



CFMR 14 septembre 2017

Avancées expérimentales en mécanique des roches

Jérôme Fortin

Ecole normale supérieure, Laboratoire de Géologie, Paris – France



Sommaire

1- Introduction

2- L'apport des mesures acoustiques

3- L'apport des mesures de champs

4- Deux techniques émergentes : la fibre et les mesures dynamiques



dépasser les frontières



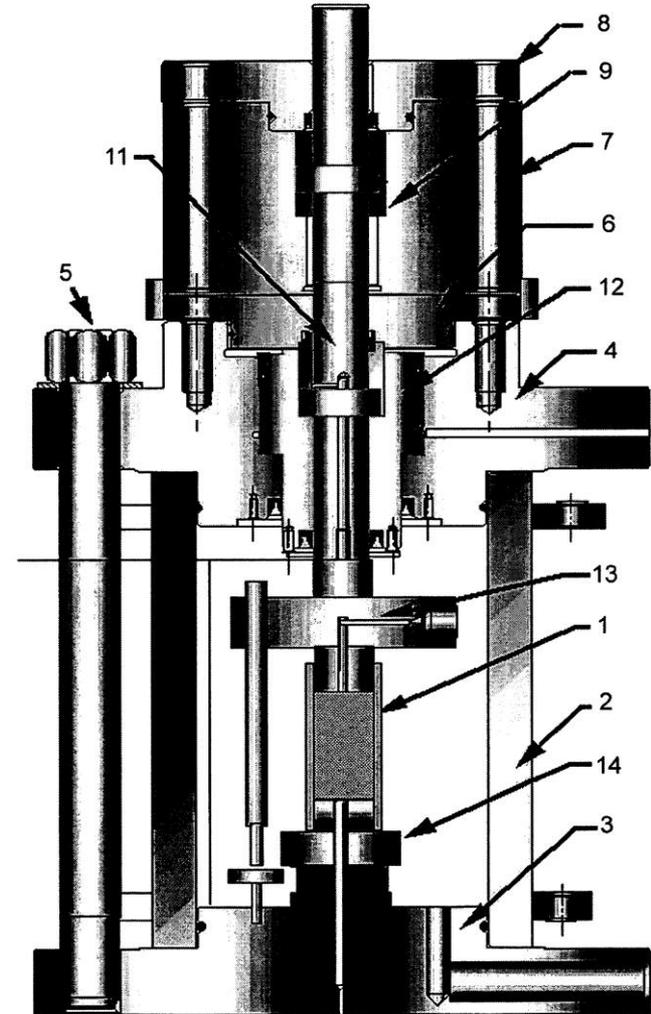
Introduction

Objectif : mesures expérimentales des propriétés (poro-)élastiques et des caractéristiques à rupture (charge maximale, mode de localisation...)

But : reproduire les conditions in situ (état de contrainte, déformation)

Moyen le plus utilisé : presse triaxiale

Principe : mesure de la déformation (via des jauges de déformation ou LVDT) au cours d'un chargement

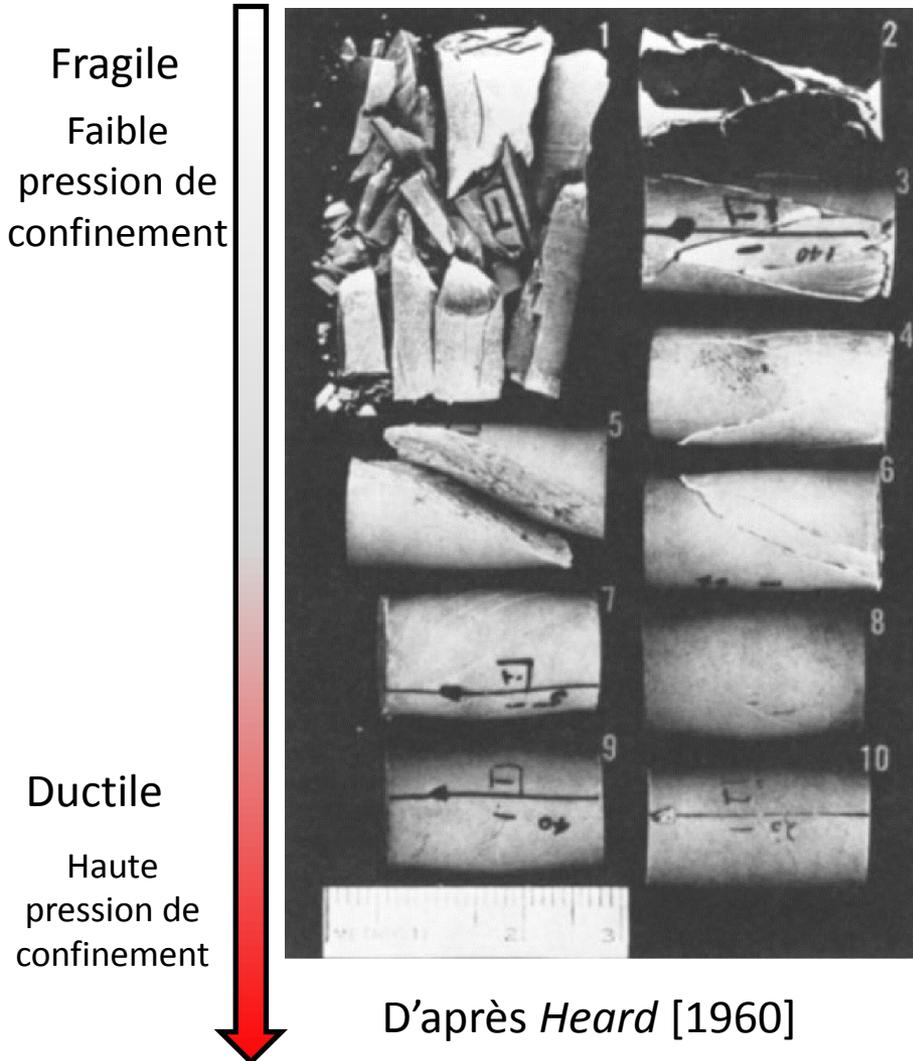


Presse triaxiale Geodisign

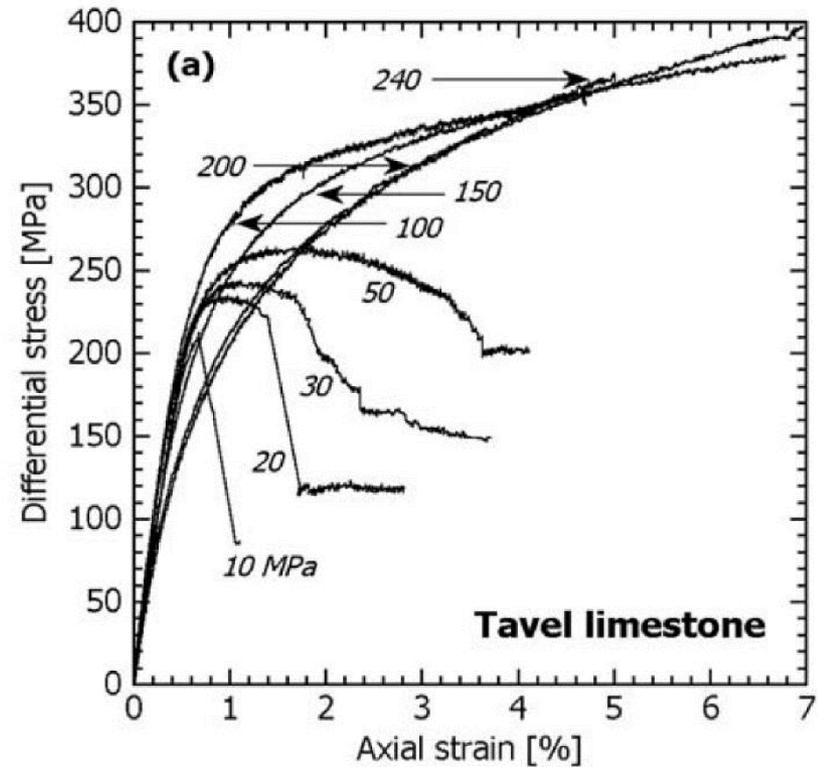
Fig. 2

Introduction

Objectif : mesures expérimentales des propriétés (poro-)élastiques et des caractéristiques à rupture (charge maximale, mode de localisation...)



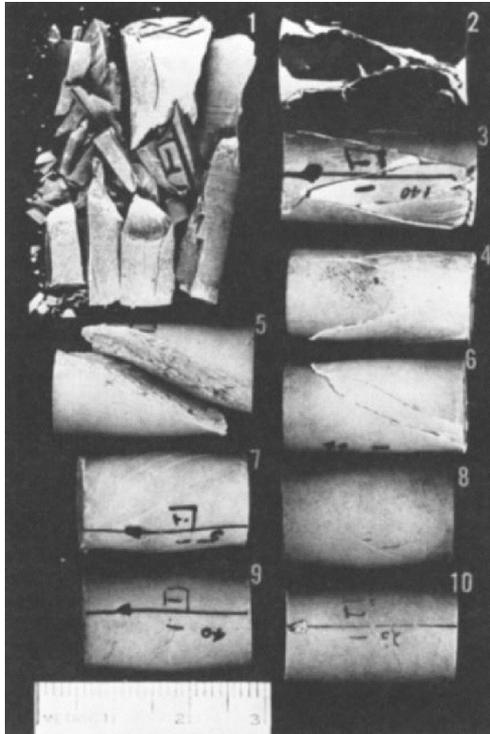
Exemple sur un carbonate



Vajdova et al. [2004]

Introduction

Objectif : mesures expérimentales des propriétés (poro-)élastiques et des caractéristiques à rupture (charge maximale, mode de localisation...)



Heard [1960]

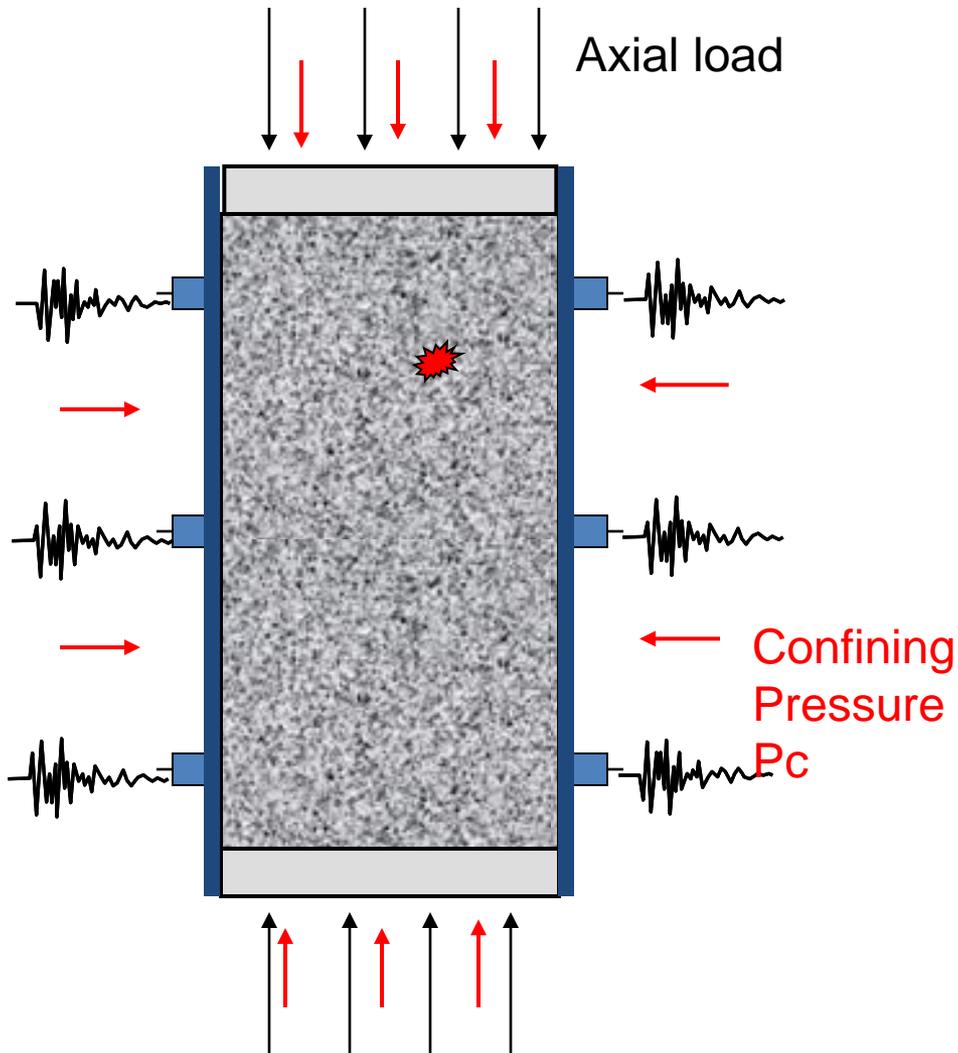


Bésuelle et al. [2000]

Que se passe t-il dans l'échantillon au cours de l'expérience ? Quels sont les micro-mécanismes ? Comment se forme la localisation de la déformation ? Pour voir ce qui se passe, deux approches complémentaires : l'acoustique et les mesures de champs

L'apport des mesures acoustiques

Principe de la mesure



3 types de mesures

- Comptage des émissions acoustiques
- Mesure des vitesses des ondes
- Localisation des événements

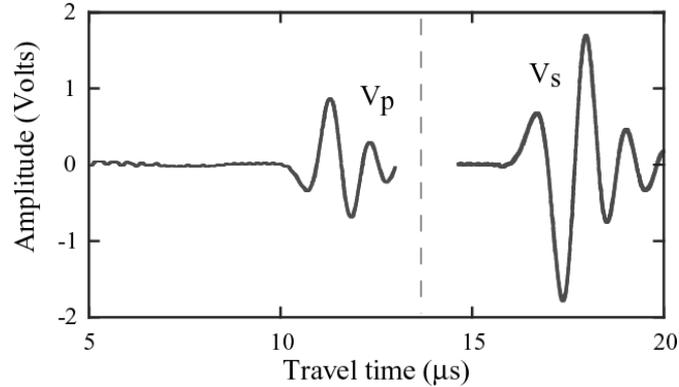
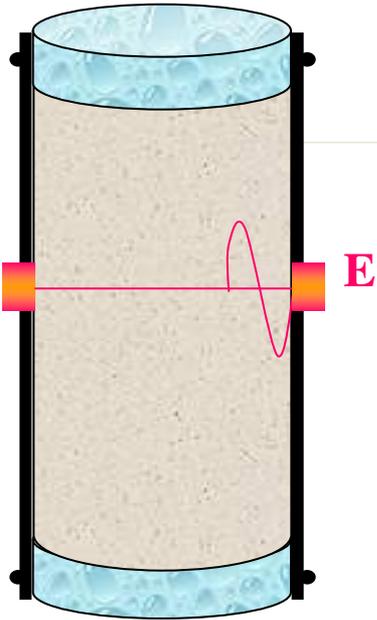
12-15 récepteurs P

*⇒ Temps d'arrivée
+ champ de vitesse
= localisation de l'événement*

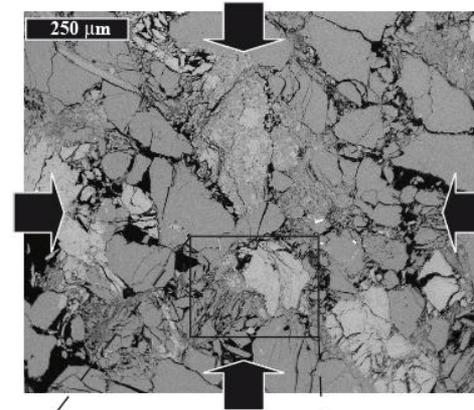
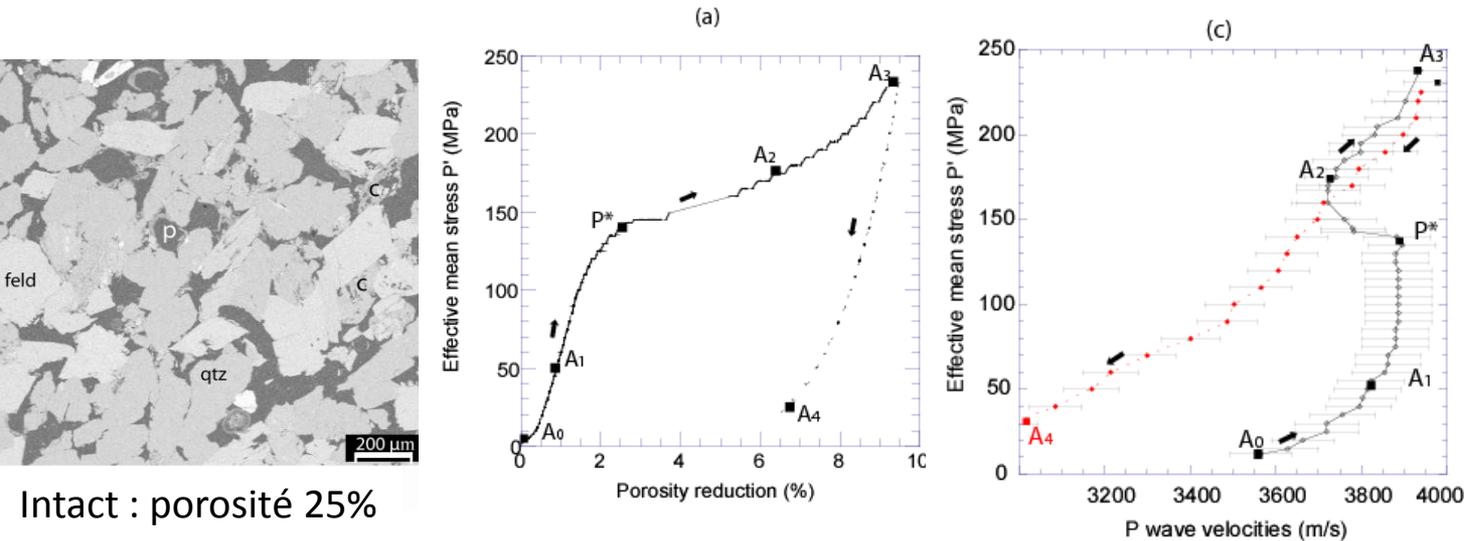
*Mesures des vitesses actualisées
toutes les ~30 secondes*

L'apport des mesures acoustiques

1 – Les vitesses des ondes élastiques

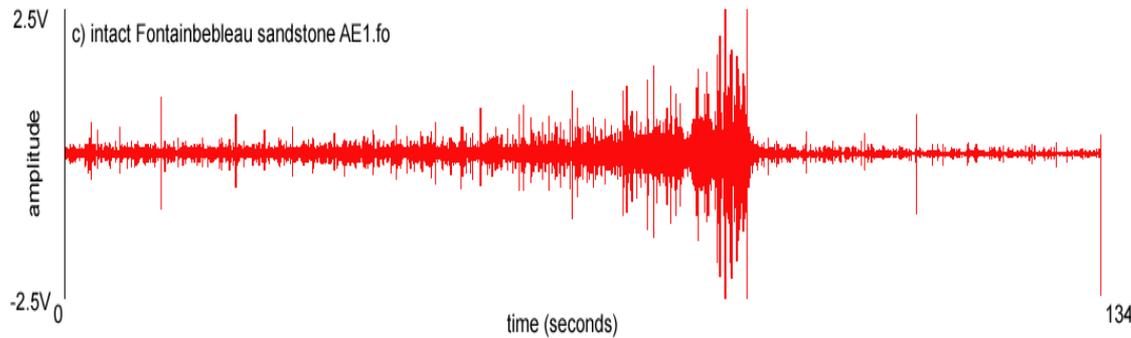
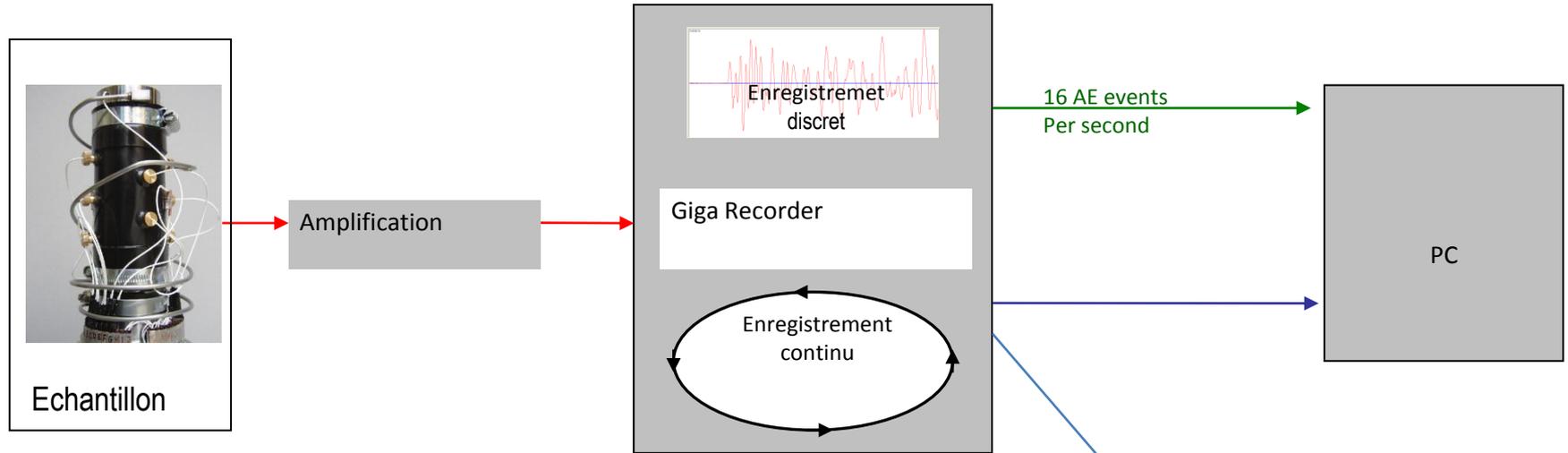


Exemple : Evolution de la vitesse des ondes P pendant la compaction d'un grès



L'apport des mesures acoustiques

2 – La relocalisation des émissions acoustiques



Exemple d'un enregistrement continu

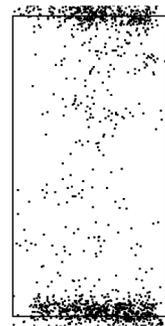
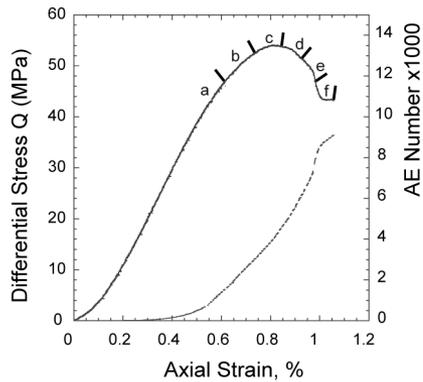


L'apport des mesures acoustiques

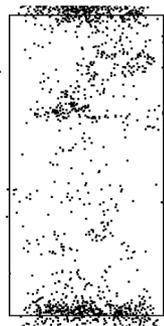
2 – La relocalisation des émissions acoustiques

Shear localization

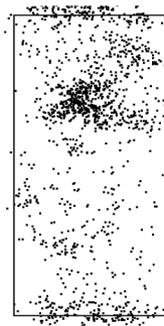
(Vo#4 - Triaxial load, $P_c=20$ MPa, $P_p=10$ MPa)



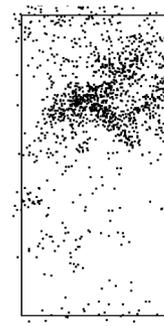
a) 1537 ev.



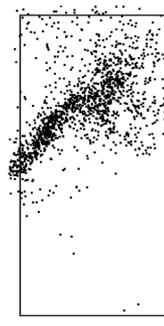
b) 1527 ev.



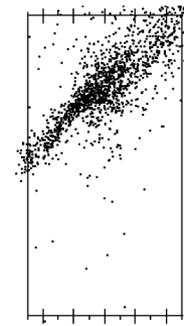
c) 1527 ev.



d) 1527 ev.



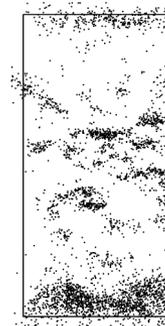
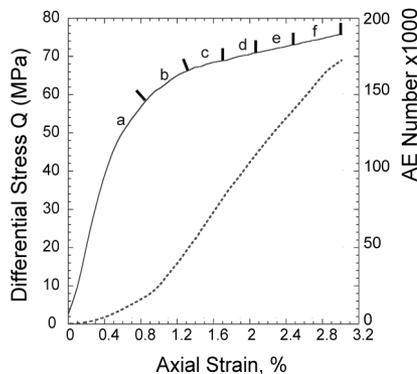
e) 1527 ev.



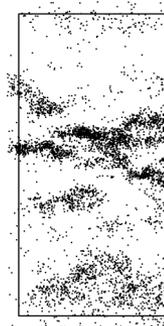
f) 1527 ev.

Compaction localization

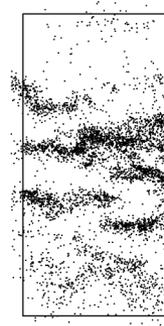
(Vo#3 - Triaxial Load, $P_c=80$ MPa, $P_p=10$ MPa)



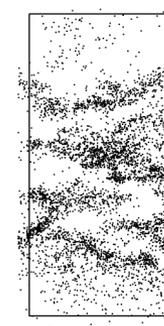
a) 3838 ev.



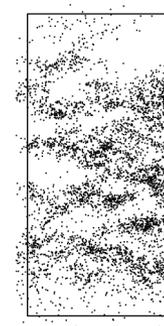
b) 4653 ev.



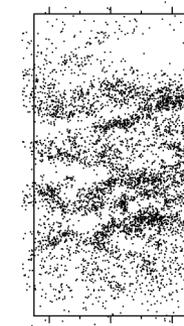
c) 5049 ev.



d) 5118 ev.



e) 5037 ev.

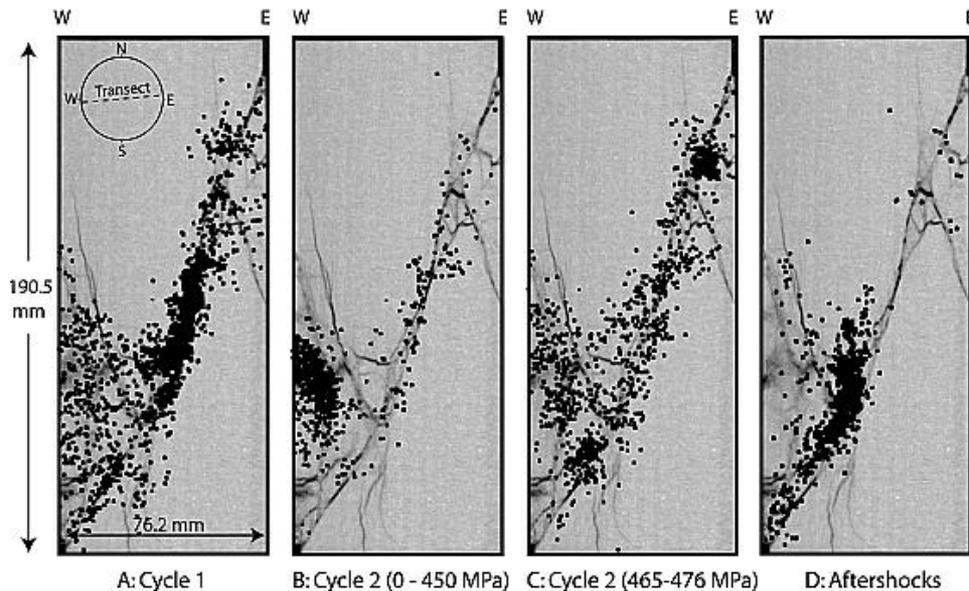


f) 5454 ev.

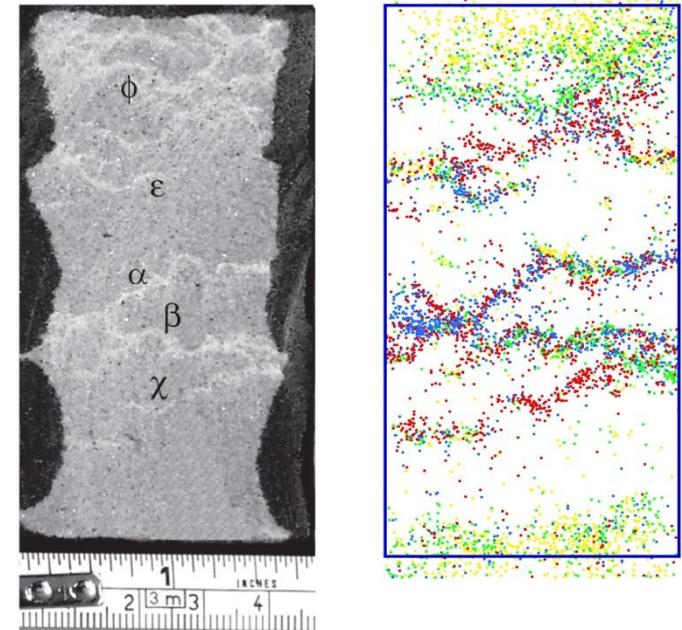
L'apport des mesures acoustiques

2 – La relocalisation des émissions acoustiques

Rupture fragile (Thompson et al. 2009)



Localisation sous forme de bande de compaction (Fortin et al. 2006)



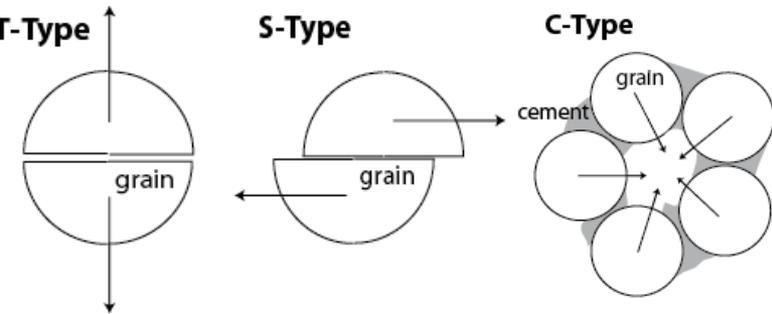
Avantage :

- Un suivi au cours du temps des événements
- Technique qui a été utilisée sur des granites, grès, argiles ... Un contre exemple : les carbonates

L'apport des mesures acoustiques

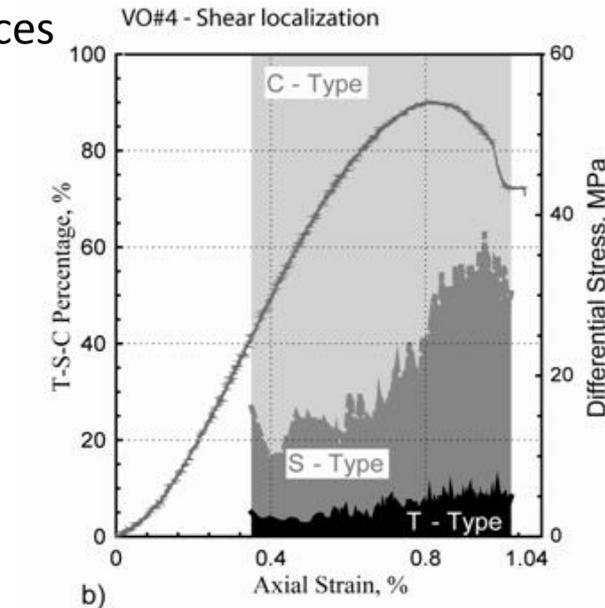
3 – Emissions acoustiques et sismologie

- Possibilité au laboratoire d'étudier les mécanismes à la sources



$$pol = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n sign(A_i)$$

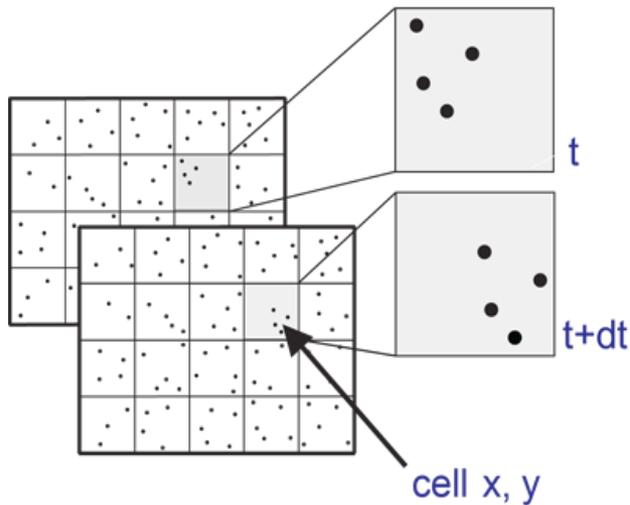
Zang et al. 1998



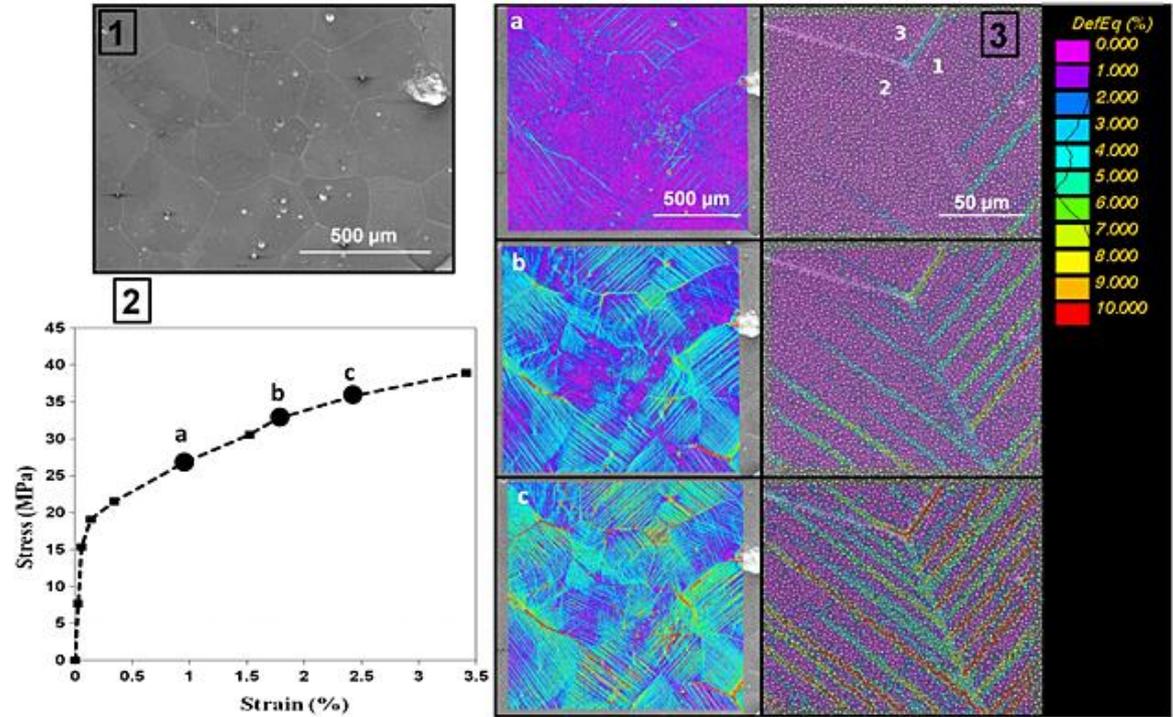
- Les lois de sismologie sont validées au laboratoire
 - Loi de Gutenberg-Richter (Goodfellow et al. 2014)
 - Loi d'Omori (Schubnel et al 2007)

L'apport des mesures de champs

Principe : Deux images à instant différent donnent accès au champ de déformation



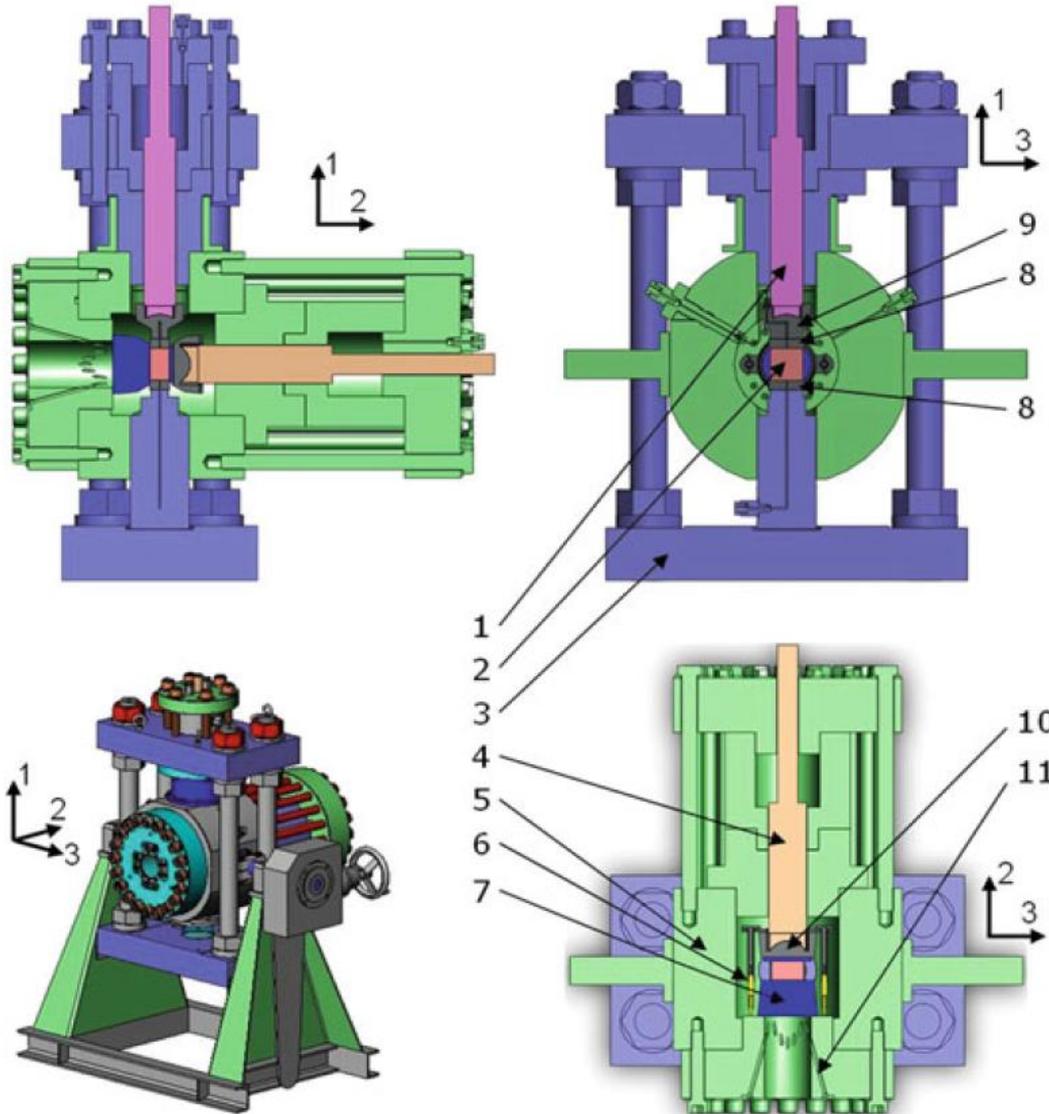
Bornert et al. 2004



Imagerie obtenue sous un MEB, l'échantillon est du sel (halite) ayant une taille de grain de l'ordre de 250 μm . On observe du glissement plastique intragranulaire et du glissement aux joints de grain (Bourcier et al. 2013)

L'apport des mesures de champs

Mesure sous pression ...



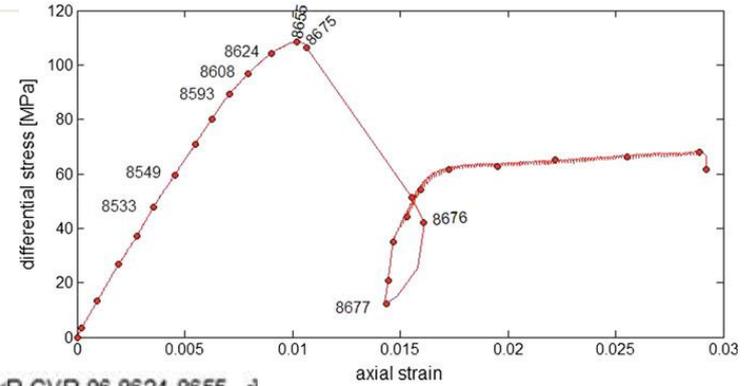
- Echantillon cubique
- Pression max 100 Mpa
- 1 face transparente !

Bésuelle et Lanatà (2016 et 2017).

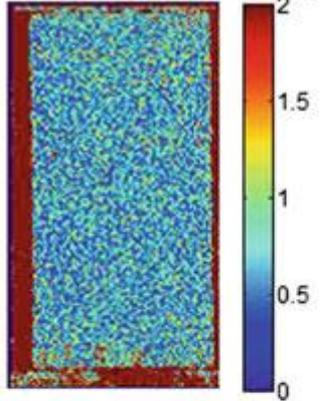
L'apport des mesures de champs

Mesure sous pression ...

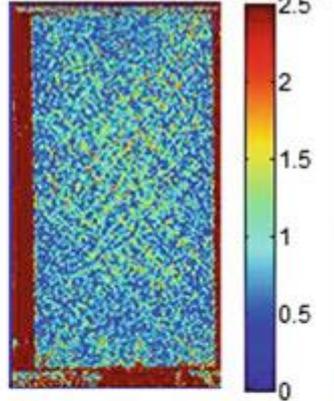
Grès des Vosges, $P_c = 20$ MPa



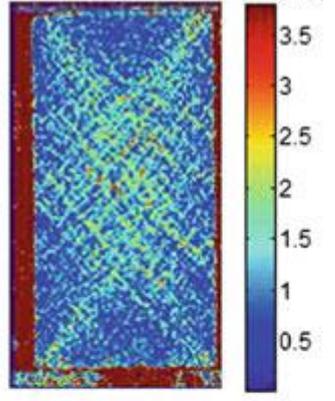
I2 : BxR.GVR.06.8533-8549 $\times 10^{-3}$



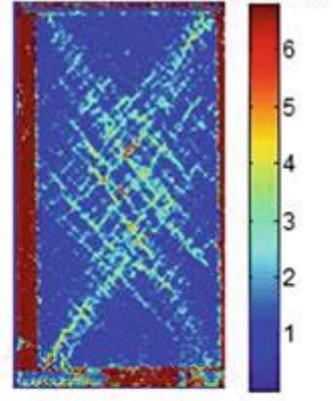
I2 : BxR.GVR.06.8593-8608 $\times 10^{-3}$



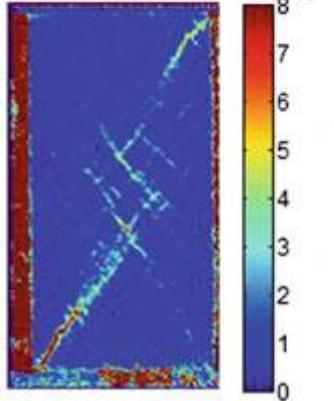
I2 : BxR.GVR.06.8608-8624 $\times 10^{-3}$



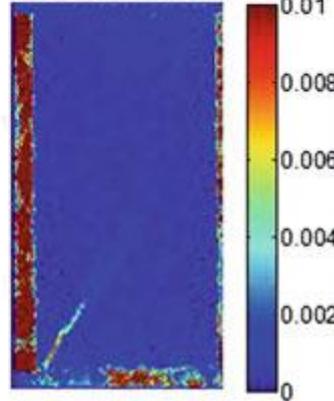
I2 : BxR.GVR.06.8624-8655 $\times 10^{-3}$



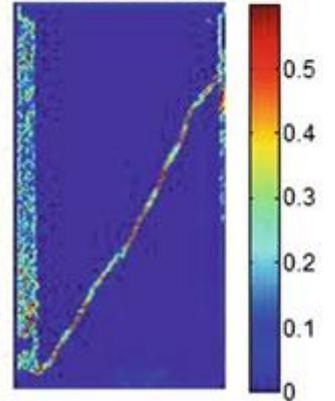
I2 : BxR.GVR.06.8655-8675 $\times 10^{-3}$



I2 : BxR.GVR.06.8675-8676

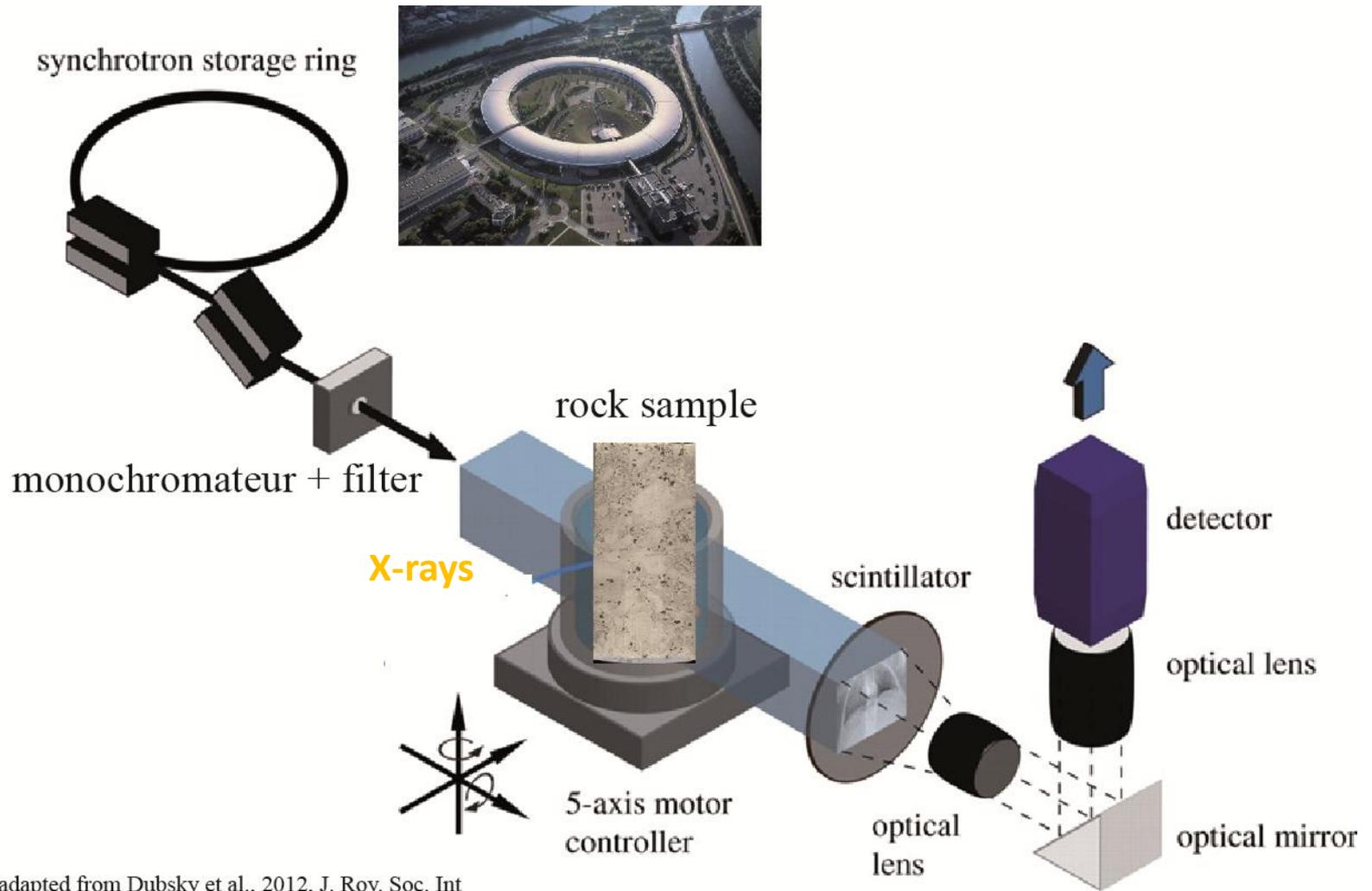


I2 : BxR.GVR.06.8676-8677

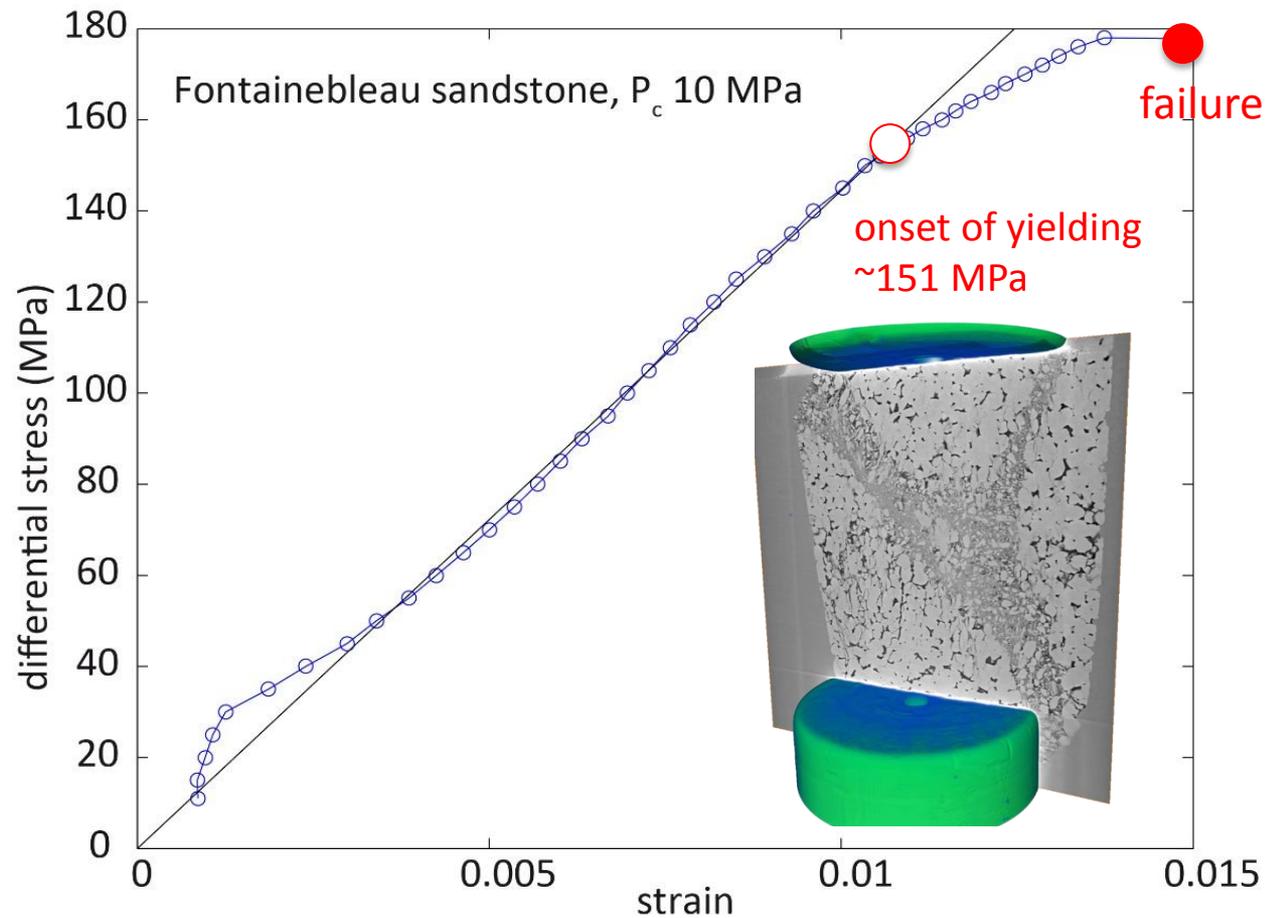
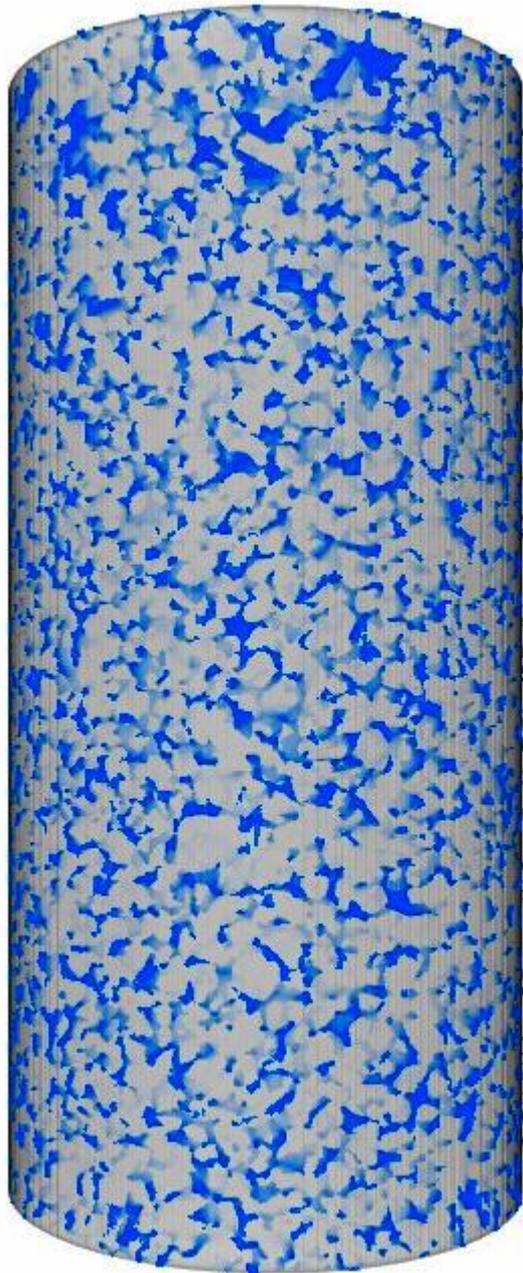


Bésuelle et Lanatà (2016 et 2017).

L'imagerie 3D



Résultat sur un grès de Fontainebleau

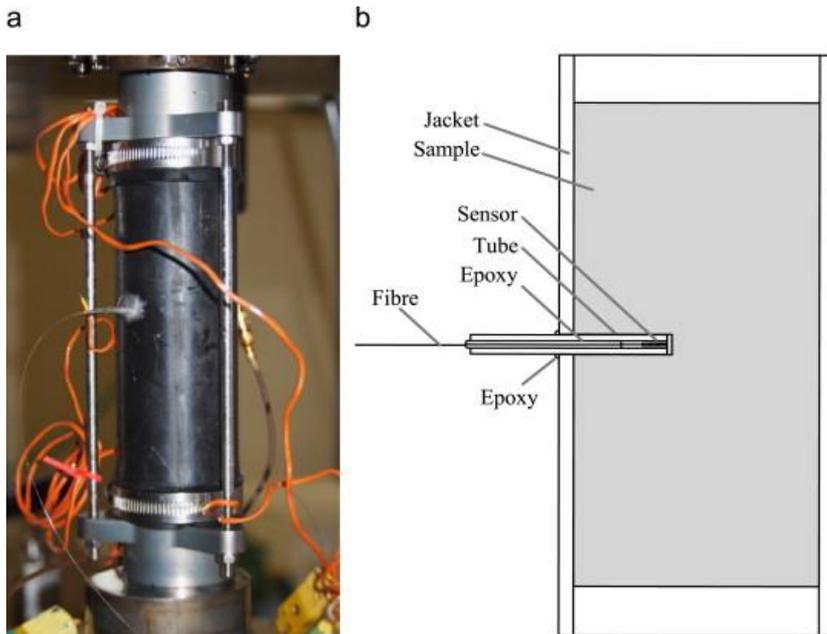


Relation contrainte – déformation dans un grès de Fontainebleau. 1 image 3D est prise à chaque cercle.

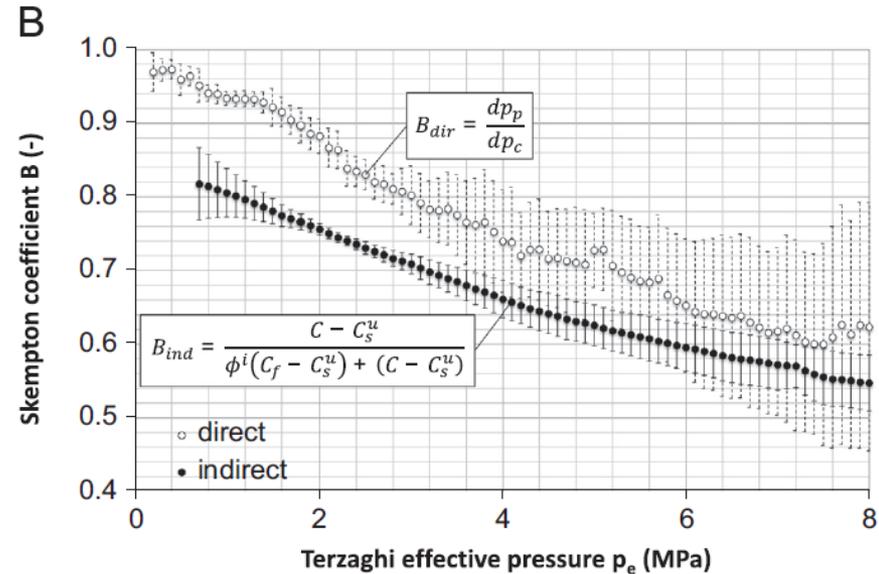
Techniques émergentes

La fibre optique

Capteur pour mesurer la pression de fluide dans la roche



Reinsh et al. 2011



Blocher et al. 2014

Une autre application possible pour la fibre qui devrait se développer : mini-sismomètre optique

Techniques émergentes

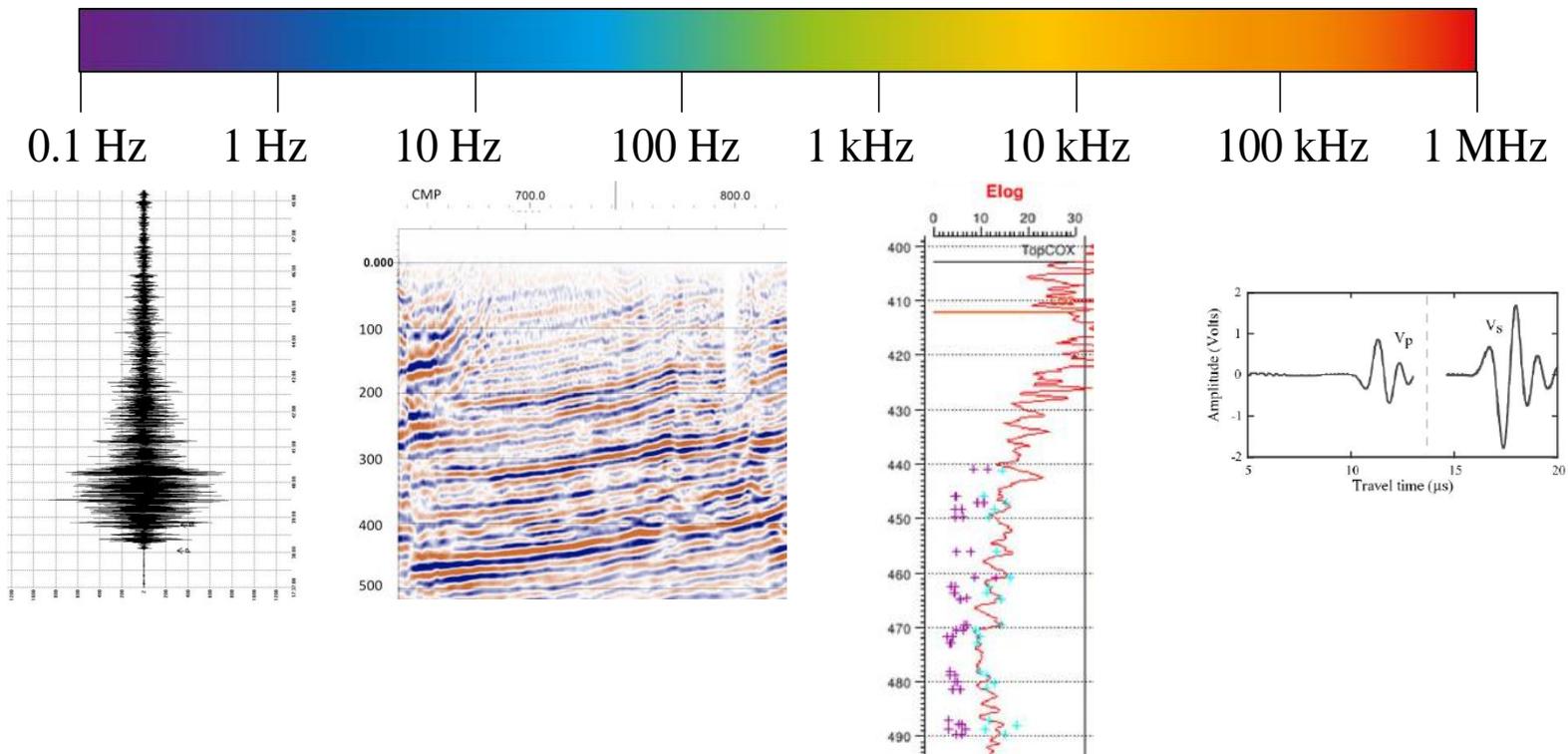
Les mesures dynamiques

Seismology

Reservoir
monitoring

Sonic log

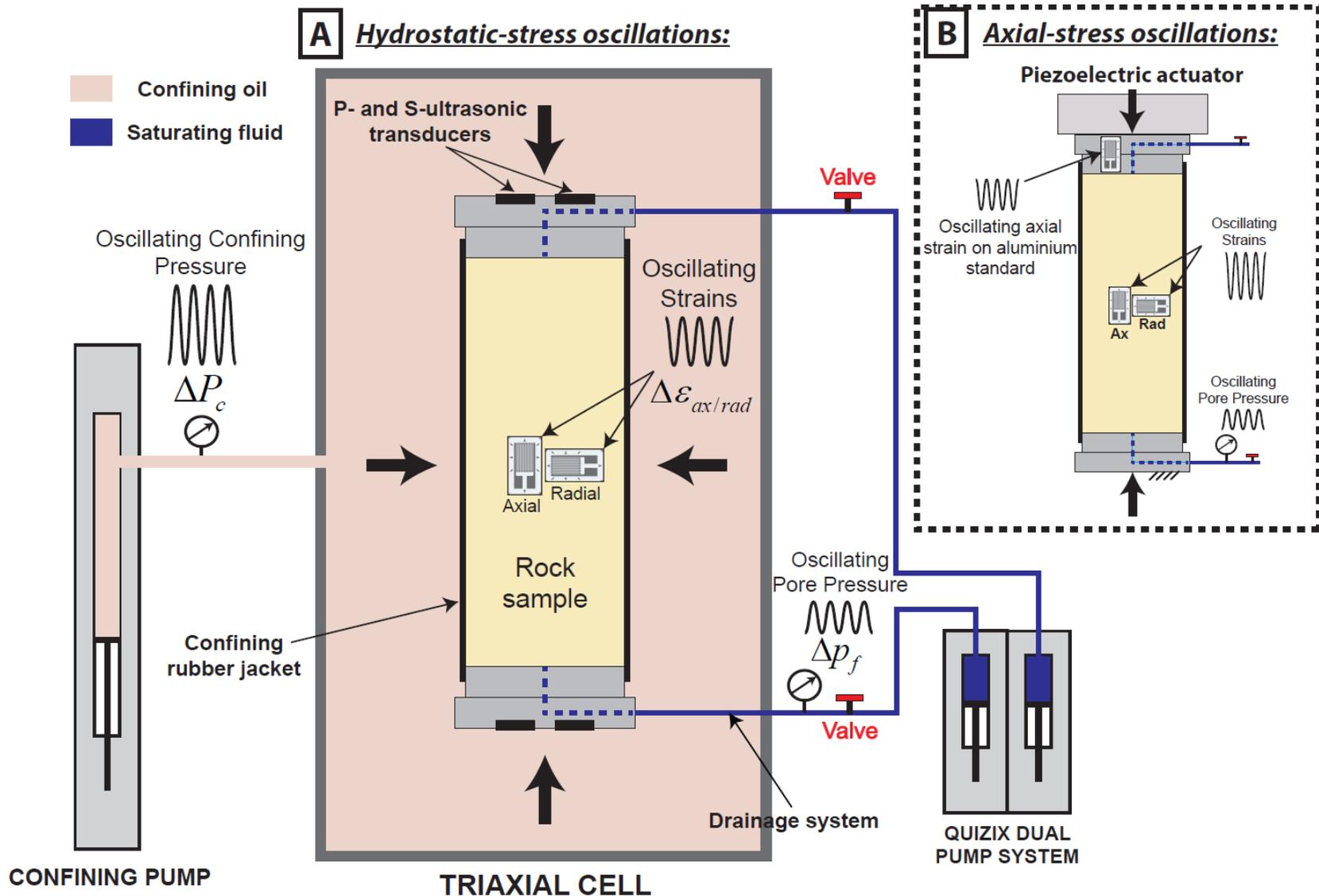
Laboratory



Pour un milieu saturé, la vitesse des ondes augmentent avec la fréquence ...

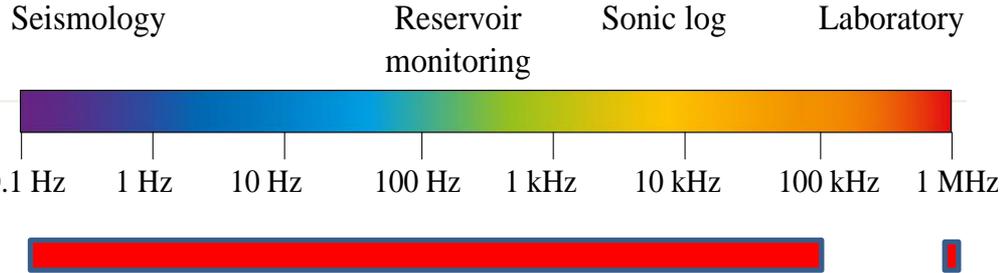
Techniques émergentes

Les mesures dynamiques

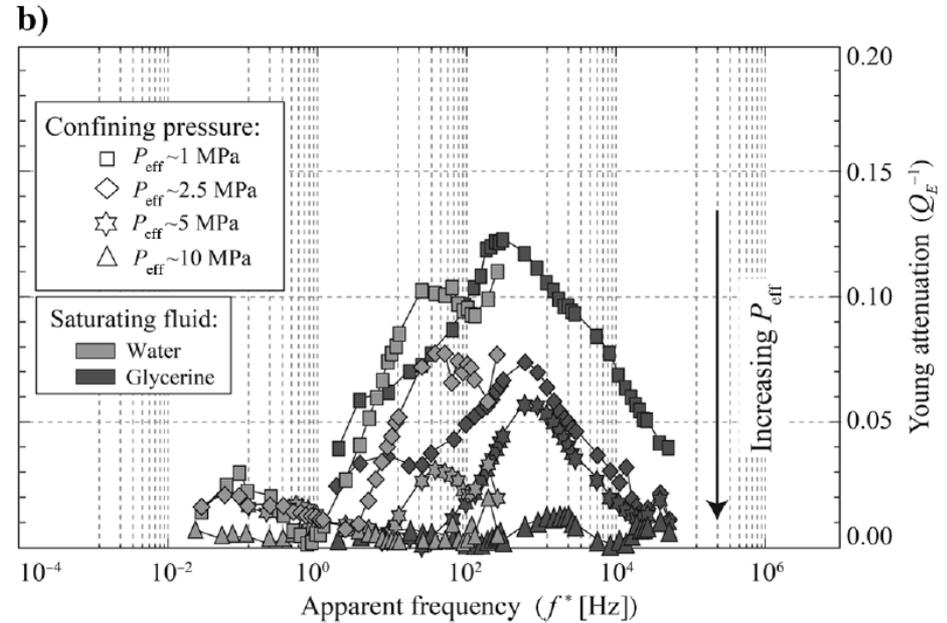
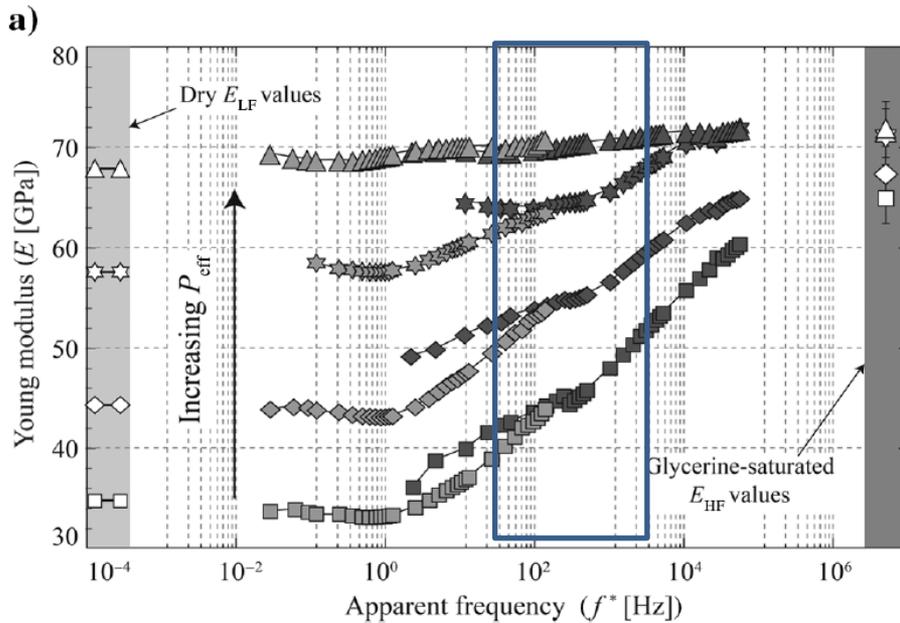


Techniques émergentes

Les mesures dynamiques



Pimienta et al. Geophysics 2015



Une autre application possible la comparaison des modules élastiques statiques et dynamiques...

Conclusions

- Des progrès considérables en mécanique des roches expérimentales au cours des 15 dernières années
- Dans une première partie nous avons vu l'intérêt des mesures acoustiques : vitesses des ultrasons, relocalisation des émissions acoustiques, lien avec la sismologie.
- La seconde partie montre l'intérêt des méthodes de champs 2D et 3D.
- Enfin deux nouvelles techniques émergentes sont mentionnées : la fibre optique, et les mesures des modules dynamiques.

La mécanique des sols et des **roches expérimentale dispose aujourd'hui de nouveaux outils efficaces et stimulants** pour aussi bien pour caractériser les propriétés poroélastiques des roches, leur signature acoustique ou les phénomènes localisés.

Merci de votre attention

