

---

# Propriétés élastiques des roches, du terrain au laboratoire

---

Jérôme Fortin

M. Adelinet, E. David, L. Pimienta, J. Borgomano, H. Yin et Y. Guéguen

Ecole normale supérieure, Laboratoire de Géologie, Paris – France

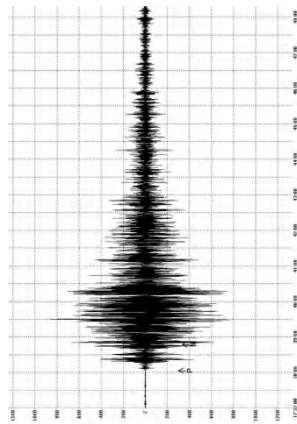


# I-Motivation

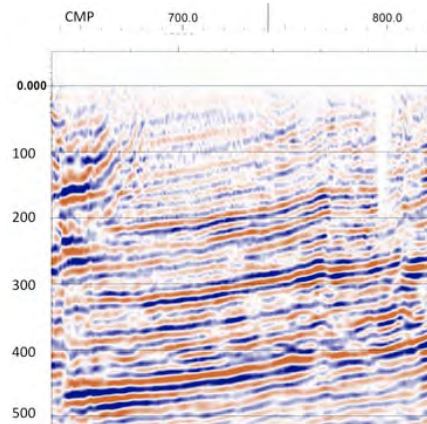
Des fréquences différentes pour des mesures différentes

Comment comparer les mesures ultrasons (HF) du laboratoire avec les mesures de terrain (LF) ?

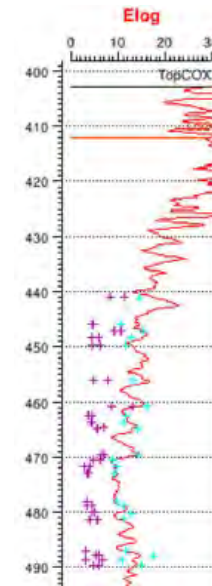
Comment interpréter correctement les mesures de sismiques (log, sismique 4D) ?



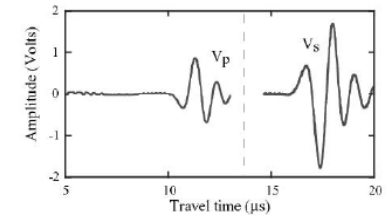
Seismology



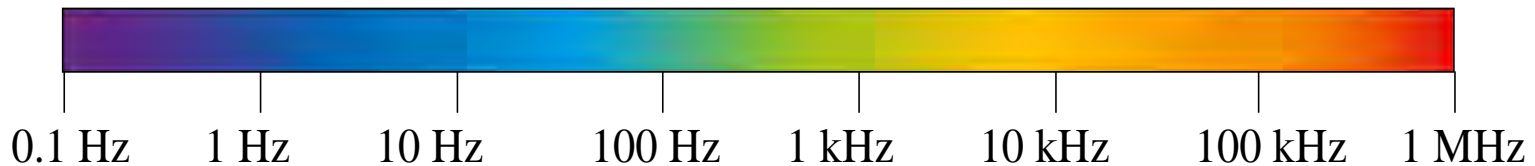
Reservoir monitoring



Sonic log

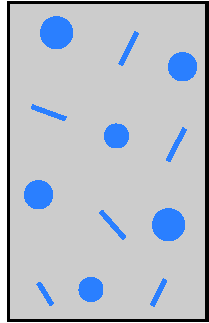


Laboratory



# I- Pourquoi les vitesses élastiques dépendent de la fréquence?

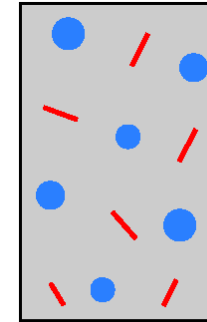
Lié au temps nécessaire pour équilibrer le fluide



*drainé*

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

$$f_{\text{cutoff}} \approx \frac{K\xi^3}{\eta}$$



*haute-fréquence*

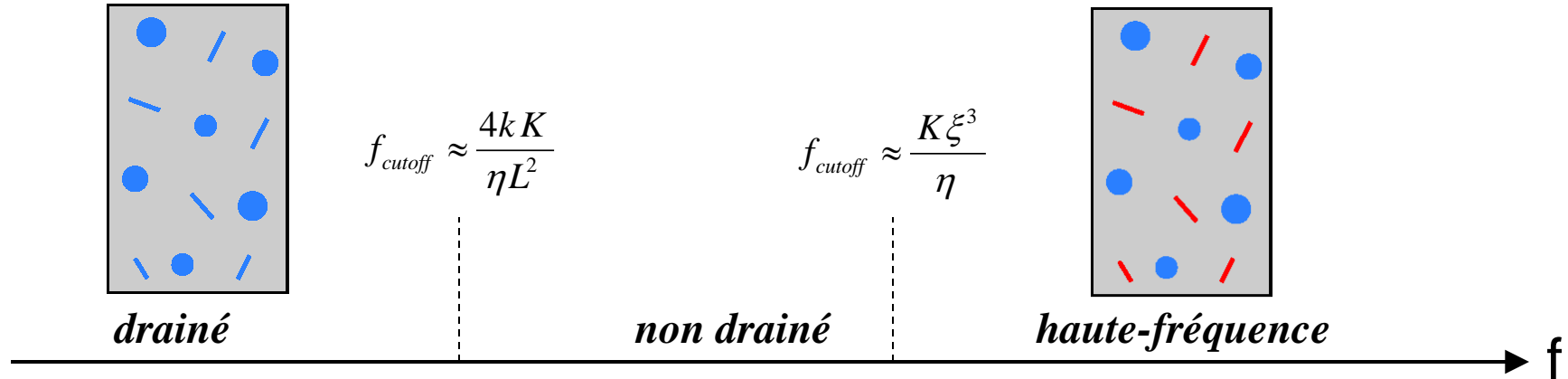
f

A très basse fréquence: drainé

→  $P_p$  (pression de pore) est constante et non affecté par le passage de l'onde

# I- Pourquoi les vitesses élastiques dépendent de la fréquence?

Lié au temps nécessaire pour équilibrer le fluide



A très basse fréquence: drainé

→  $P_p$  (pression de pore) est constante et non affecté par le passage de l'onde

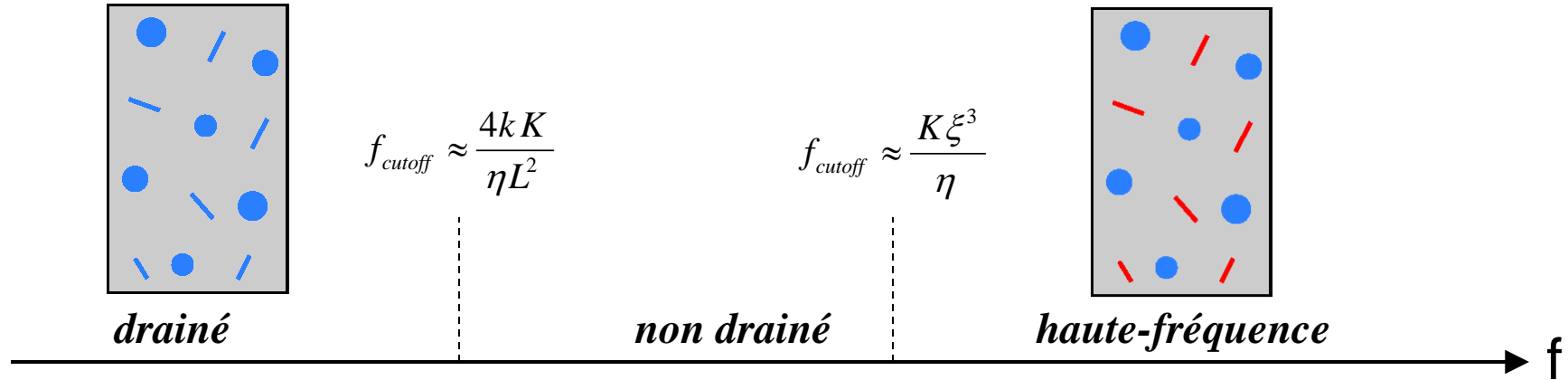
Fréquence intermédiaire: non - drainé

→  $P_p$  est uniforme localement (VER), et change au passage de l'onde

→ Prédit dans le cadre de la poroélasticité

# I- Pourquoi les vitesses élastiques dépendent de la fréquence?

Lié au temps nécessaire pour équilibrer le fluide



A très basse fréquence: drainé

→  $P_p$  (pression de pore) est constante et non affecté par le passage de l'onde

Fréquence intermédiaire: non - drainé

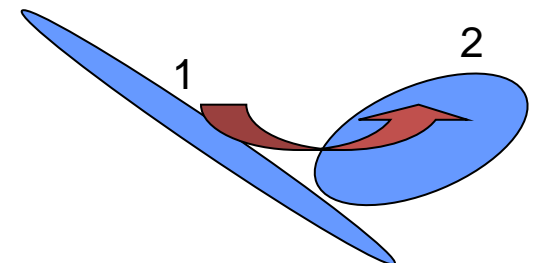
→  $P_p$  est uniforme localement (VER), et change au passage de l'onde

→ Prédit dans le cadre de la poroélasticité

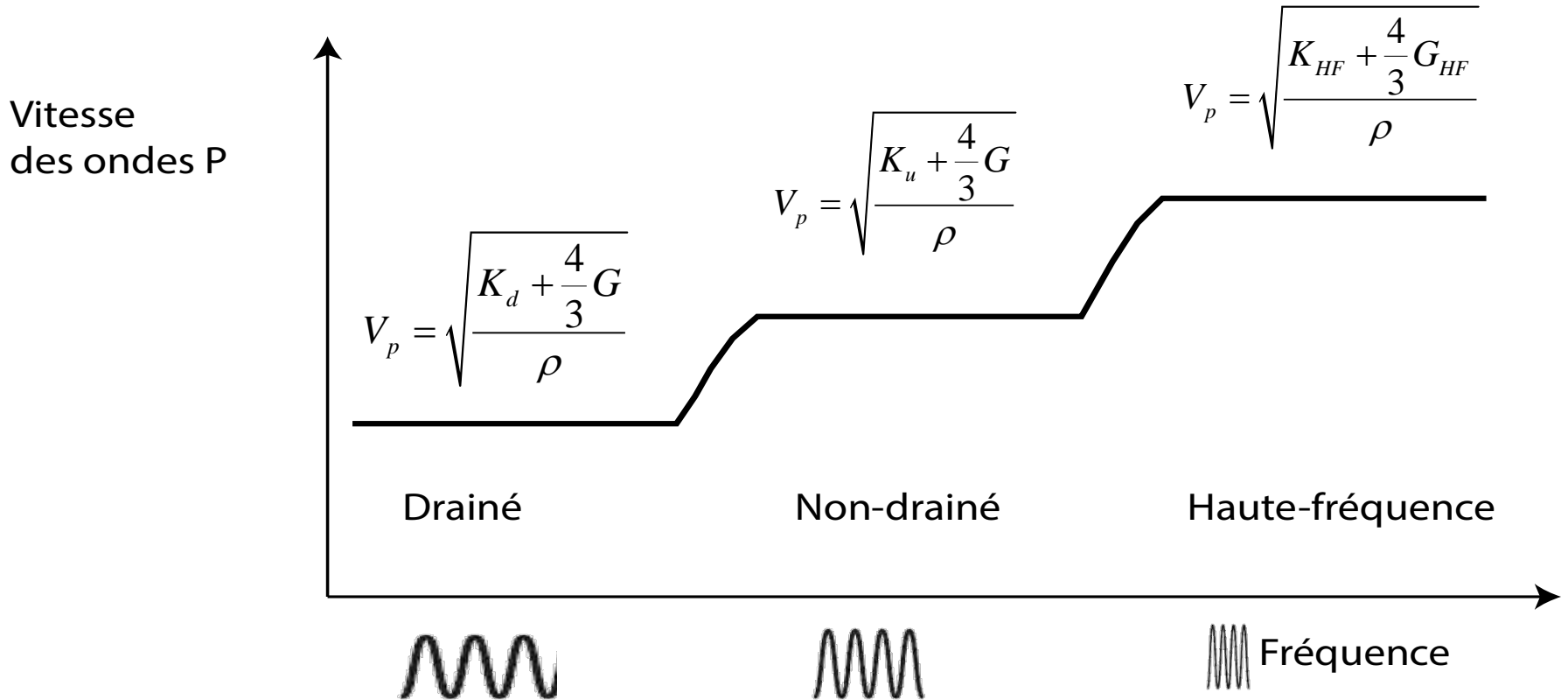
Haute fréquence: chaque vide est isolé

→ Par exemple, pression de pore  $P_1 > P_2$

→ Ce n'est plus le cadre de la poroélasticité mais celui des **théories de milieux effectifs**



# I- Pourquoi les vitesses élastiques dépendent de la fréquence?

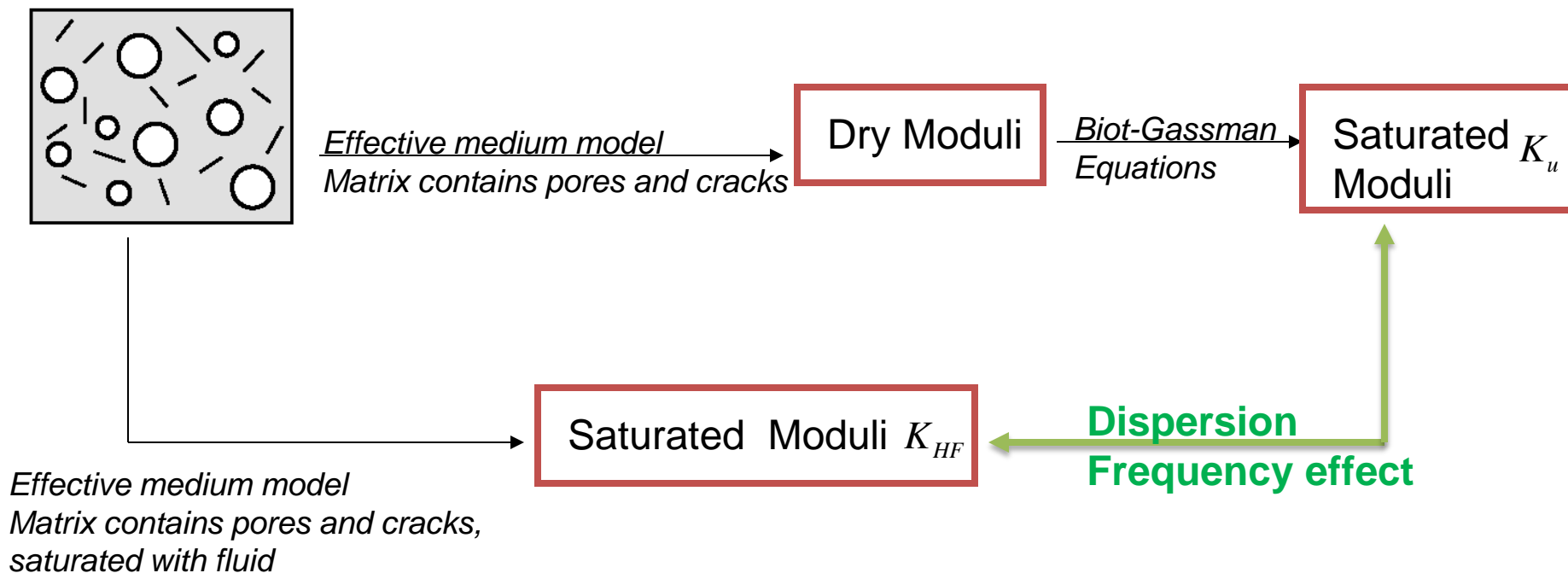


D'autres mécanismes peuvent expliquer une dispersion sur les vitesses

- Milieu hétérogène (scattering)
- Milieu partiellement saturé
- Effet inertiel (Théorie de Biot-dynamique)

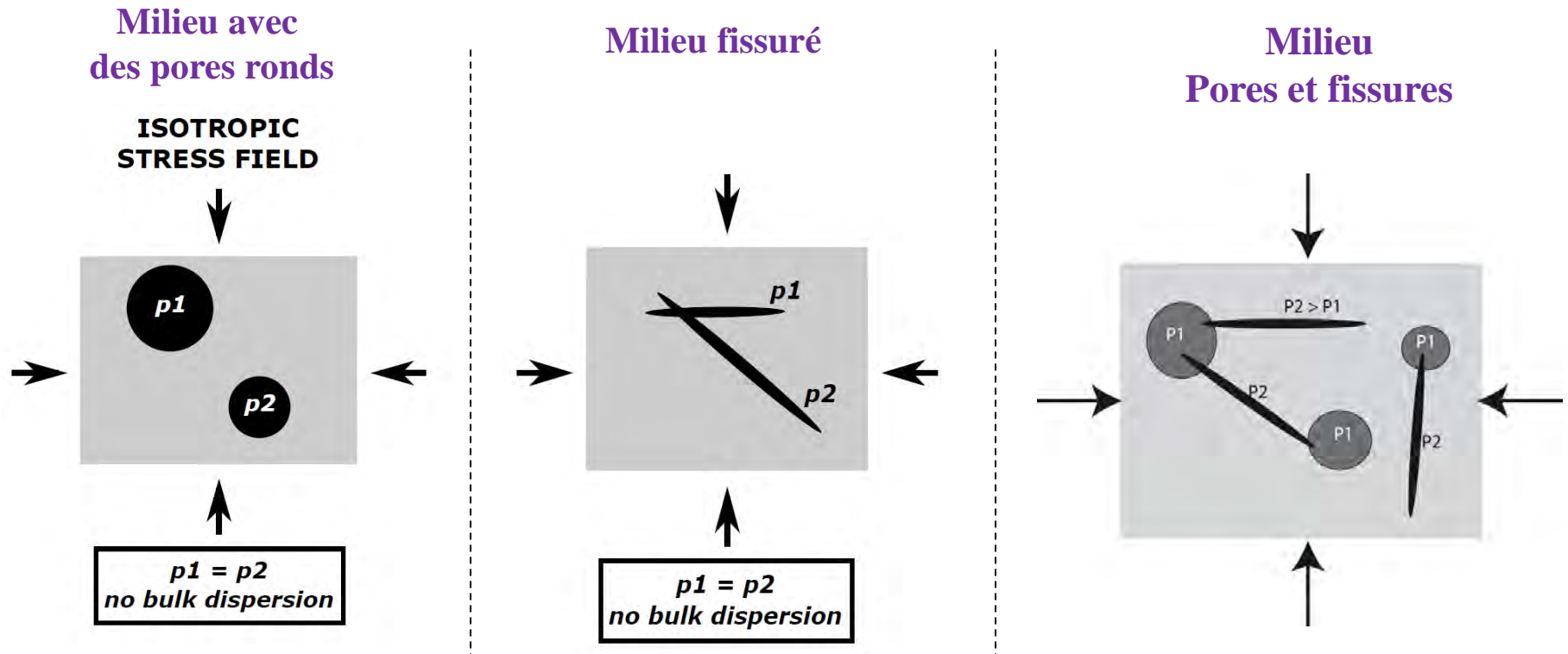
## II- Les modules élastiques haute fréquence sont-ils si différents de ce que prédit Biot-Gassman ?

Un modèle simple pour estimer la dispersion en fréquence (Etude sur le module d'incompressibilité  $K$ )



## II- Les modules élastiques haute fréquence sont-ils si différents de ce que prédit Biot-Gassman ?

### Les cas particuliers

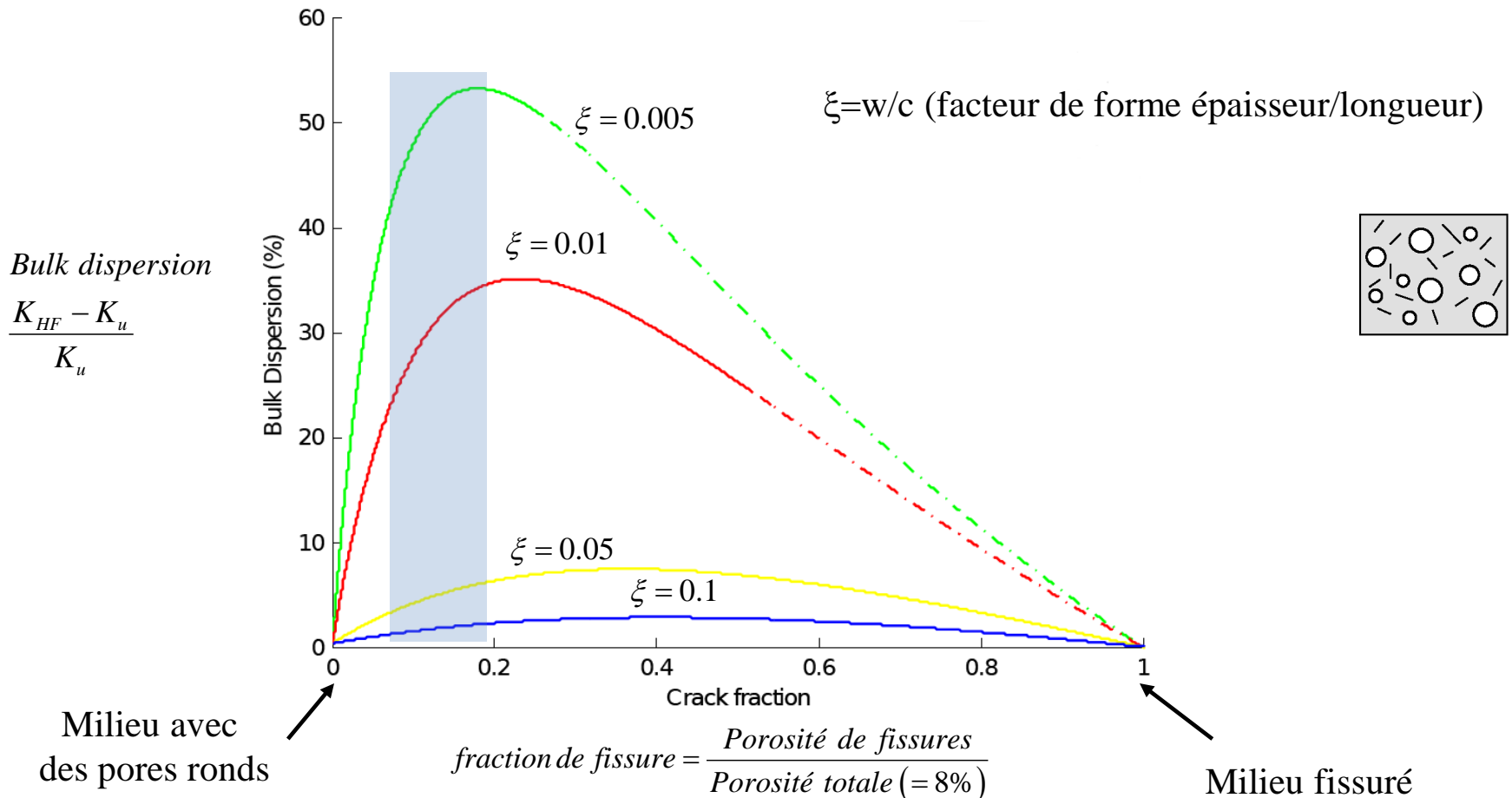


⇒ La dispersion en fréquence est liée à la microstructure, et s'explique par le phénomène de squirt flow (écoulement d'une fissure vers un pore).



## II- Les modules élastiques haute fréquence sont-ils si différents de ce que prédit Biot-Gassman ?

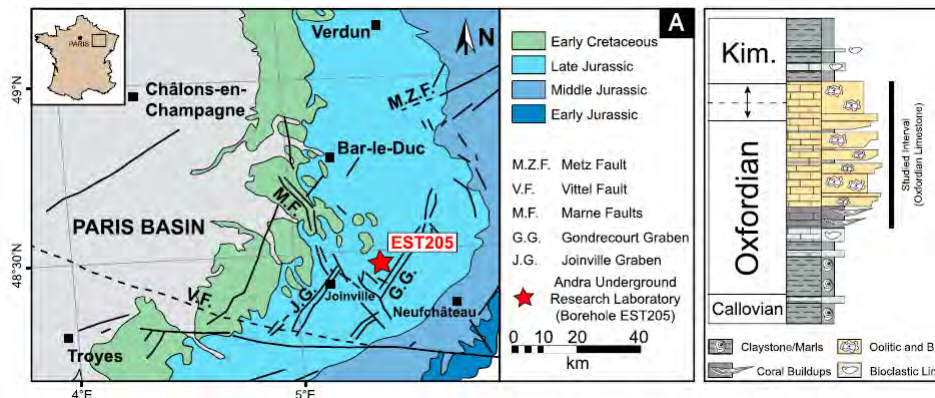
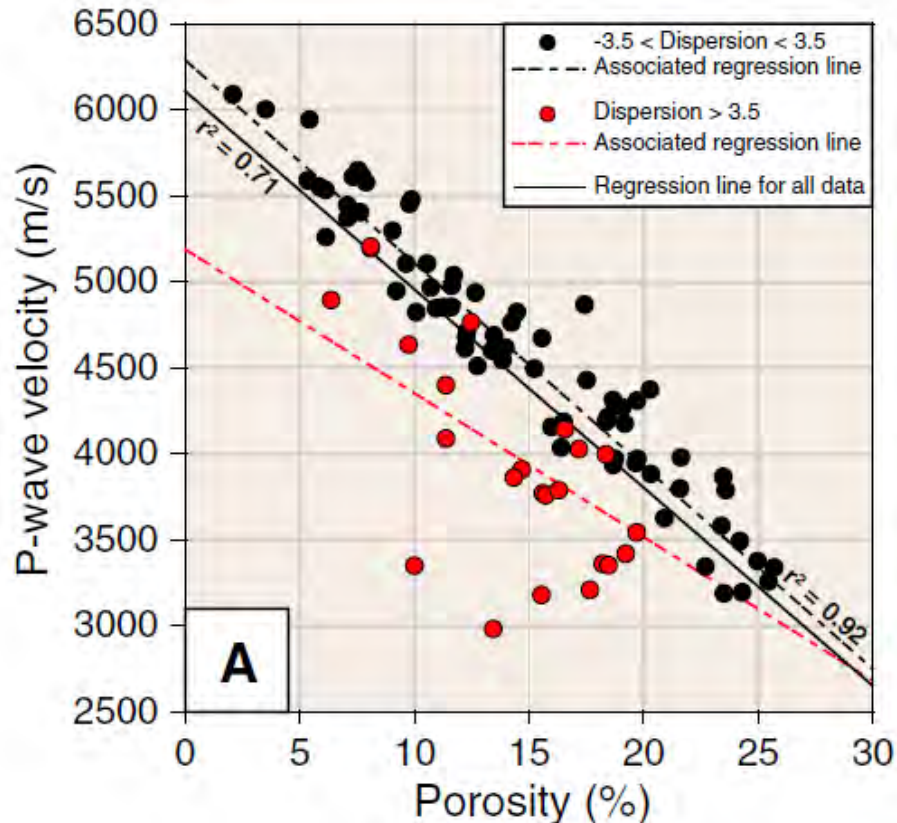
### Un modèle simple pour estimer la dispersion en fréquence



➡ **La dispersion peut facilement atteindre 30 %**

## II- Les modules élastiques haute fréquence sont-ils si différents de ce que prédit Biot-Gassman ?

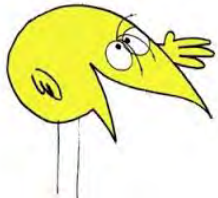
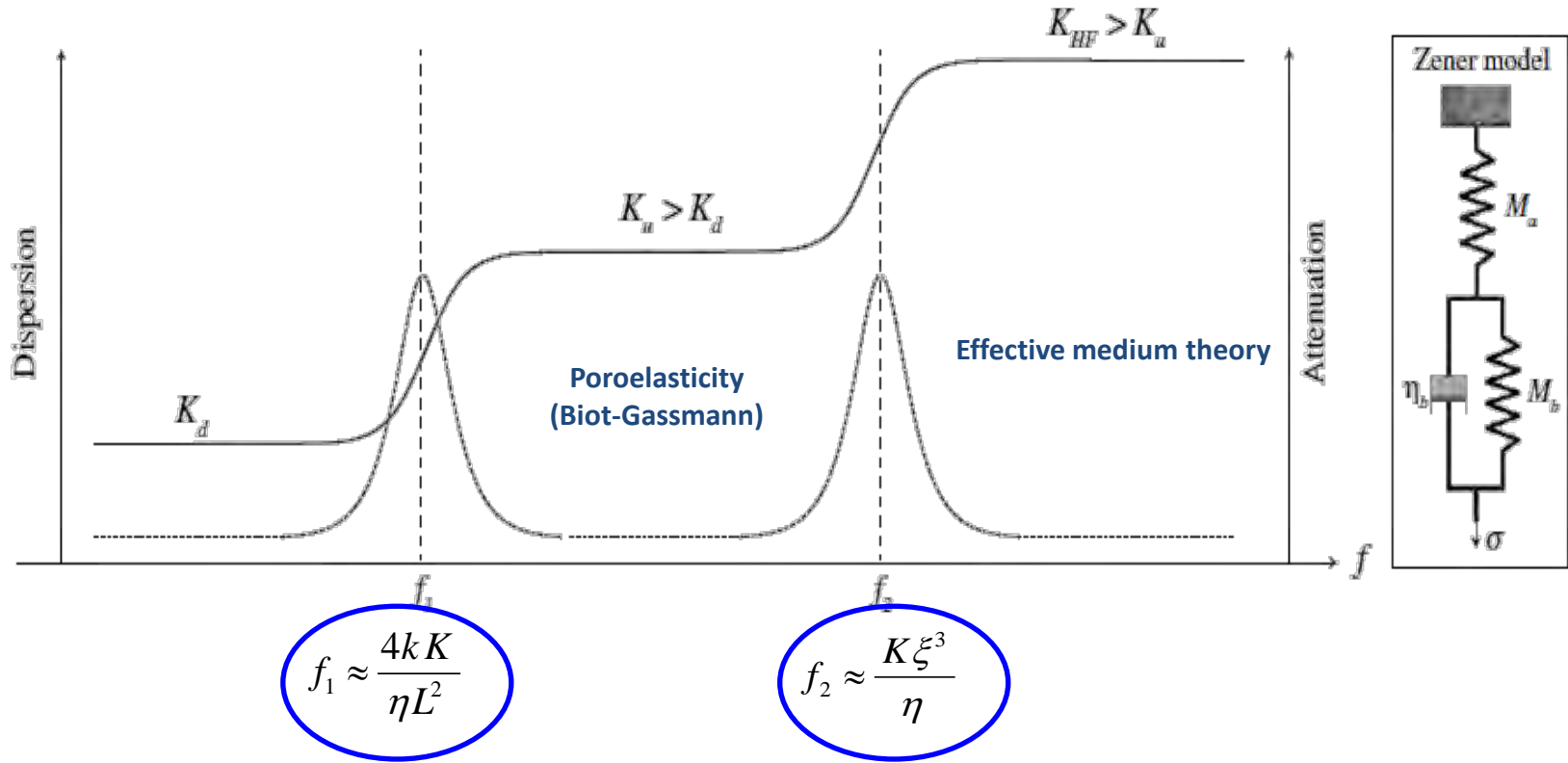
Conséquence : Si je mesure les vitesses ultrasoniques dans un échantillon poreux sec et saturé, et que la vitesse en saturé est supérieure à la prédiction de Biot-Gassman = il y a des fissures dans l'échantillon ...



Regnet et al. JGR 2014  
(carbonate de l'oxfordien)

## II- Des changements de régime pour quelle fréquence ?

Evolution du module K  
avec la fréquence:



$$f_2 \approx \frac{K\xi^3}{\eta} = \frac{40 \text{ GPa} (10^{-3})^3}{10^{-3}} = 20 \text{ kHz}$$

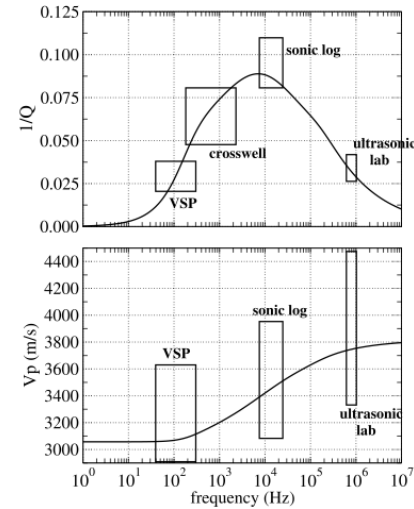
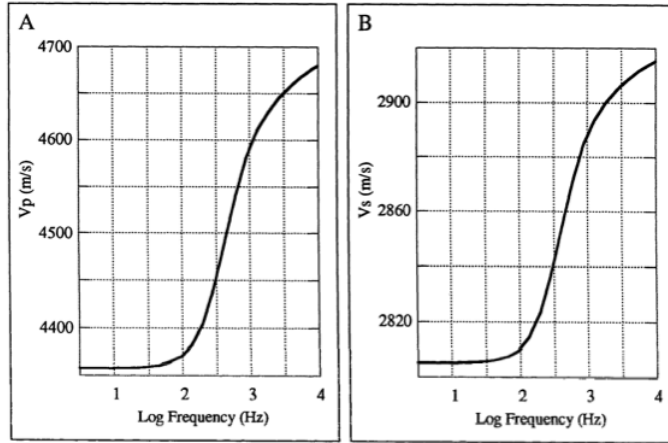
Proche de la fréquence des outils de diaggraphie!

# II- Des changements de régime pour quelle fréquence ?

## Peu de données de laboratoire

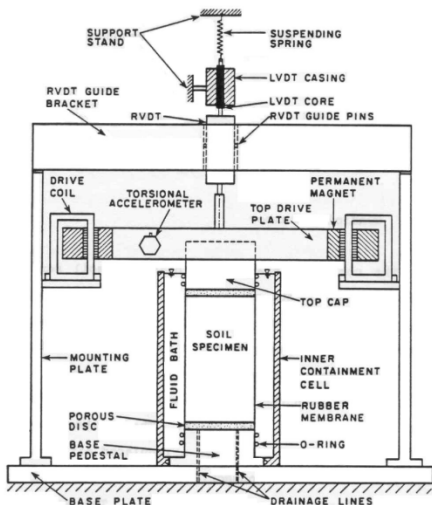
### Des prédictions théoriques

Dvorkin et al. 1995



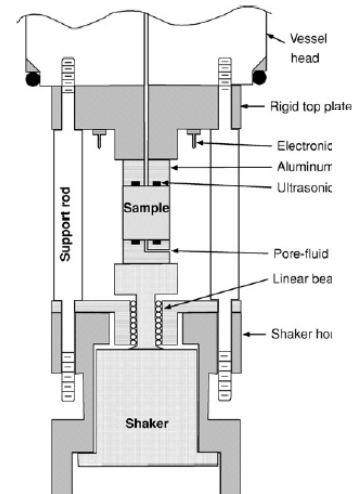
Pride et al. 2004

### Mais peu de mesures basses fréquences des modules élastiques au laboratoire



Mesures en barres (2-5Khz)  
résonnantes

*Richart et al. 1970;*  
*Lucet et al. 1991*  
*Priest et al. 2005,*



Mesures d'oscillations forcées

*Spencer 1981*  
*Jackson, 1991*  
*Batzle et al. 2004,*  
*Batzle and Han 2006,*

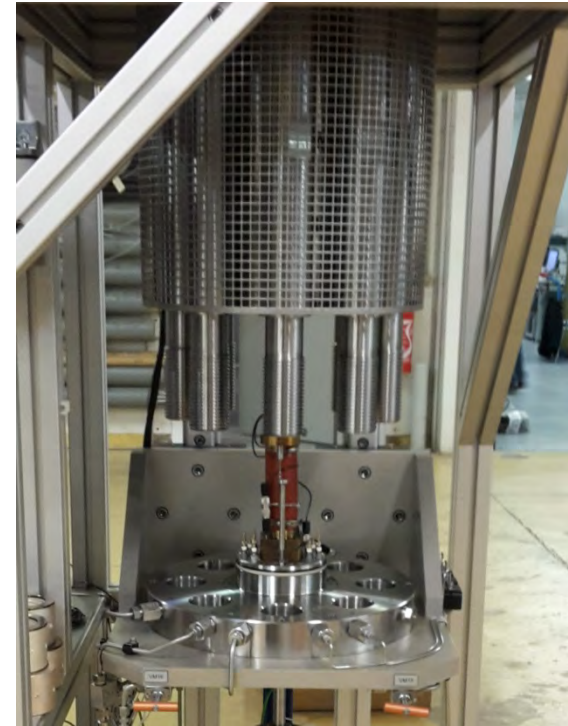
## II- Approche expérimentale

**Objectif: mesurer les vitesses élastiques en fonction de la fréquence  
via les modules élastiques**

### Presse triaxiale



**TOP INDUSTRIE**  
High Pressure Engineering



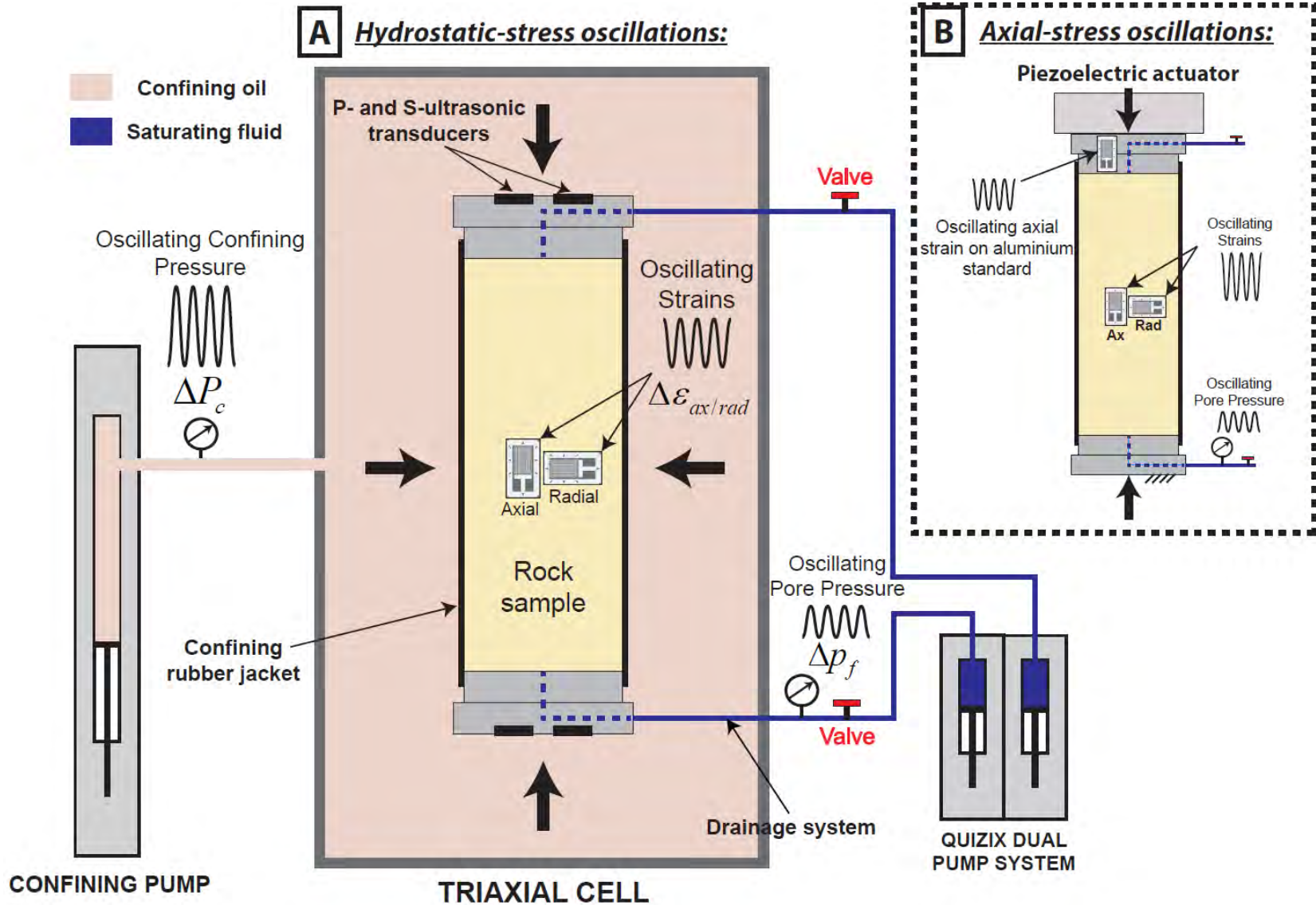
$$P_c = 0 - 100 \text{ MPa}$$

$$T = 20 - 100^\circ\text{C}$$



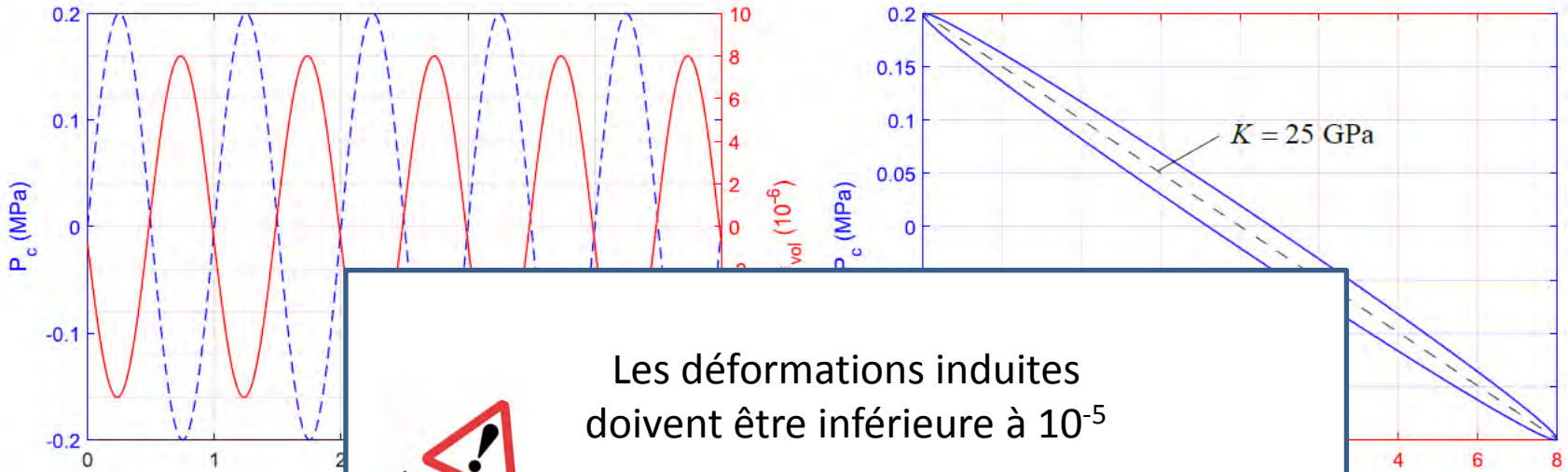
**TOTAL**

## II- Approche expérimentale : méthode dite de “strain-stress”



# II- Approche expérimentale : méthode dite de “strain-stress”

## 1) Oscillations Hvdrostatiques



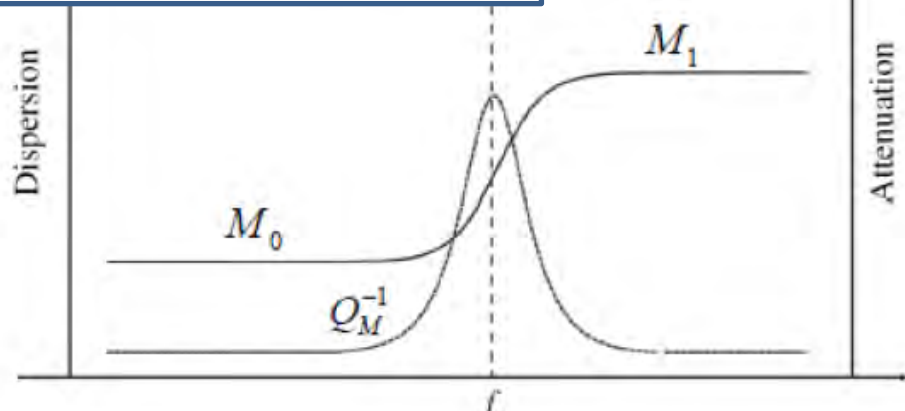
Les déformations induites doivent être inférieure à  $10^{-5}$

Pour le module E, on parle de déplacements d'environ 10 microns

Attenuation / Viscous

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E} = \tan(\varphi_\sigma - \varphi_\varepsilon)$$

Dispersion and attenuation are related.

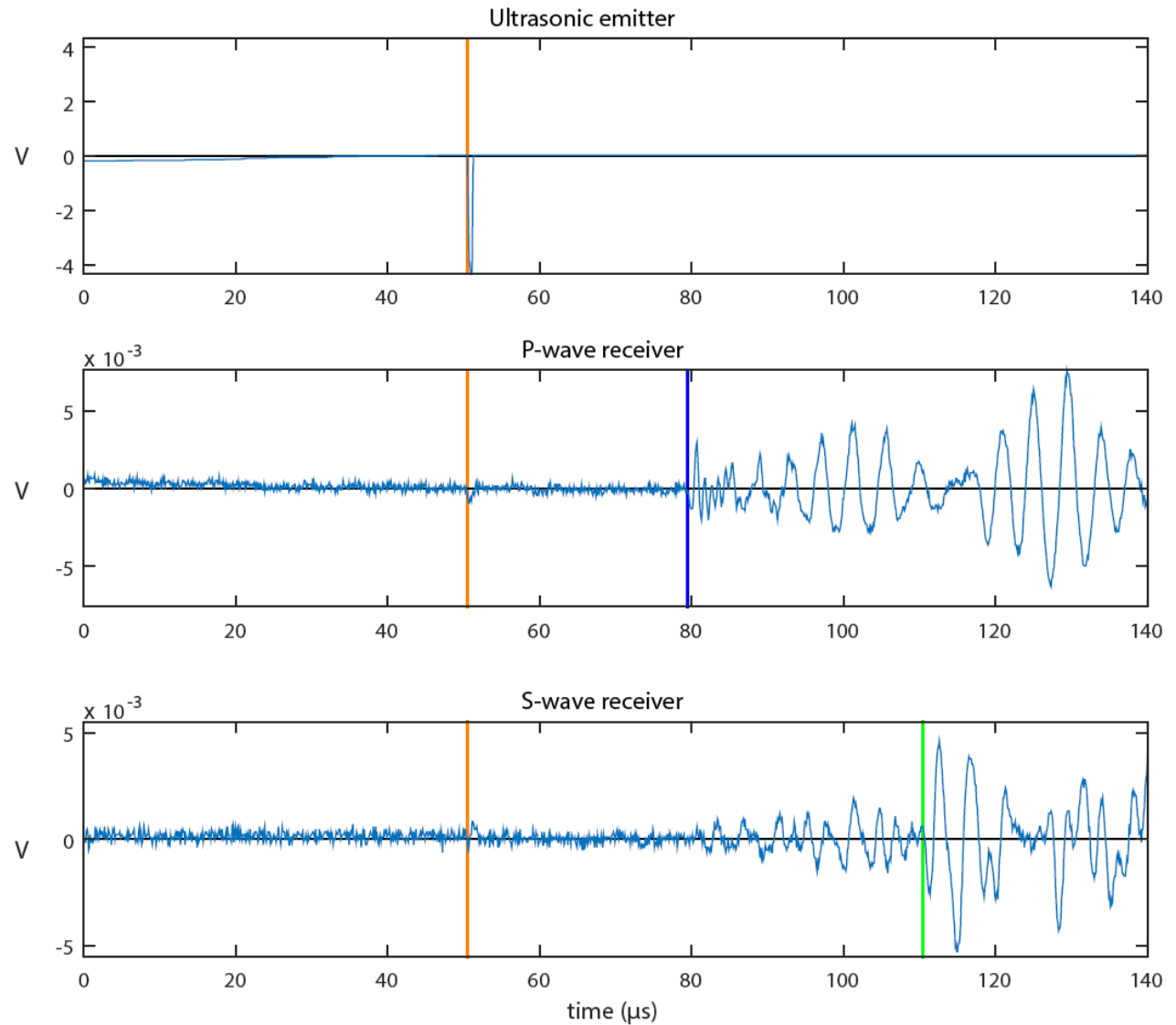


# II- Approche expérimentale : mesures des vitesses ultrasoniques

## 3) Ultrasons

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$





## II- Approche expérimentale : méthode dite de “strain-stress”

1) Oscillations Hydrostatiques    **f=0,01 – 1Hz**

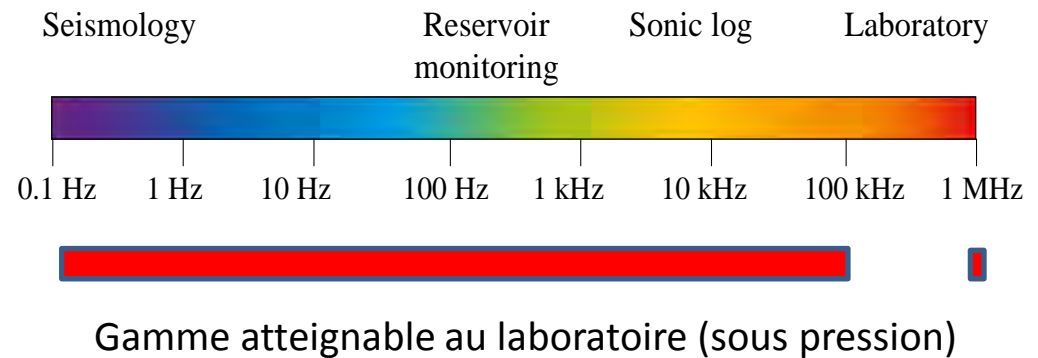
2) Oscillations Axiales                **f=0,01-100Hz**

$$f_1 \approx \frac{4kK}{\eta L^2} \quad f_2 \approx \frac{K\xi^3}{\eta} \quad \text{On peut jouer sur la viscosité du fluide ! (eau, glycerine)}$$

**Fréquence apparente**     $f_a = f \frac{\eta}{\eta_{eau}}$

1) Oscillations Hydrostatiques    **fa =0,01 – 1 kHz**

2) Oscillations Axiales                **fa=0,01-100 kHz**



## II- Approche expérimentale : méthode dite de “strain-stress”

### Calibration

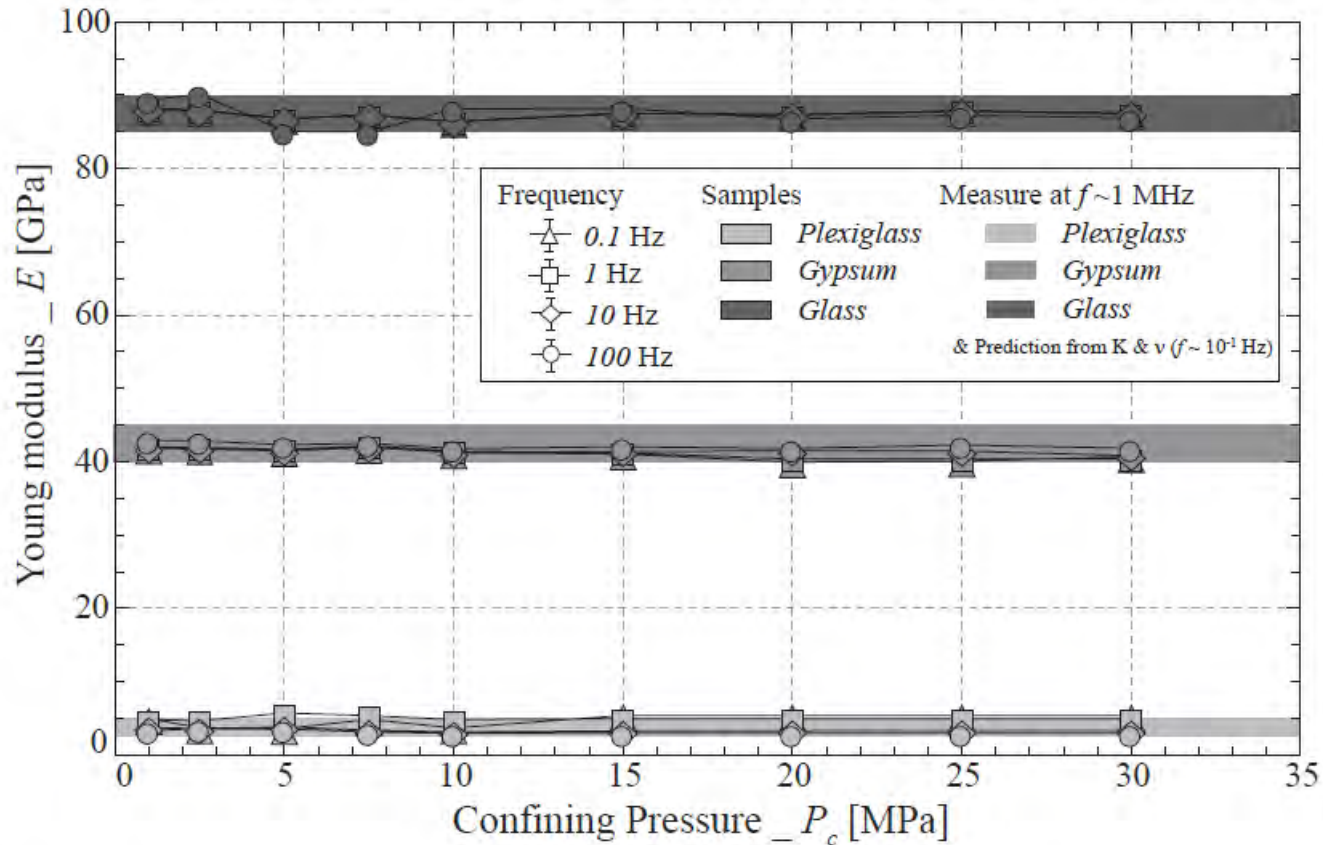
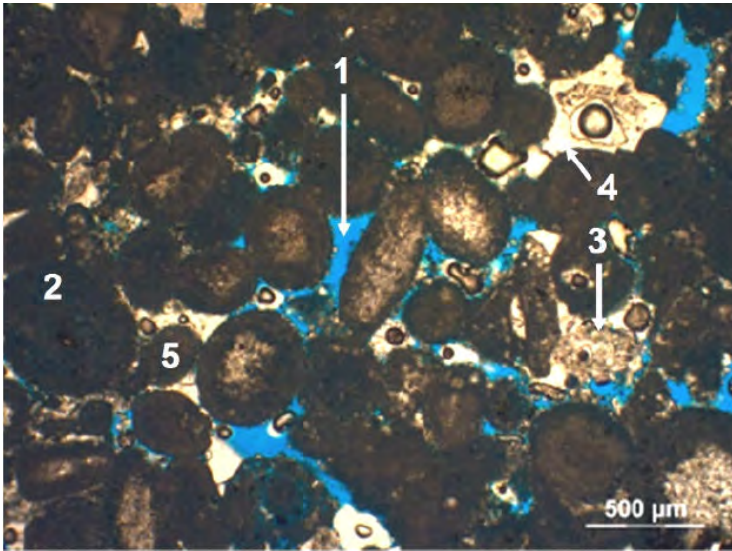


Figure 4: Measured pressure dependence of the three reference samples Poisson coefficient  $E_{LF}$  (a) and its related attenuation  $Q_E^{-1}$  (b) for the four different frequencies. The  $E_{LF}$  are compared to data from the literature on all three samples.

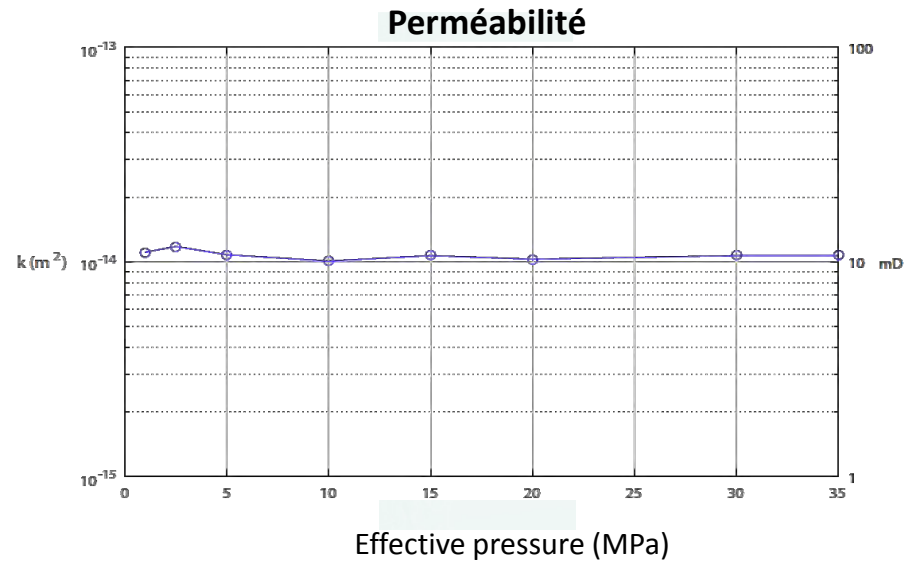
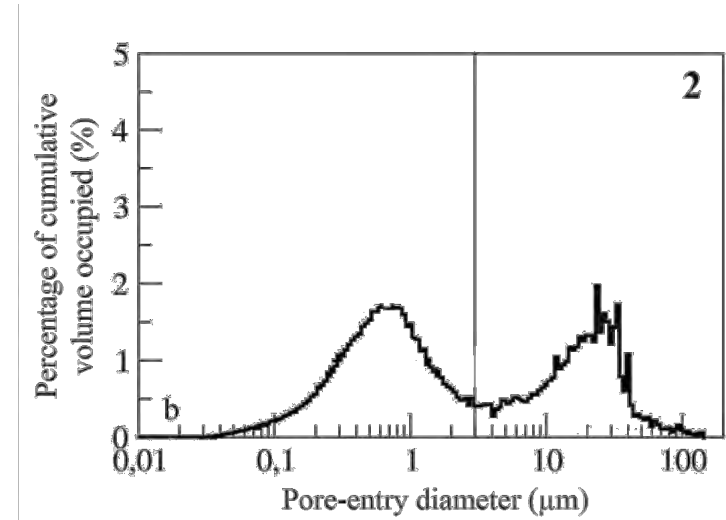
# III- Resultats sur le Lavoux (carbonate)

Microstructure of Lavoux limestone:

Oolitic grainstone

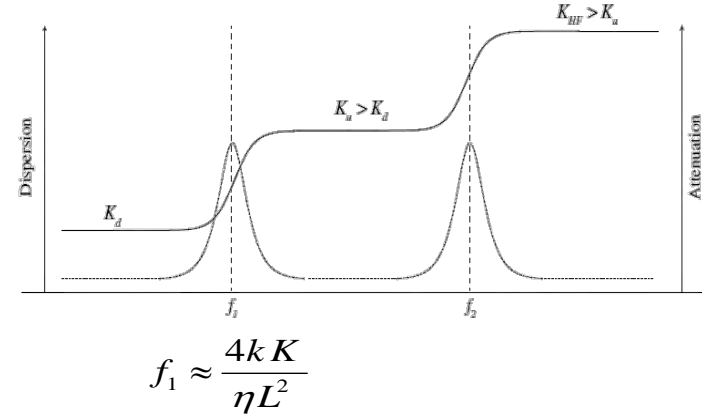
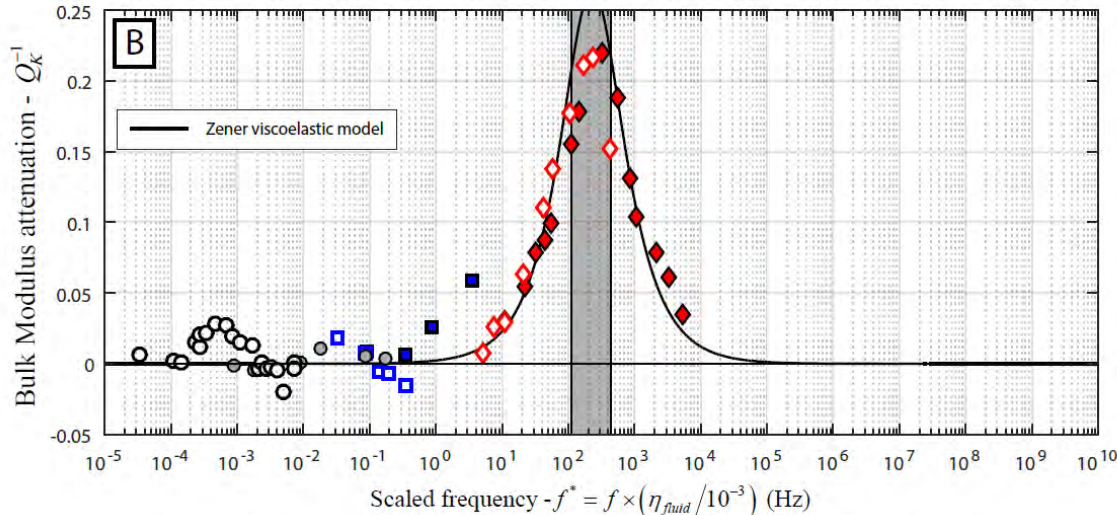
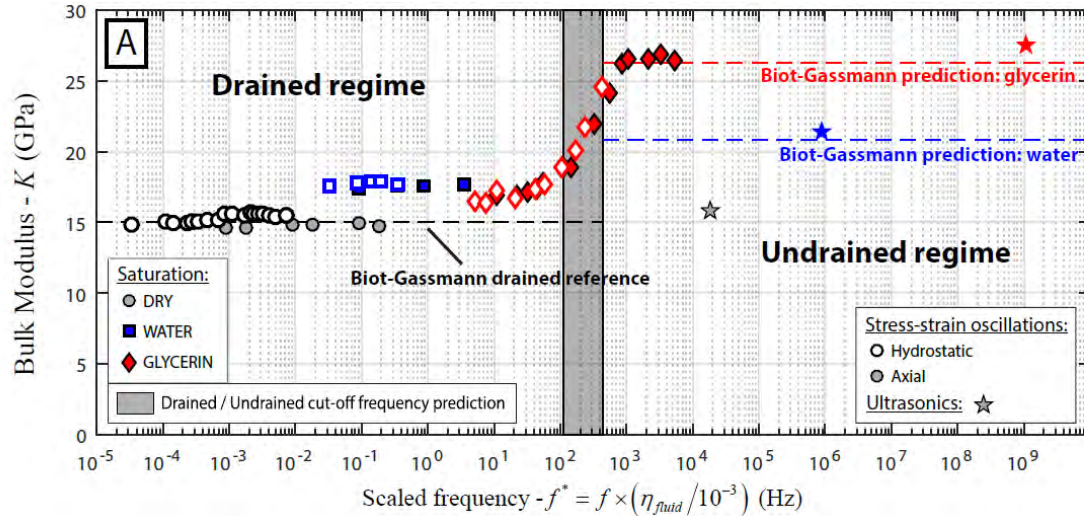


- 1: Macroporosity
- 2: Oolite
- 3: Echinoderm fragment
- 4: Syntaxial cement
- 5: Pellet.



# III- Resultats sur le Lavoux (carbonate)

$$P_{diff} = 2.5 \text{ MPa}$$



- Observation du passage drainé-non drainé à 500 Hz

- Validation de la prédiction de Biot-Gassman

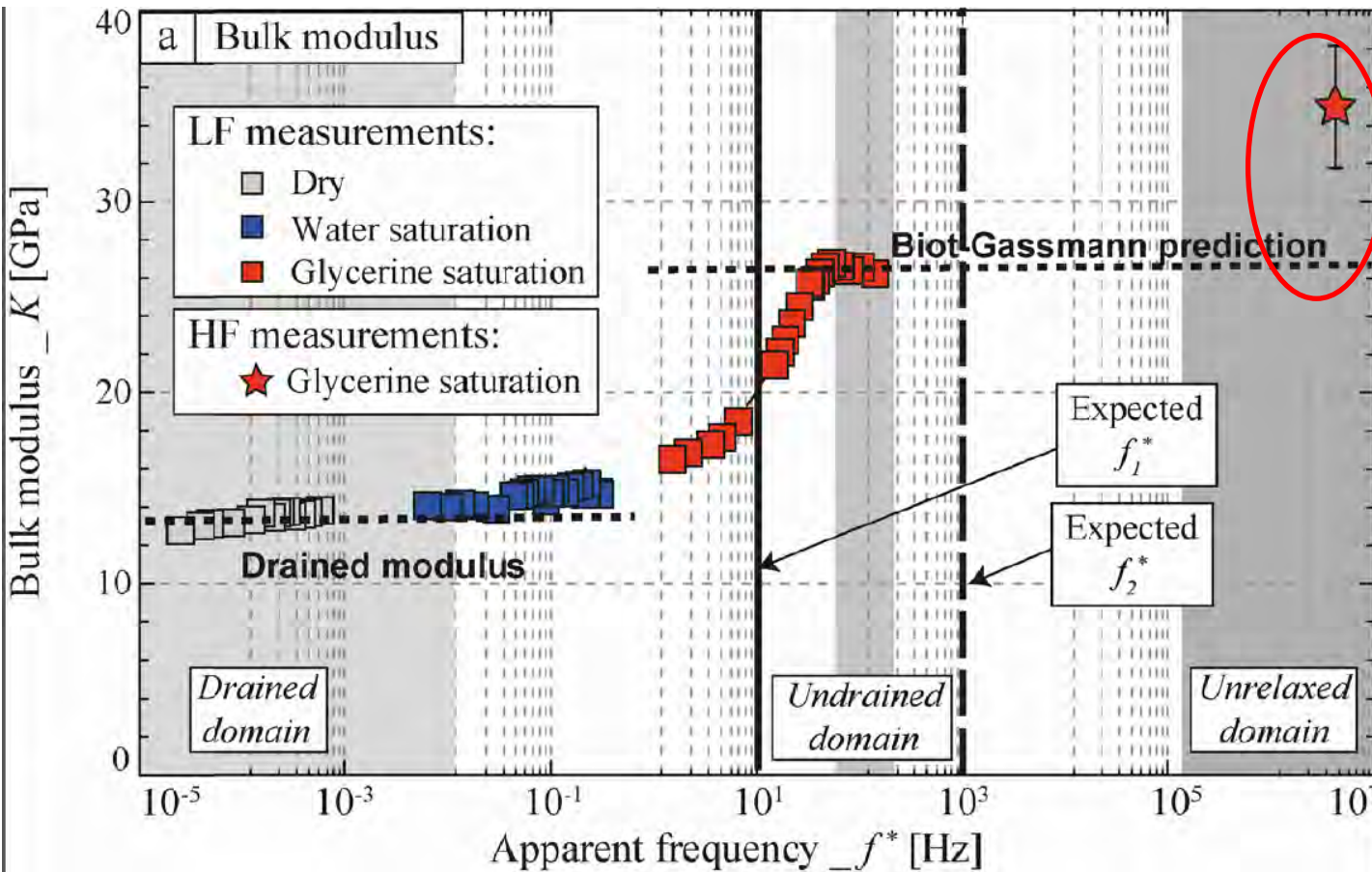
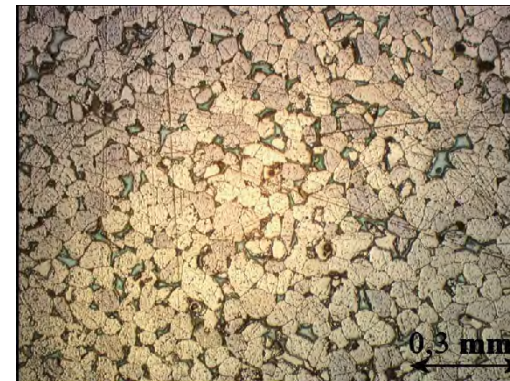
- Fréquence de coupure en accord avec la prédiction

- Pas de squirt flow !!

# III- Résultats sur le grès de Fontainebleau

$P_{eff} \sim 1 \text{ MPa}$

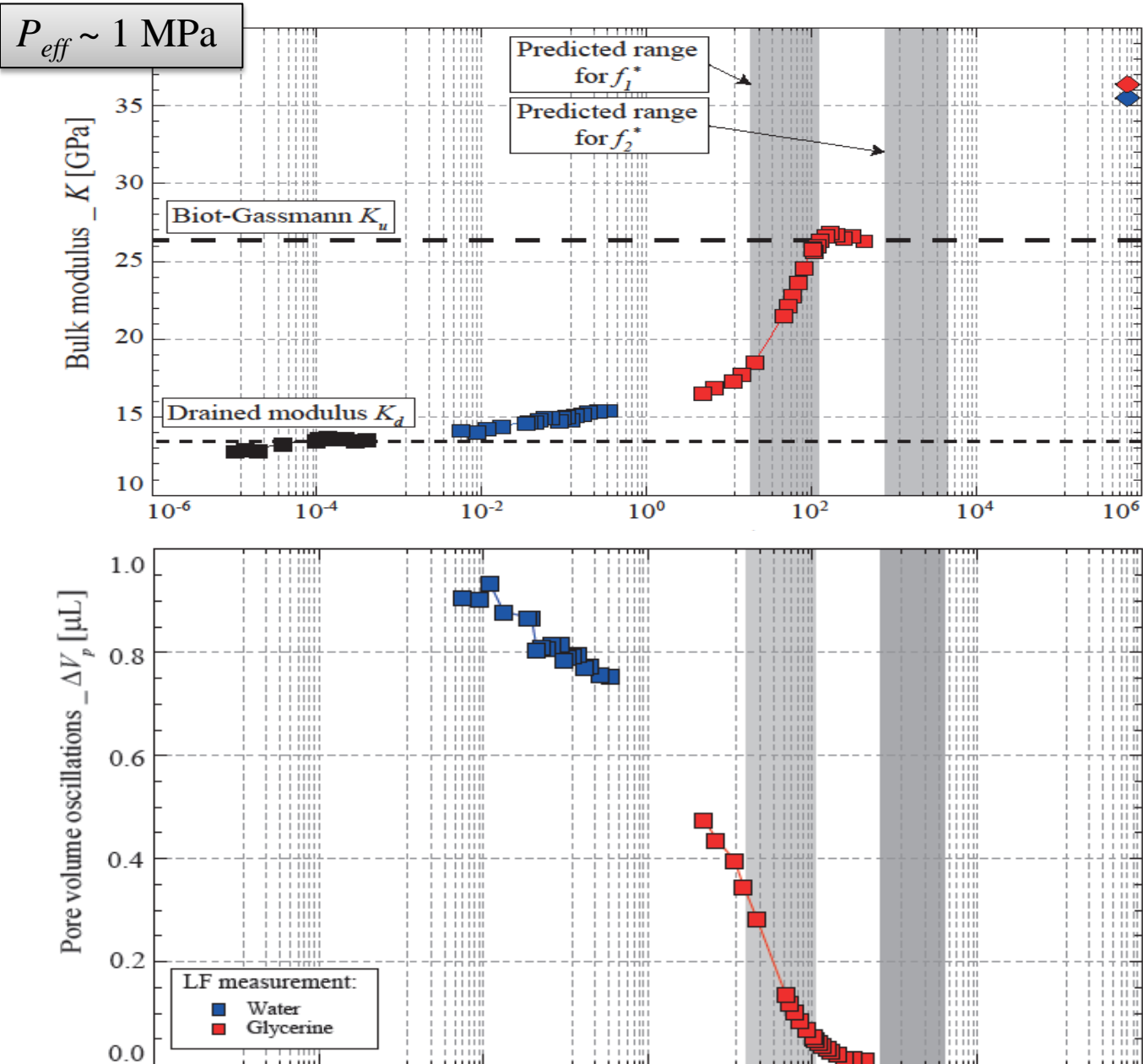
Sandstone  
 Porosity 7%  
 Permeability 1 mD  
 Pure quartz



**Dispersion :**  
 $D = (35 - 26) / 26 = 34 \%$

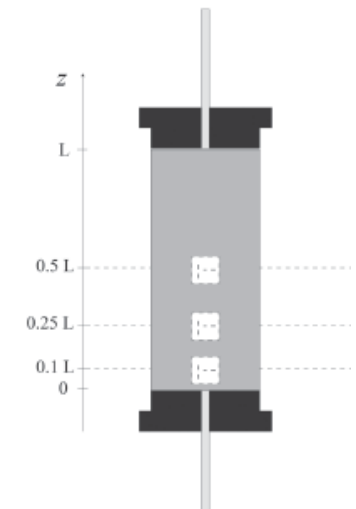
# III- Résultats sur le grès de Fontainebleau

## Focus sur la première transition drainé/non drainé



Volume de fluide entrant et sortant dans le système

Confirme la transition drainé – non drainé



Boundary conditions (1):

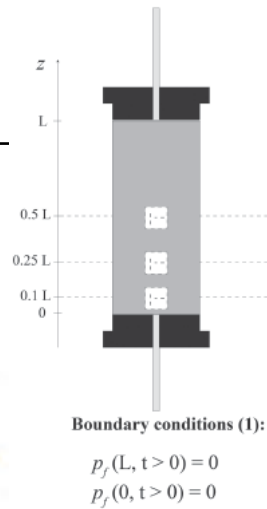
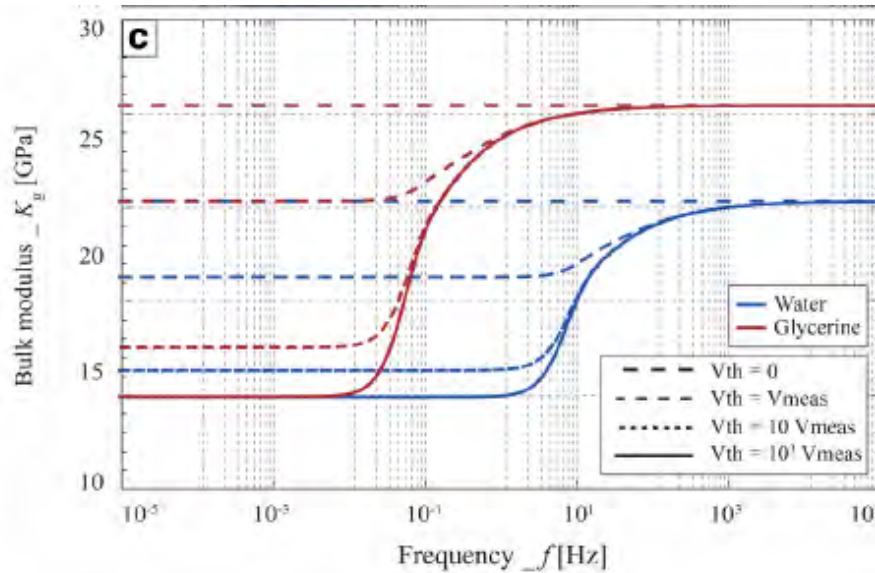
$$p_f(L, t > 0) = 0$$

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

# III- Résultats sur le grès de Fontainebleau

## Focus sur la première transition drainé/non drainé

Doit on prendre un système ouvert ou fermé ?



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

Conditions limites

- système ouvert (pression fixée au bord)
- système fermé (prise en compte des volumes morts)

*Ghabezloo et Sulem 2009*  
*Pimienta et al. 2016*

Une transition contrôlée par les conditions limites  
 L longueur de diffusion (de l'échantillon !)

$$f_1 \approx \frac{4kK}{\eta L^2}$$

Sur le terrain L est proportionnelle à la longueur d'onde

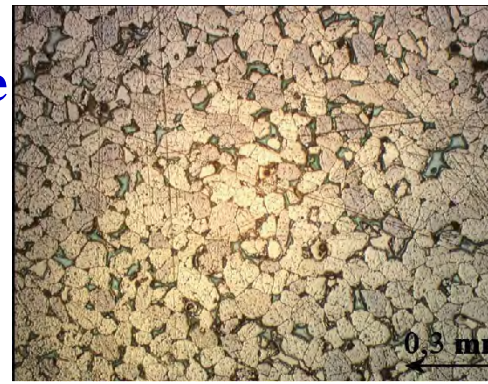
Néanmoins très intéressant

- donne des informations sur le comportement poromécanique de la roche
- Ne doit pas être confondu avec la transition non drainé / Haute fréquence !



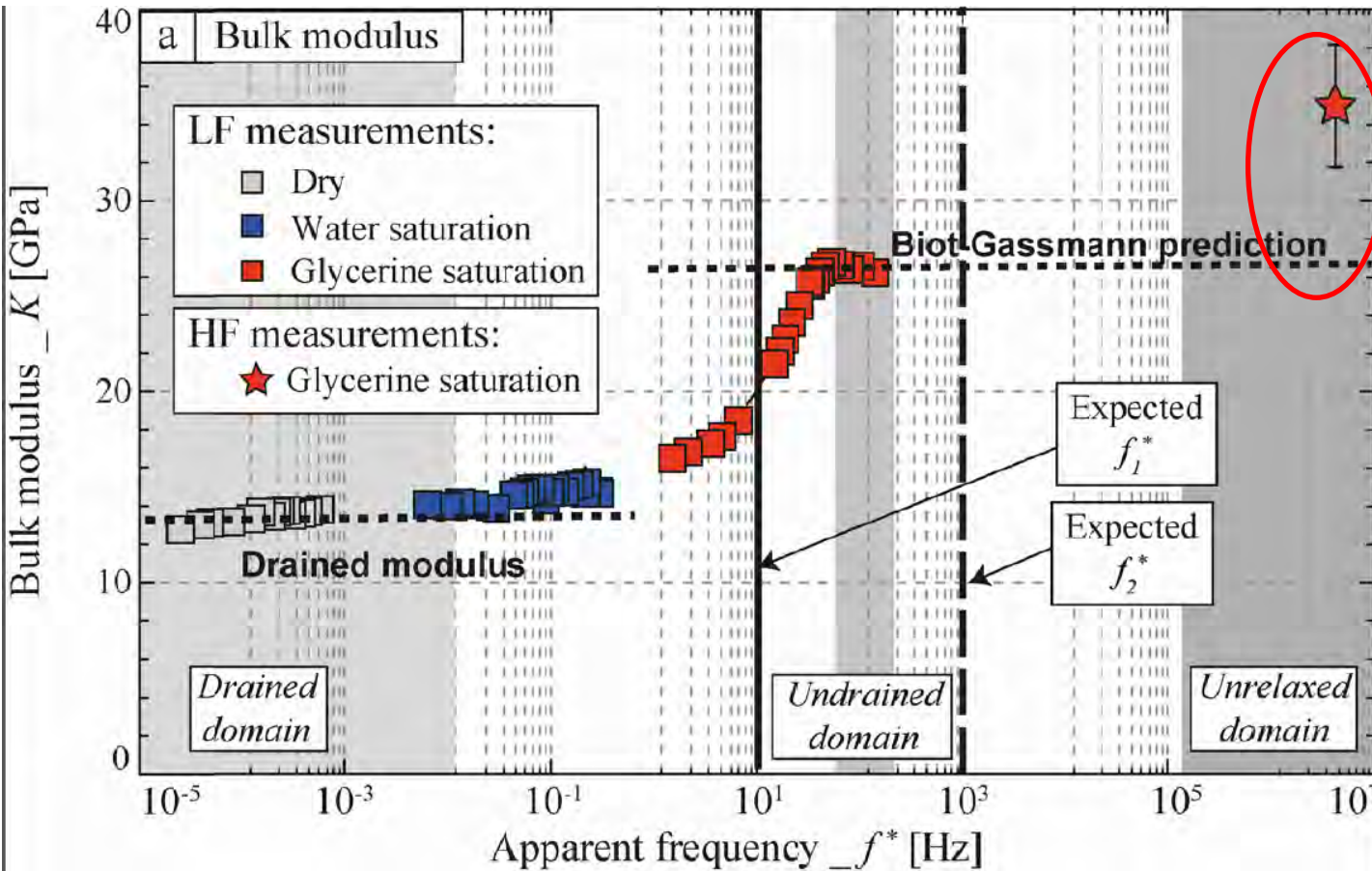
# III- Résultats sur le grès de Fontainebleau

## Focus sur la seconde transition non drainé – Haute Fréquence



Sandstone  
 Porosity 7%  
 Permeability 1 mD  
 Pure quartz

$P_{eff} \sim 1 \text{ MPa}$



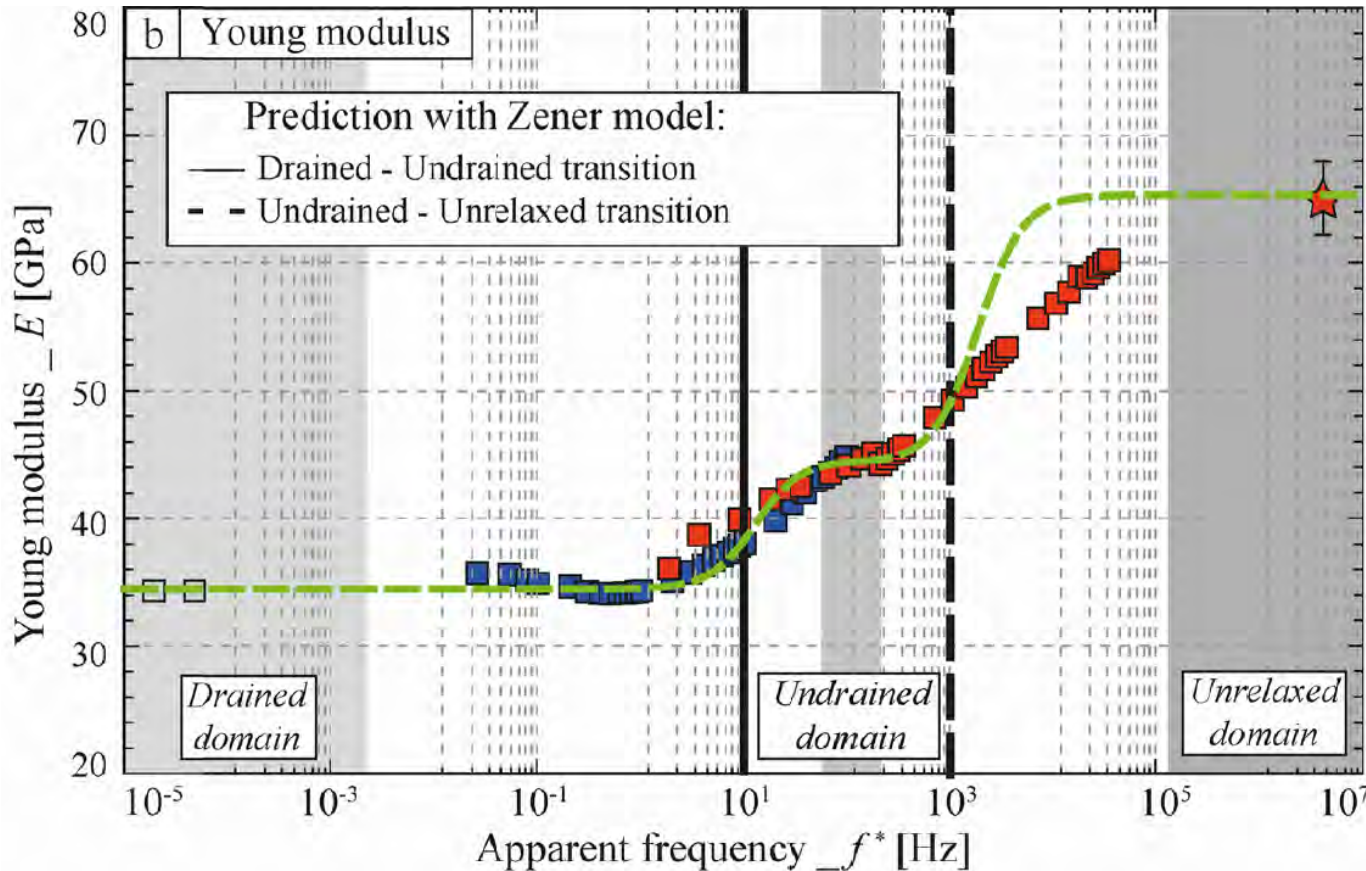
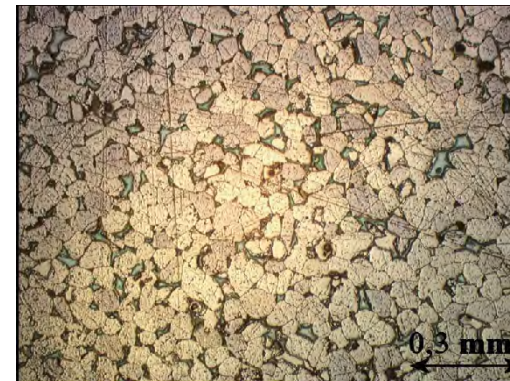
**Dispersion :**  
 $D = (35 - 26) / 26 = 34 \%$



# III- Resultats sur le grès de Fontainebleau

$P_{eff} \sim 1 \text{ MPa}$

Sandstone  
Porosity 7%  
Permeability 1 mD  
Pure quartz

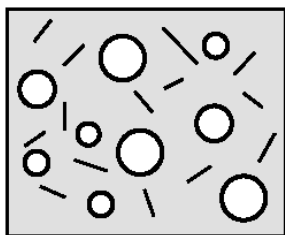
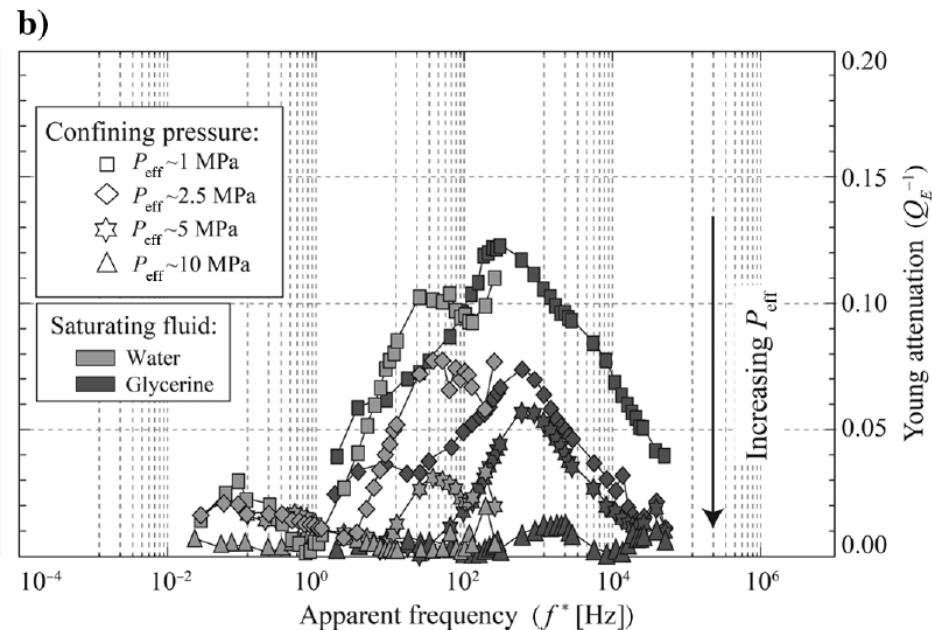
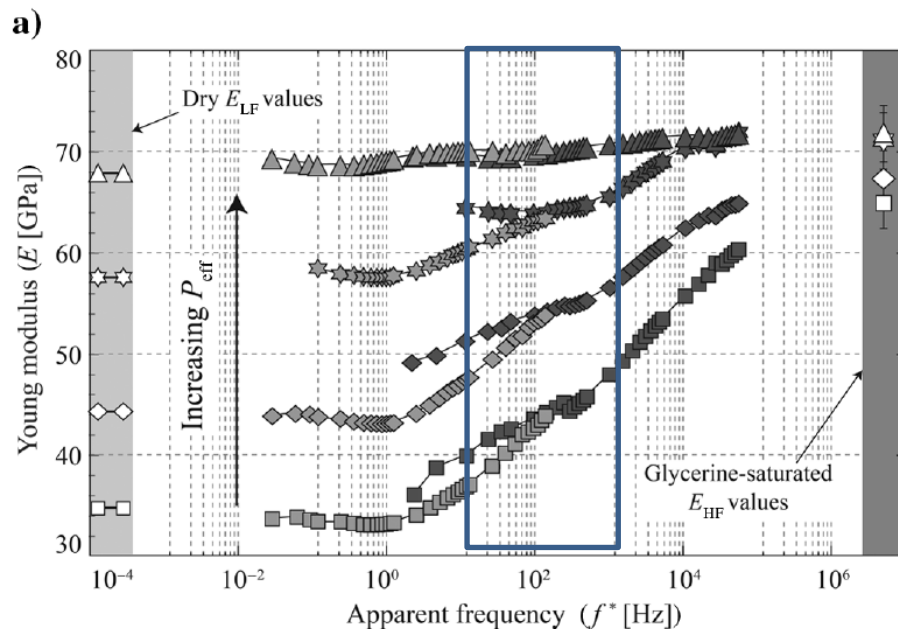


Mise en évidence  
d'une deuxième  
dispersion

# III- Resultats sur le grès de Fontainebleau

Si la pression de confinement est augmentée l'effet de squirt flow tend à disparaître

Sandstone  
Porosity 7%  
Permeability 1 mD  
Pure quartz



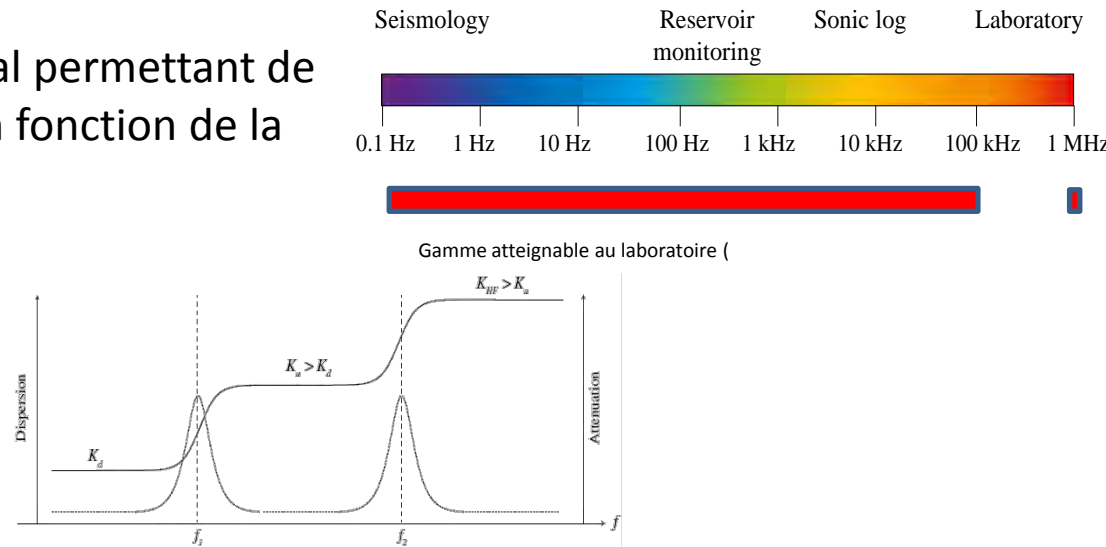
Avec la pression, les fissures se referment...

# Conclusions

- Nouveau dispositif expérimental permettant de mesurer les modules élastiques en fonction de la fréquence (sous pression)

- On observe deux Mécanismes de dispersion

- La transition drainé-non drainé est toujours observée et se modélise dans le cadre de la poroélasticité
- La seconde transition est fortement corrélée avec la microstructure (présence ou non de fissures ou de vides très souples) et être attribué à un mécanisme de squirt-flow



---

# Merci

---



## Références sur les effets de fréquences

- Adelinet et al. GRL 2010
- Adelinet et al. Tectonophysics 2011
- David et al. Geophysics 2013
- Fortin et al. TLE 2014
- Pimienta et al. Geophysics 2015a
- Pimienta et al. Geophysics 2015b
- Pimienta et al. Geophysics 2015c
- Pimienta, et al. G. P. 2016
- Borgomano et al. JGR 2017