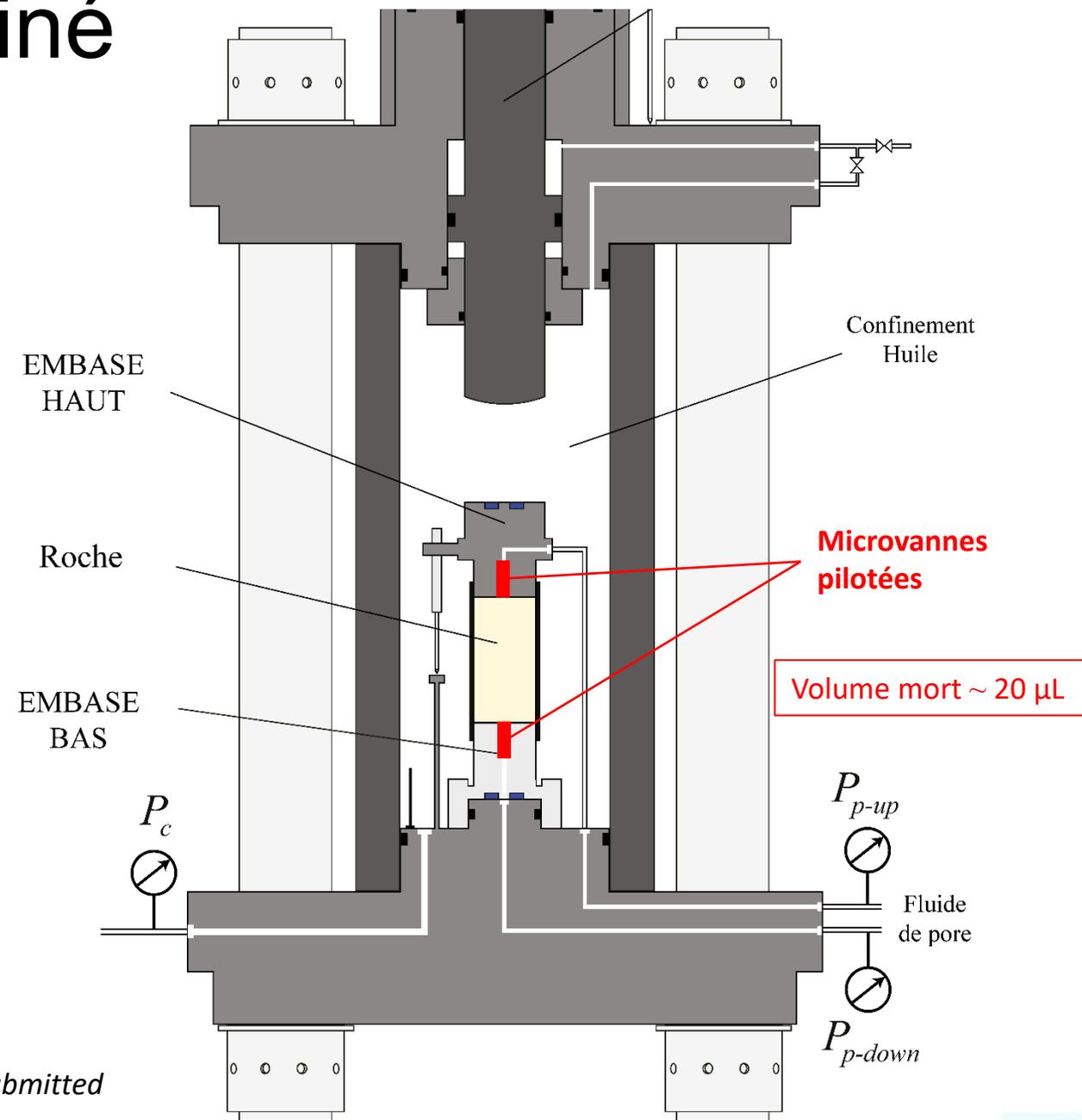
Développement de nouvelles microvannes

Bleurswiller sandstone

(Poro = 25%, perm = 200 mD)

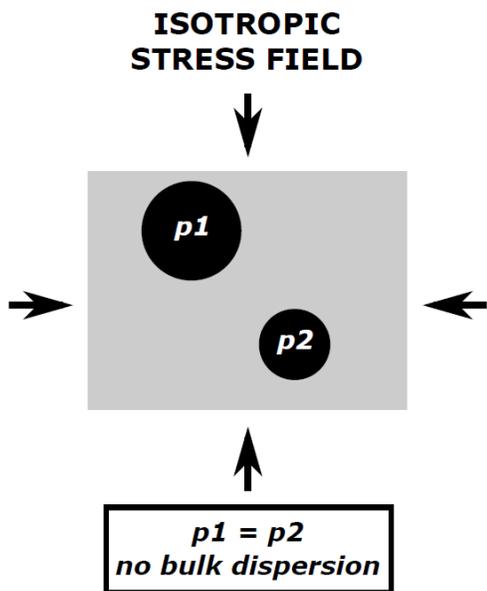


Borgomano et al., submitted

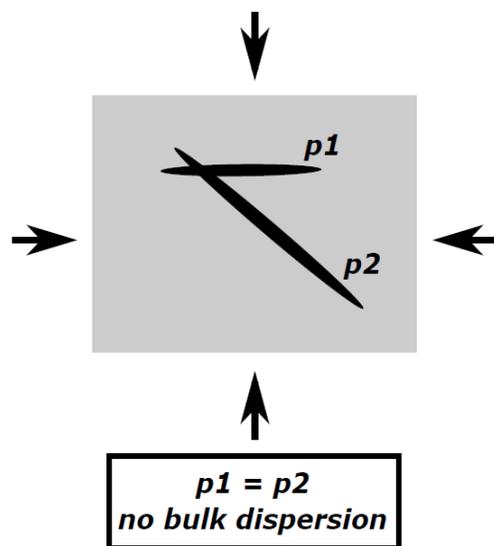


Transition liée au « Squirt-flow »

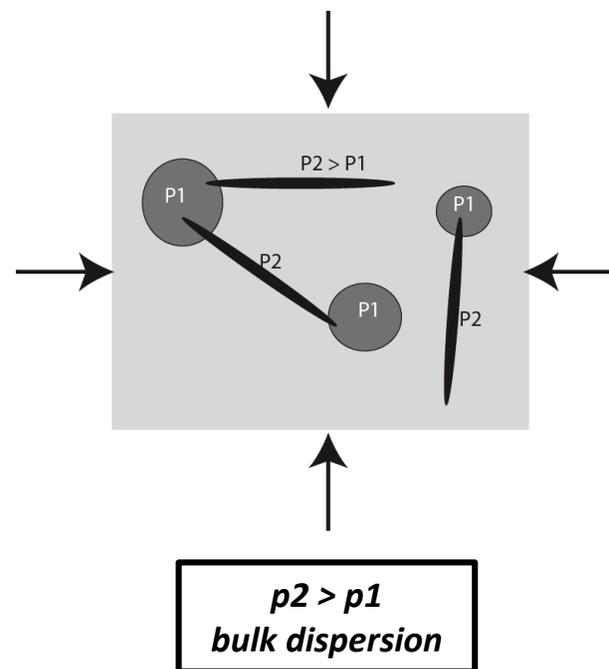
Medium with equant pores



Medium with randomly oriented cracks



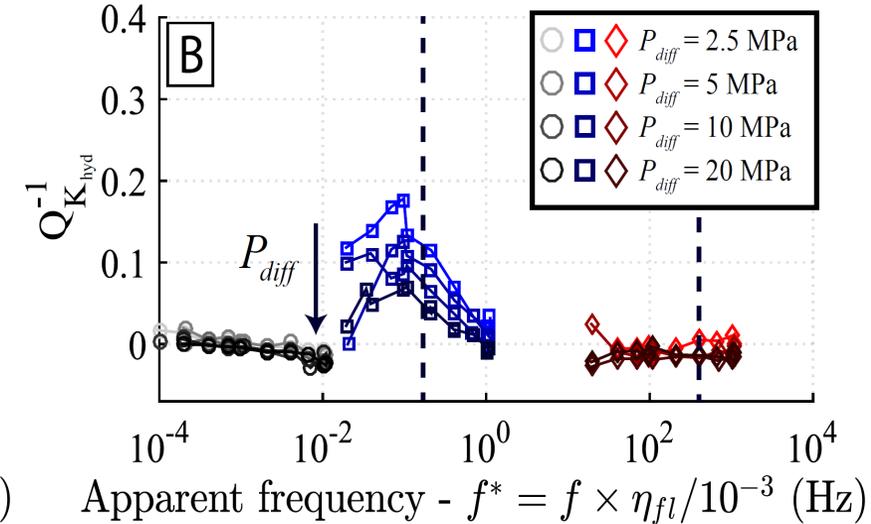
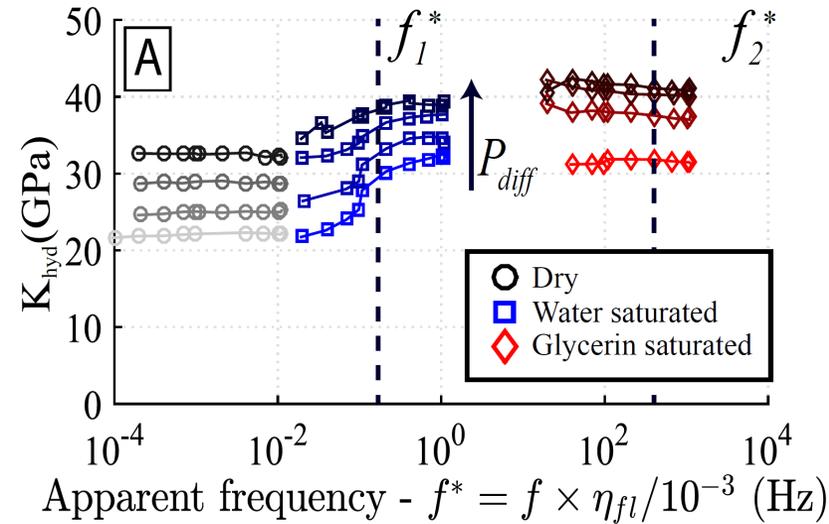
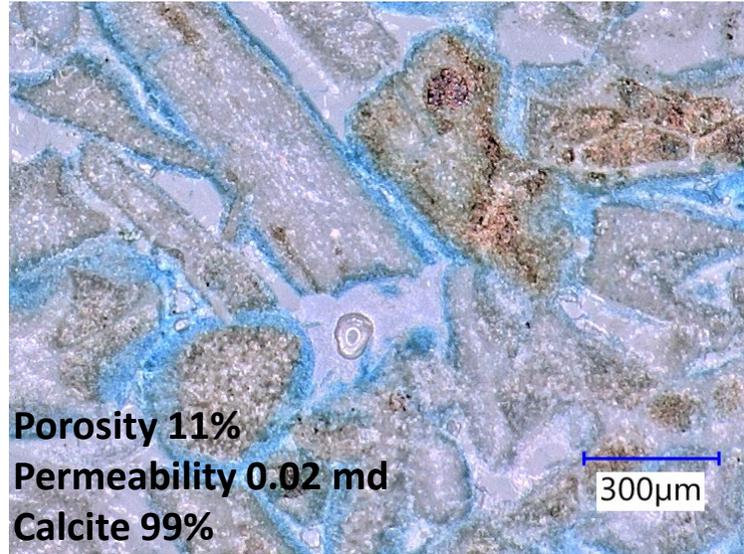
In rocks
« pores and cracks »



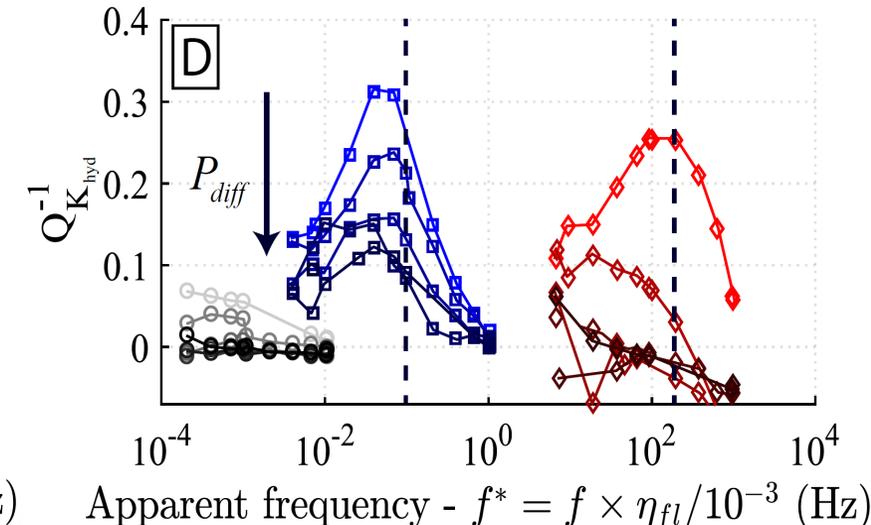
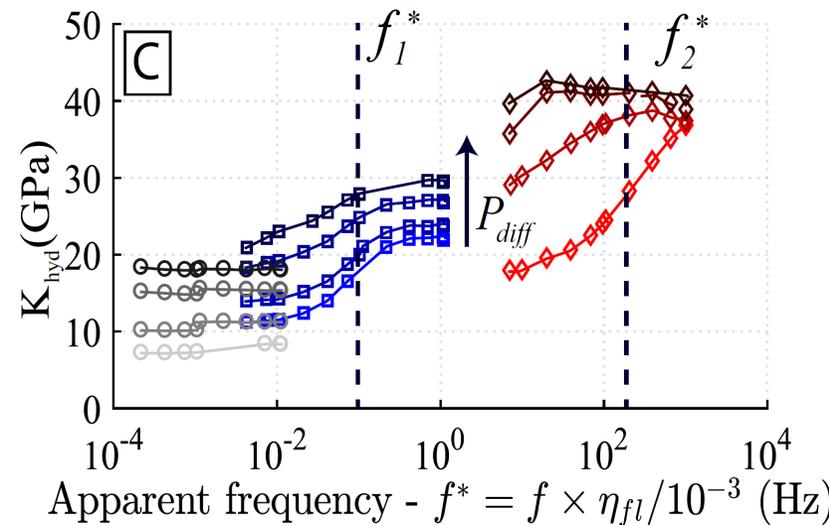
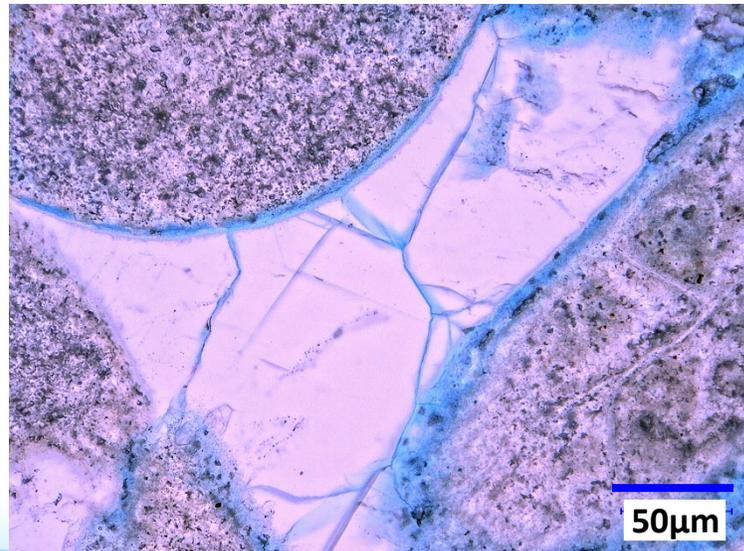
Transition liée au « Squirt-flow »

Borgomano et al., 2019

Calcaire bioclastique de Indiana



Thermocrackage 1 heure 500°C



Transition liée au « S squirt-flow »

Modélisation

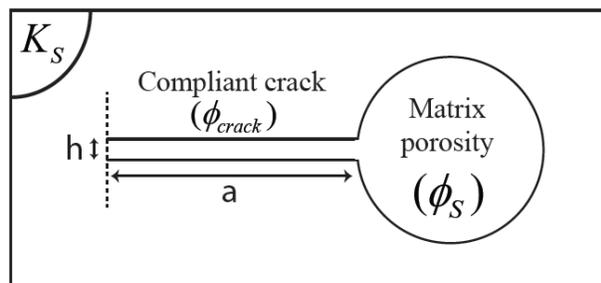
Milieu effectif :
(e.g. Kachanov 1993)

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



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

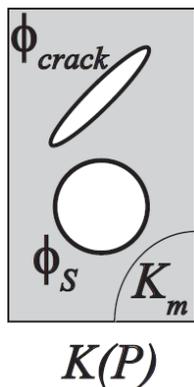
Modèle micromécanique de squirt-flow :
(e.g. Murphy III et al., 1986)



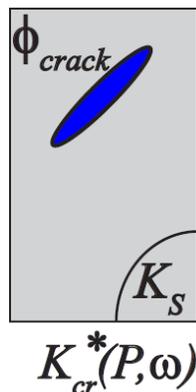
$$\delta_c^*(\omega) = \frac{3\pi(1-2\nu_S)}{4(1-\nu_S^2)} \frac{\hat{\xi}}{C_S} (C_{fl}^*(\omega) - C_S)$$

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

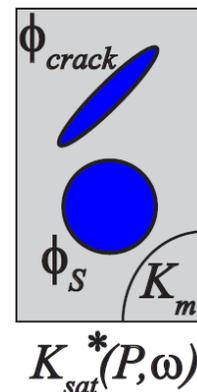
Séquence :



→
Squirt-flow



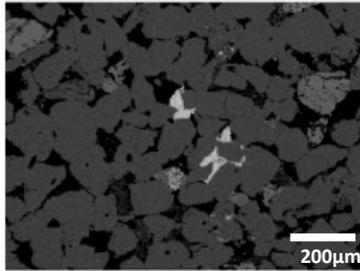
→
Poroelasticity
on ϕ_S
(modèle 1D)



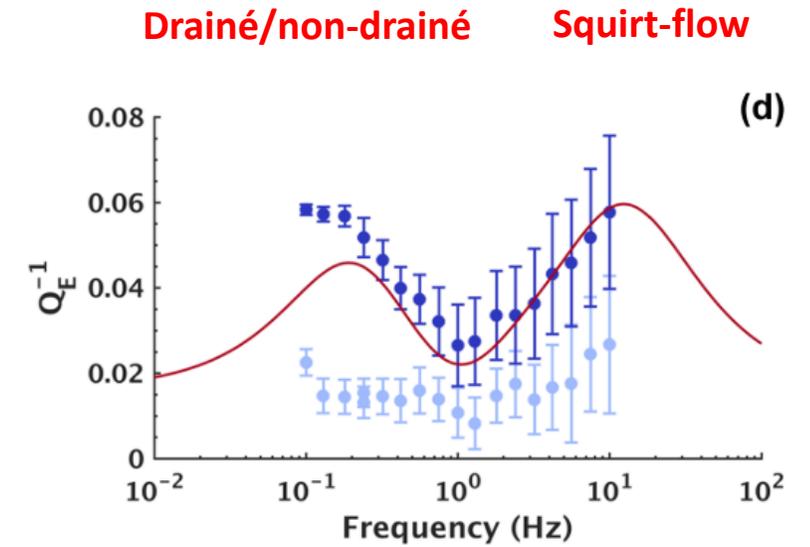
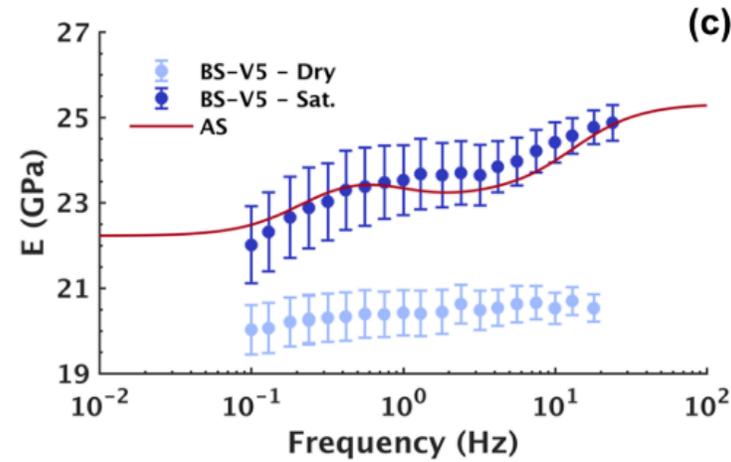
Transition liée au « S squirt-flow »

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 diagraphie de puits

Faciès : Granulaires / Coquina / Shrub



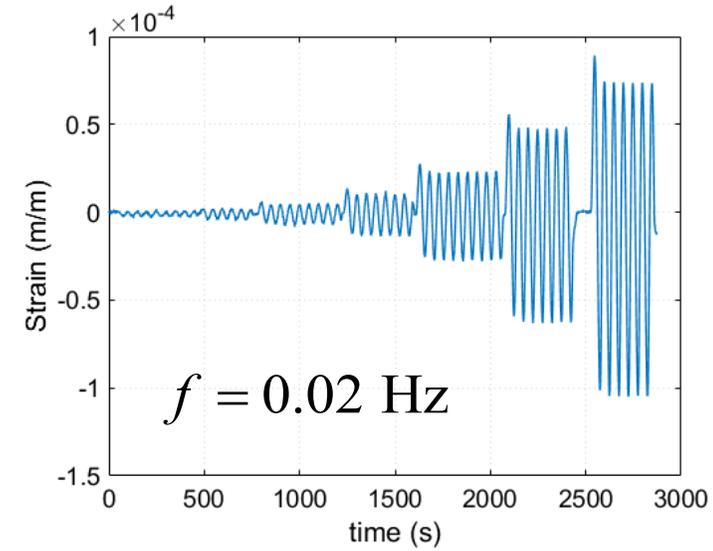
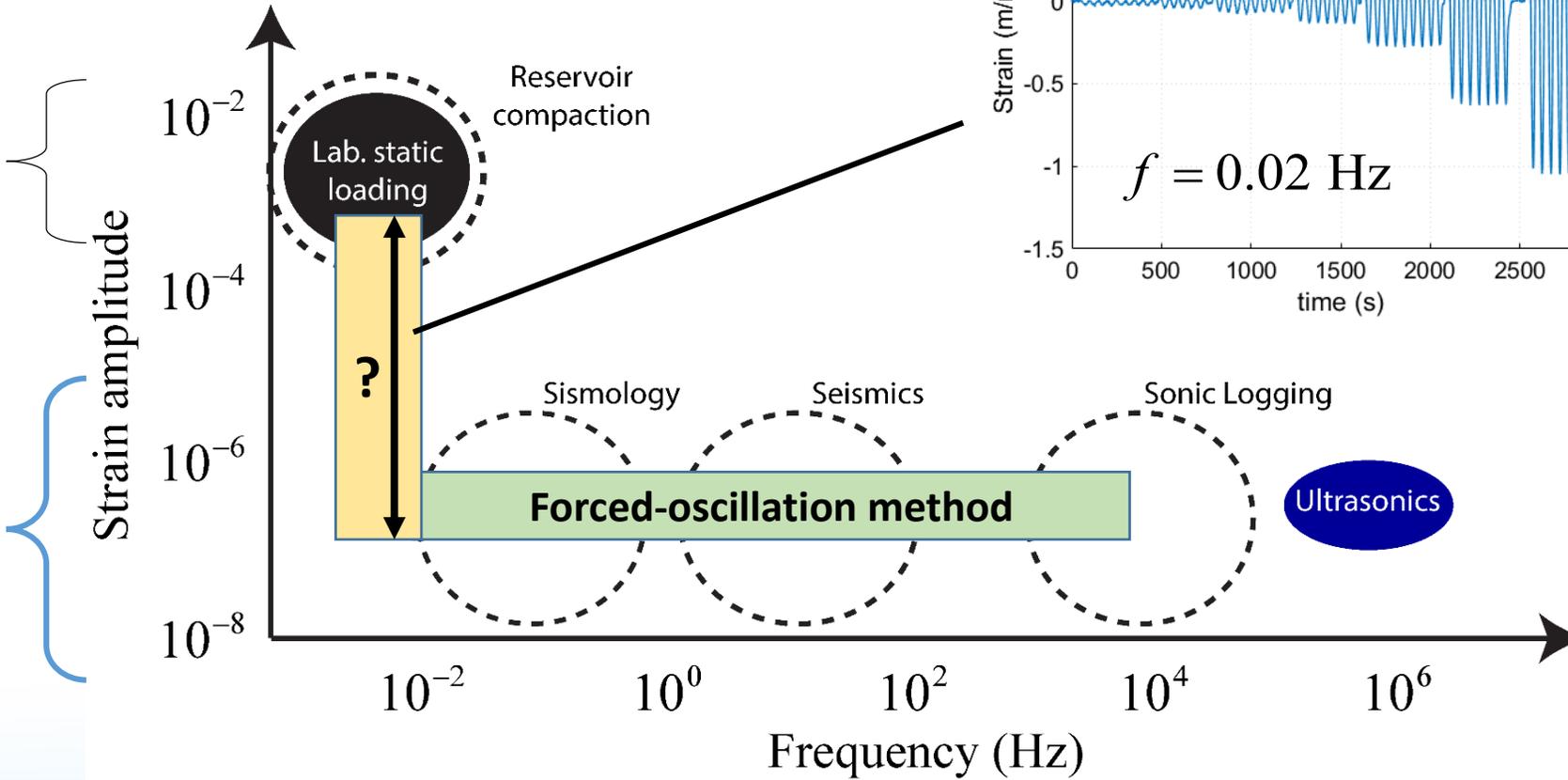
Perspectives / En cours...

Effet d'amplitude ?

Module(s)
statique(s)

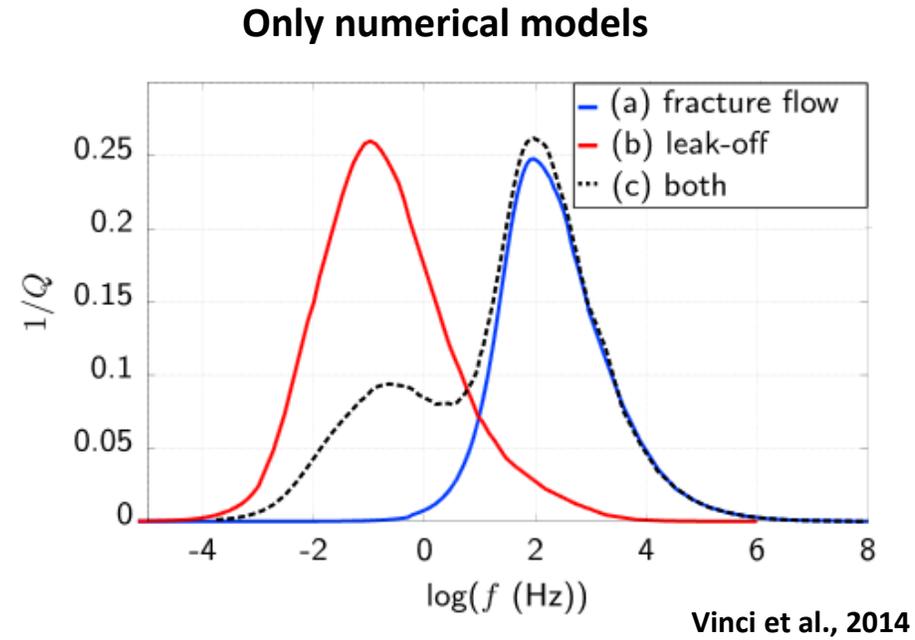
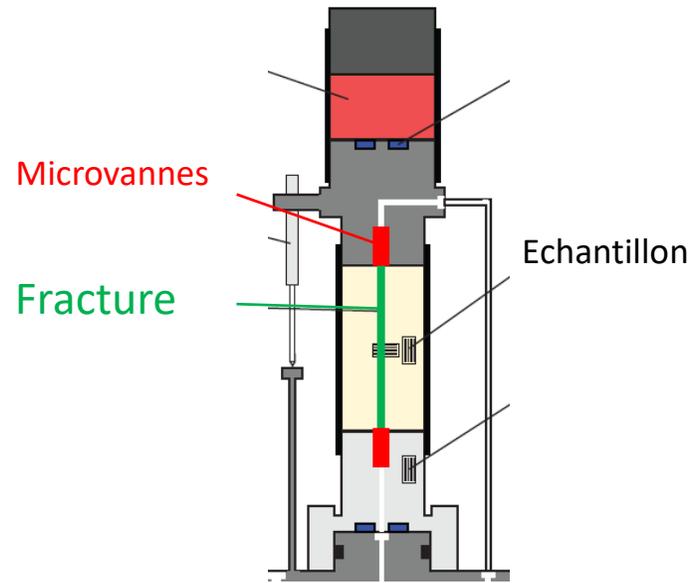
Strain amplitude

Modules
dynamiques



Perspectives / En cours...

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



- Saturations partielles

Merci de votre attention