

*" Avancées en mécanique des roches expérimentales "*  
*Paris 10 juin 2010*

---

# Etude Expérimentale de la signature géophysique des basaltes

---

---

Jérôme Fortin<sup>1</sup>, M. Adelinet<sup>1</sup>,  
Y. Guéguen<sup>1</sup>, S. Stanchits<sup>2</sup>, S. Vinciguerra<sup>3</sup>

1 - Laboratoire de Géologie, Ecole normale supérieure, Paris – France

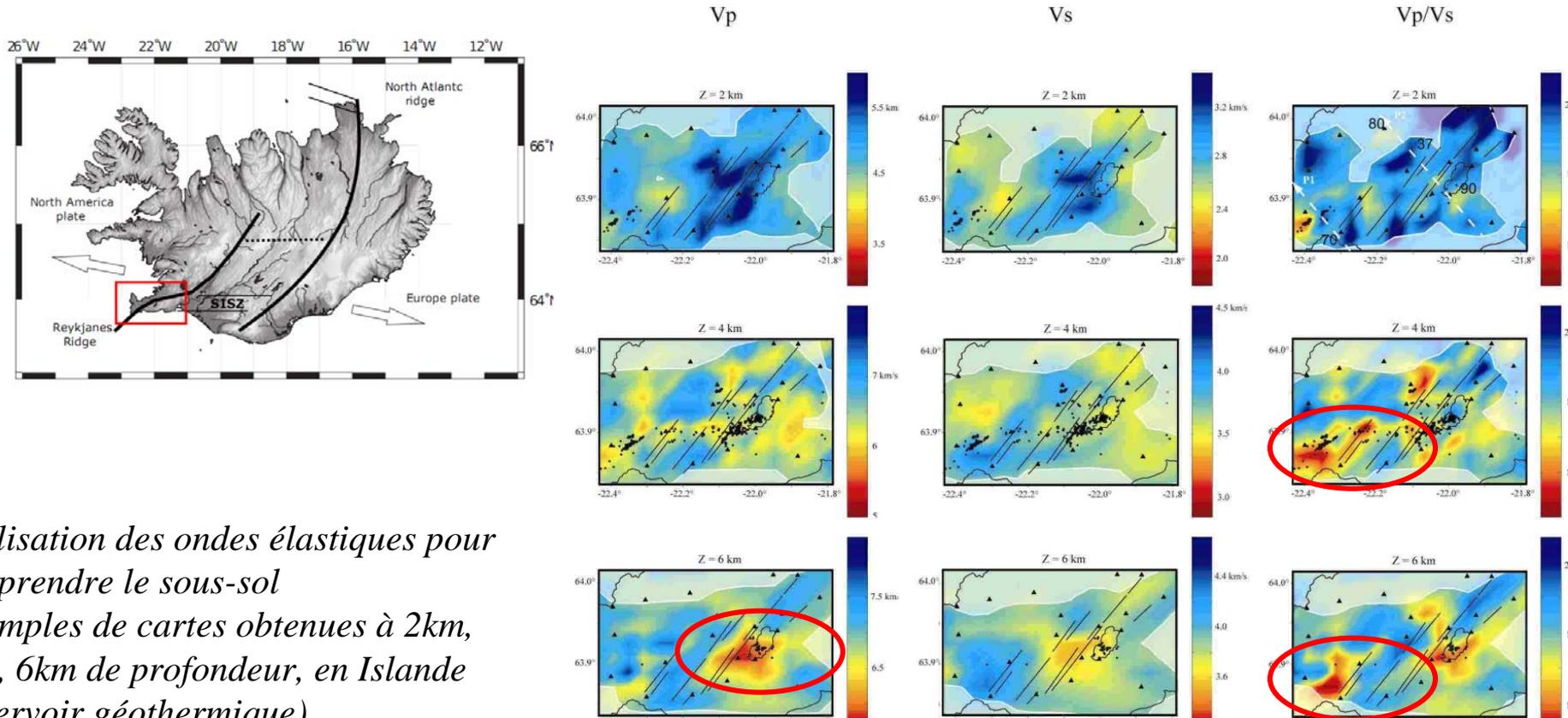
2 – GeoForschungsZentrum Potsdam

3 – INGV Rome



# Objectif à long terme

→ Peut-on contraindre l'interprétation des cartes de tomographie de vitesses avec des mesures de laboratoire?



-Utilisation des ondes élastiques pour comprendre le sous-sol

-exemples de cartes obtenues à 2km, 4km, 6km de profondeur, en Islande (réservoir géothermique)

Observation d'anomalies en profondeur

# Plan de l'exposé

---

I- Etude des relations entre vitesse des ondes et perméabilité pendant la déformation d'un basalt (basalte de l'Etna)

1.1 Chargement hydrostatique

1.2 Chargement déviatorique

II- Etude de la dispersion liée au changement d'échelle de fréquence (modules élastiques basses et hautes fréquences) (basalte Islandais)

2.1 Nouvelle approche expérimentale

2.2 Mise en évidence du squirt-flow

---

# I-Roche étudiée : le basalte

---

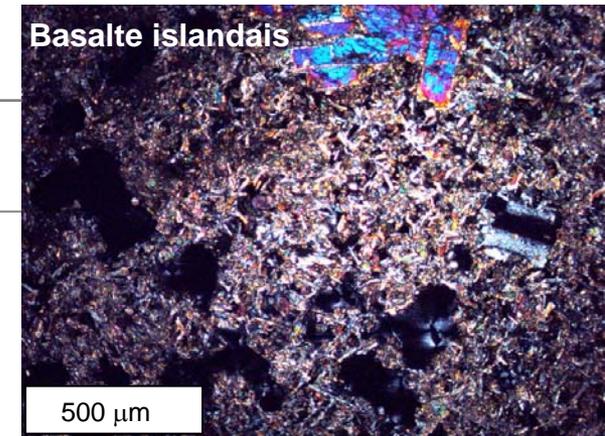
→ Basalte

---

Texture microlithique (pyroxène, olivine and feldspath)

Porosité variable suivant les conditions de formation

---



## Basalte de l'Etna étudié

Porosité totale 2 %

Essentiellement une porosité (~1%)  
de fissures (liée au choc thermique  
pendant le refroidissement de la lave)  
+ ~1 % de porosité de bulles

## Basalte Islandais étudié

Porosité connectée totale 8 %

caractérisée par une double porosité

- porosité de fissures 1 %
- porosité de pore ronds 7 %

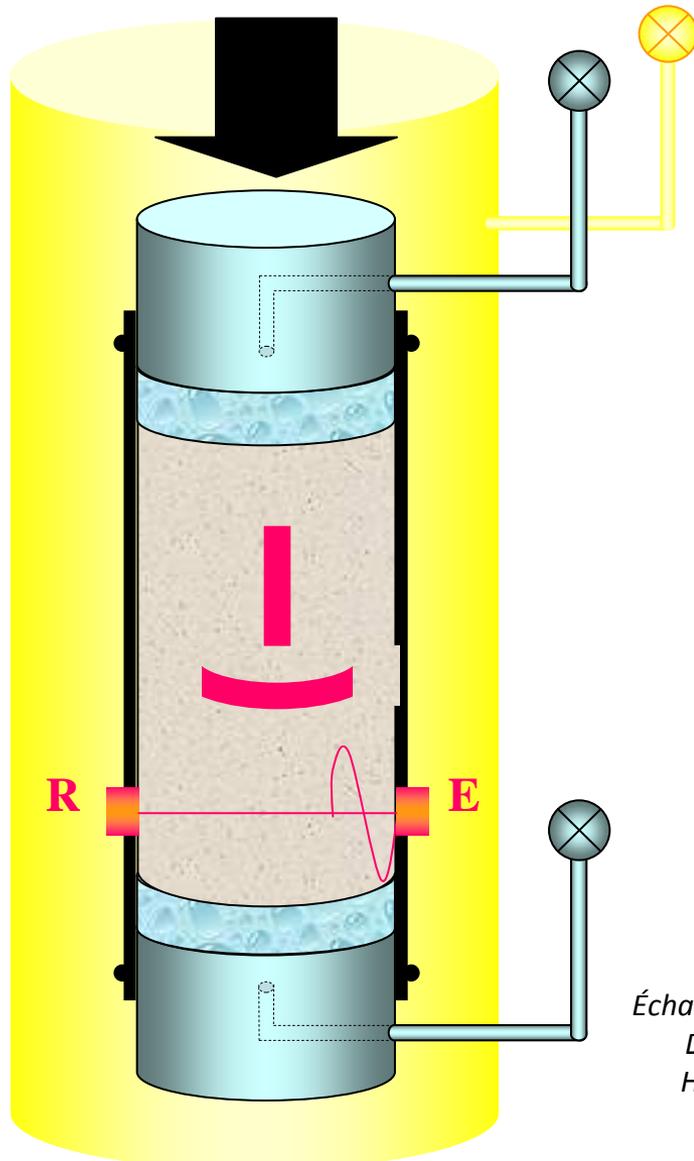
---

**Partie I- Etude des relations entre vitesse des ondes et perméabilité pendant la déformation d'un basalte (basalte de l'Etna)**

---

## II- Dispositif expérimental

→ Presse triaxiale



- Configuration d'essai

Plaquettes de diffusion  
Embases percées  
Jaquette de néoprène

- Chargement

- 1- Pression de confinement et pression de pore (fixée à 10 MPa)
- 2- Chargement axial

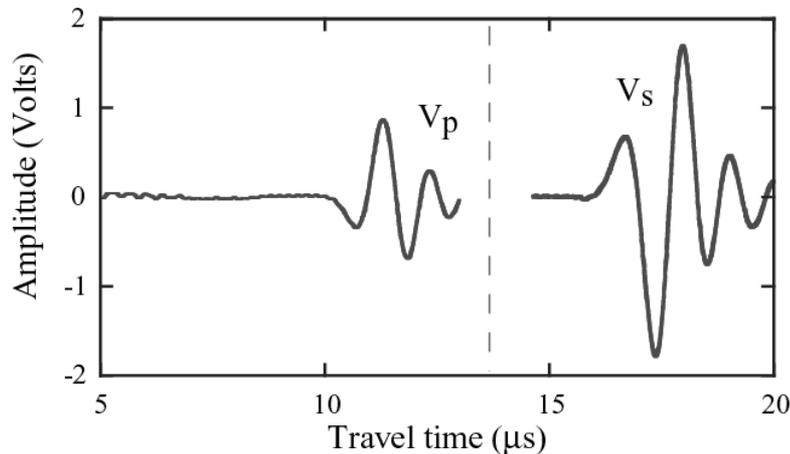
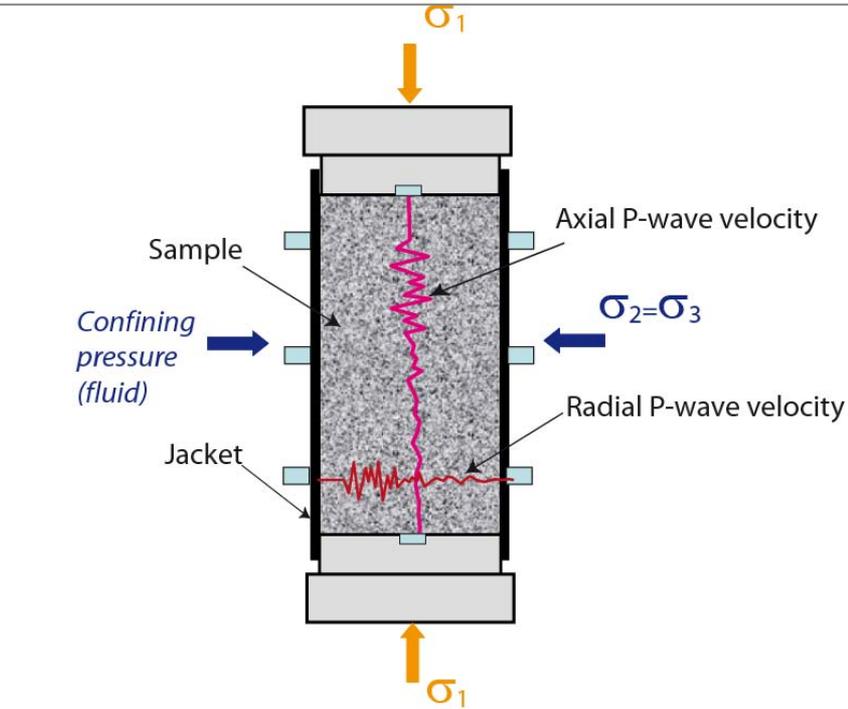
- Mesures

- 1- Déformations de l'échantillon :  
→ *déformation axiale + radiale (jauge)*
- 2) Vitesse des ondes élastiques  $V_p$  et  $V_s$  :  
→ *capteurs piézo-électriques (1 MHz)*
- 3) Mesure de la perméabilité

Échantillons cylindriques  
Diamètre 50mm  
Hauteur 100 mm

## II- Dispositif expérimental

→ Mesure des vitesses des ondes élastiques



Vitesse des ondes élastiques :

→ capteurs piézo-électriques (1 MHz)

- mesure de  $V_p$  axial

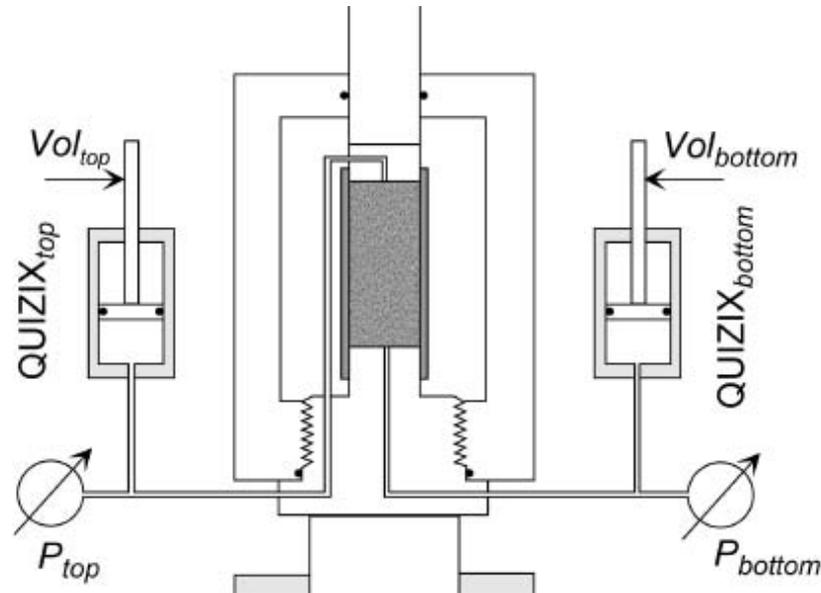
- mesure de  $V_p$  radial

- mesure de  $V_s$  (Sh)

- mesure de  $V_s$  (Sv)

## II- Dispositif expérimental

→ Mesure de la perméabilité



Fluide utilisé : eau – pression de pore = 10 MPa

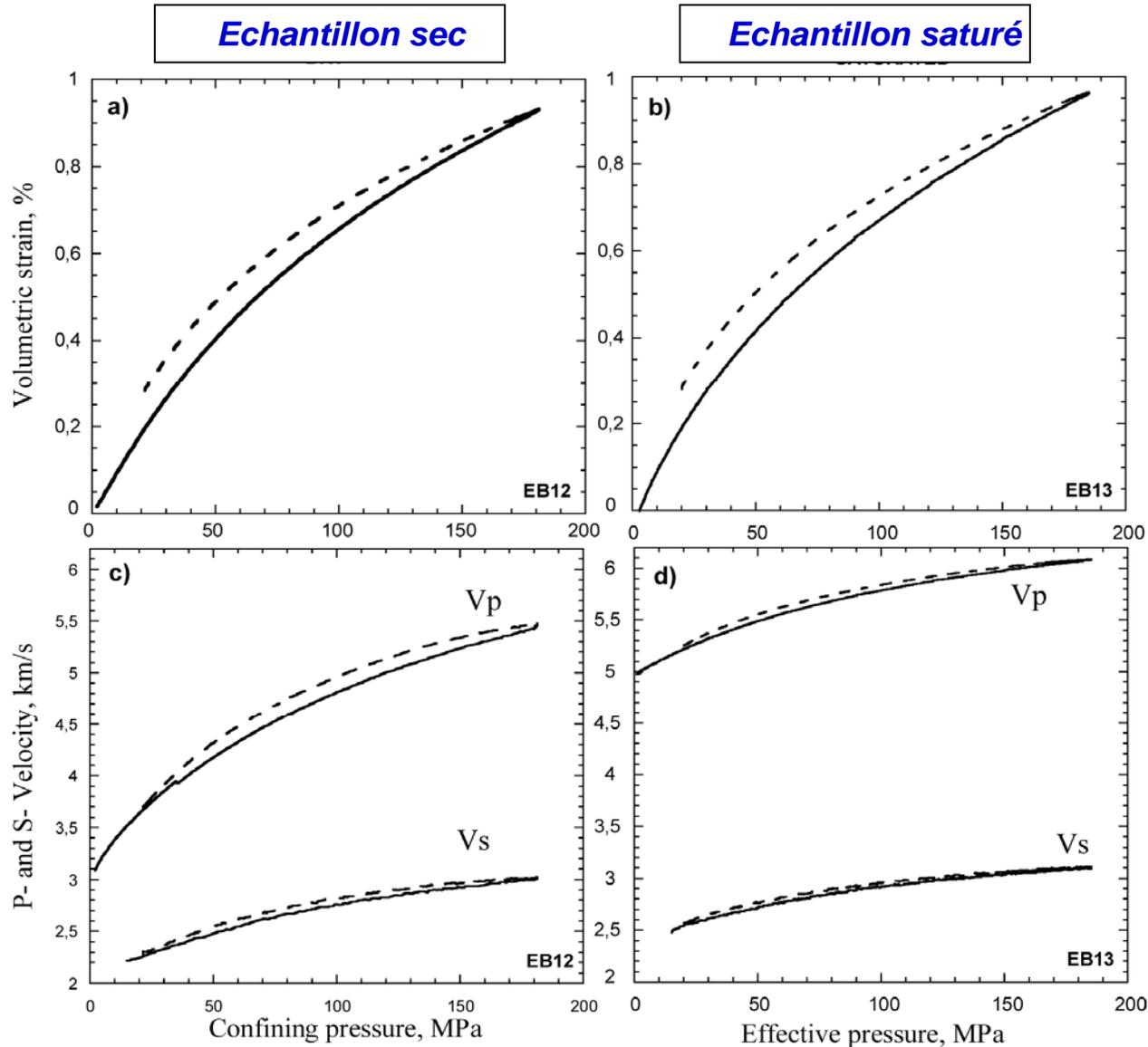
Méthodes utilisées dans cette étude

- Débit constant (Loi de Darcy)
- Méthode du pulse (Brace et al. 68)
- Mesure continue pendant le chargement par application d'un petit différentiel de pression de pore (Loi de Darcy, régime permanent ?)

# III- Résultat – chargement hydrostatique

→ Contrainte déformation & Evolution des vitesses

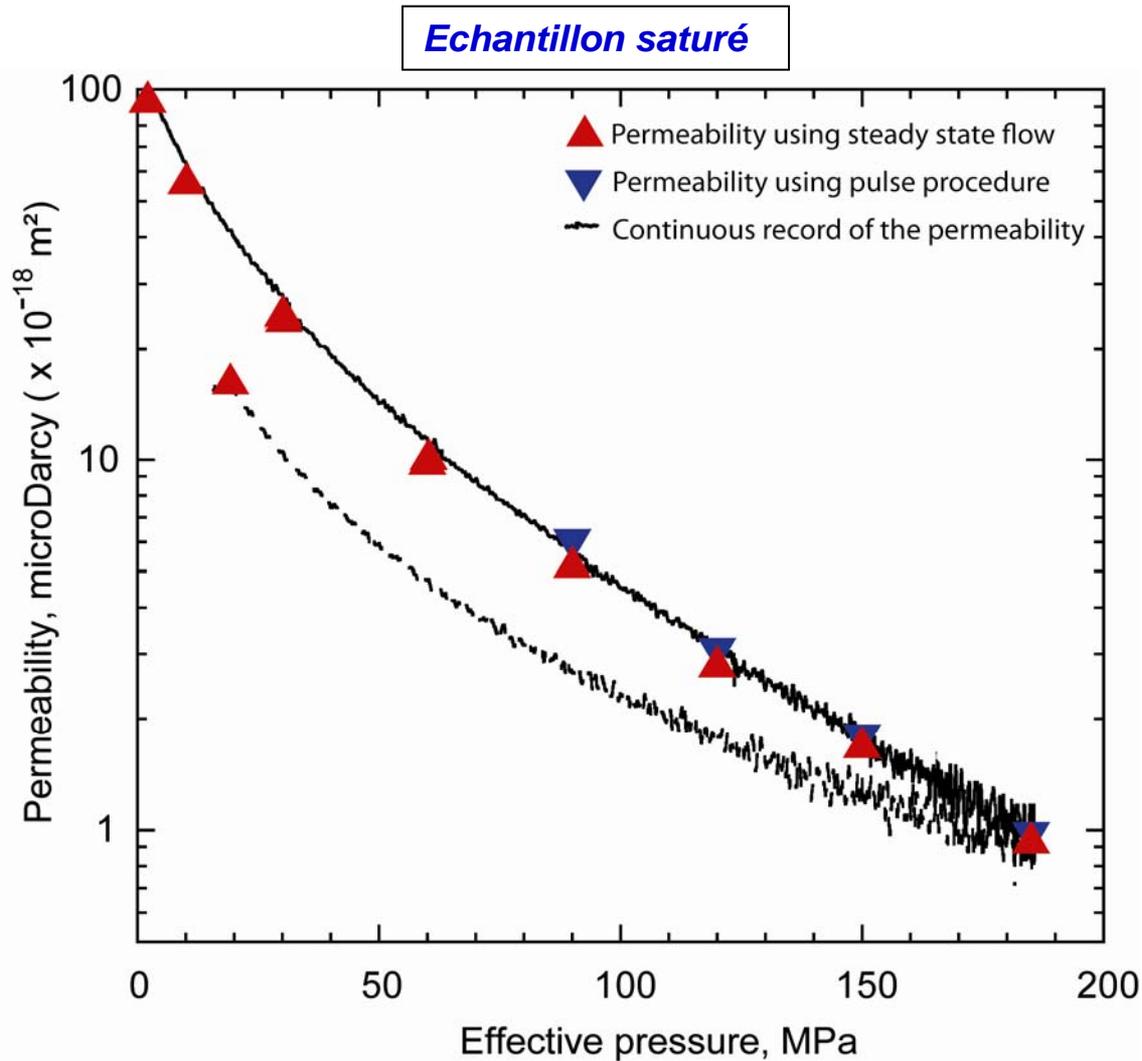
*Basalte l'Etna – porosité 2%*



# III- Résultat – chargement hydrostatique

→ Evolution de la perméabilité

*Basalte l'Etna – porosité 2%*



# III- Chargement hydrostatique : Interprétation

→ Interprétation des vitesses en terme d'évolution de la densité de fissures

**Pour une symétrie isotrope :**

Rappel des définitions de la vitesse des ondes P et des ondes S

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\gamma}} \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\gamma}}$$

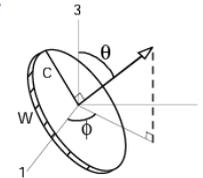
$K$ : module élastique d'incompressibilité

$G$ : module de cisaillement

$\gamma$ : masse volumique

**Modèle de milieu effectif pour un milieu fissuré (Kachanov 1994):**

- On définit la densité de fissures :  $\rho = \frac{1}{V} \sum^N c_i^3$



- On définit le facteur de forme :  $\zeta = w/c$

Hypothèse : - distribution de fissures aléatoirement orientées

- hypothèse de non interaction

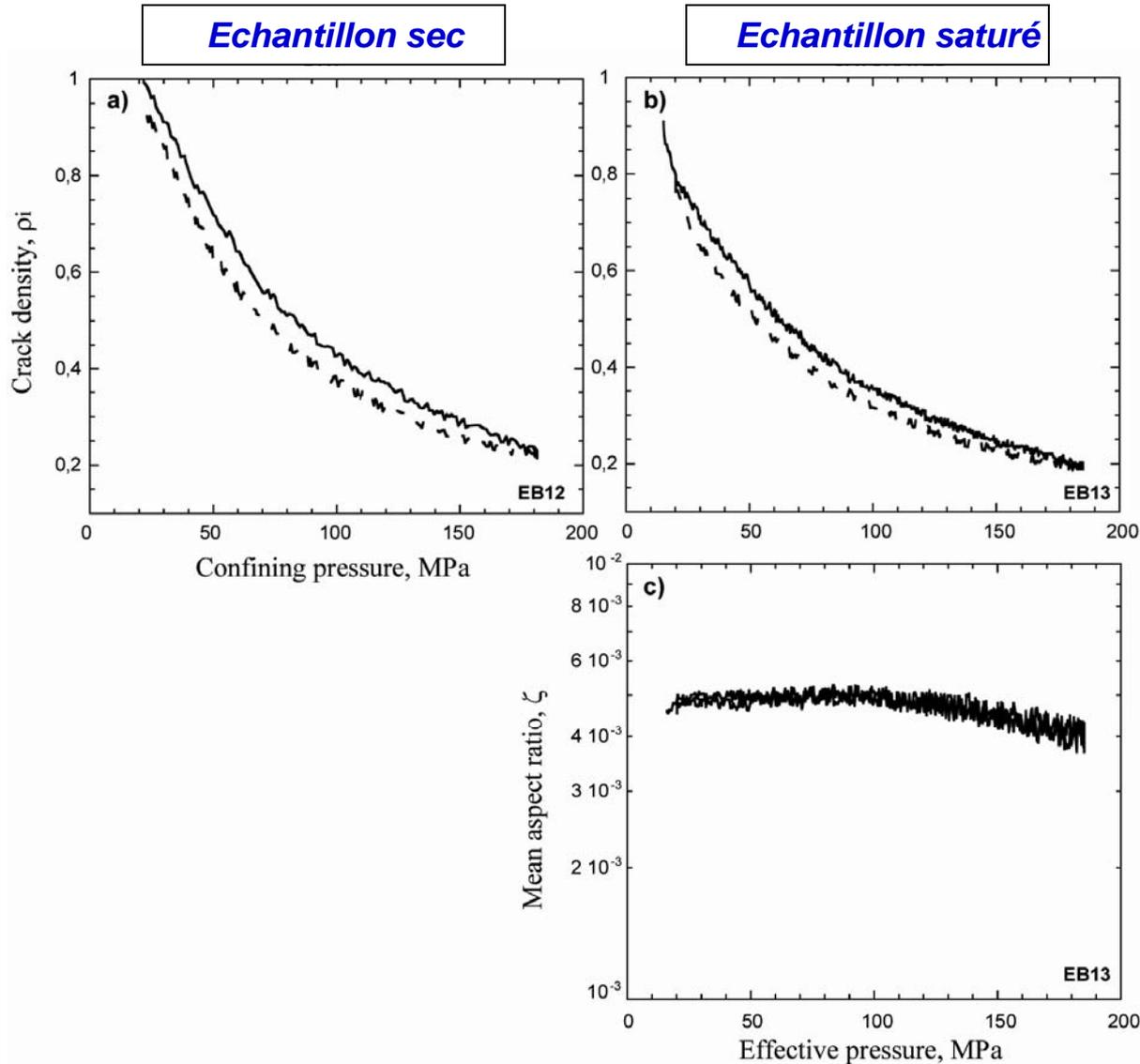
- Ecriture des modules effectifs ( $K$  et  $G$ ) en fonction de  $\rho$  (cas sec) et de  $\rho$  et  $\zeta$  pour le cas saturée

Exemple cas sec :  $\frac{K_o}{K} = 1 + \rho \frac{h}{1 - 2\nu_0} \left( 1 - \frac{\nu_o}{2} \right)$  ( $h$  paramètre lié à la géométrie de la fissure  $h \sim 1.8$ )

# III- Chargement hydrostatique : Interprétation

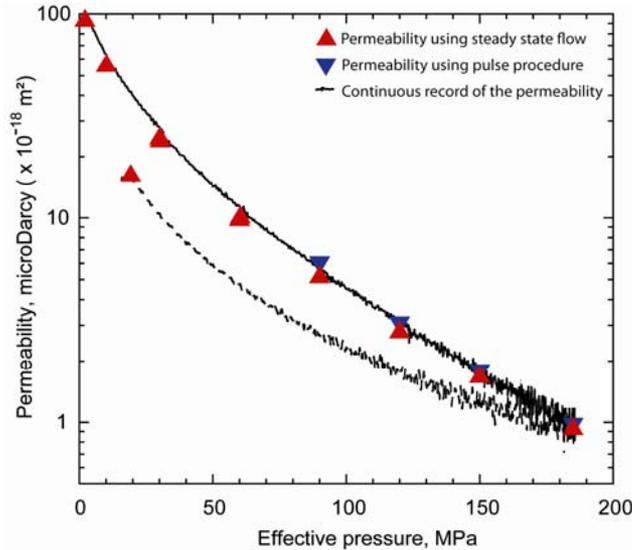
→ Interprétation des vitesses en terme d'évolution de la densité de fissures

*Basalte l'Etna – porosité 2%*



# III- Chargement hydrostatique : Interprétation

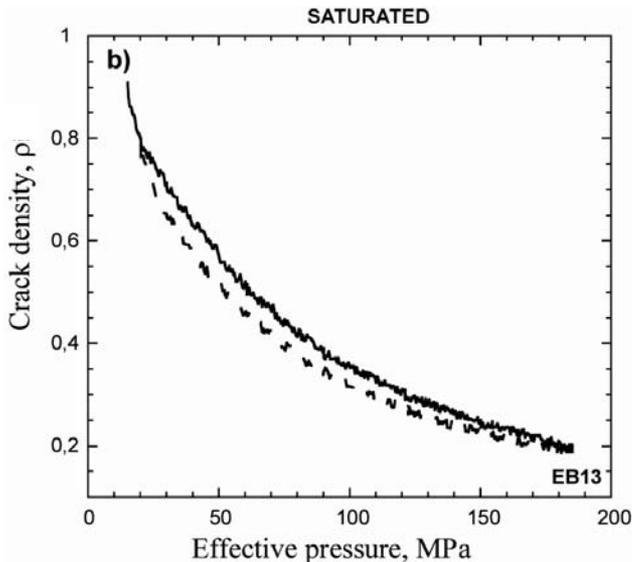
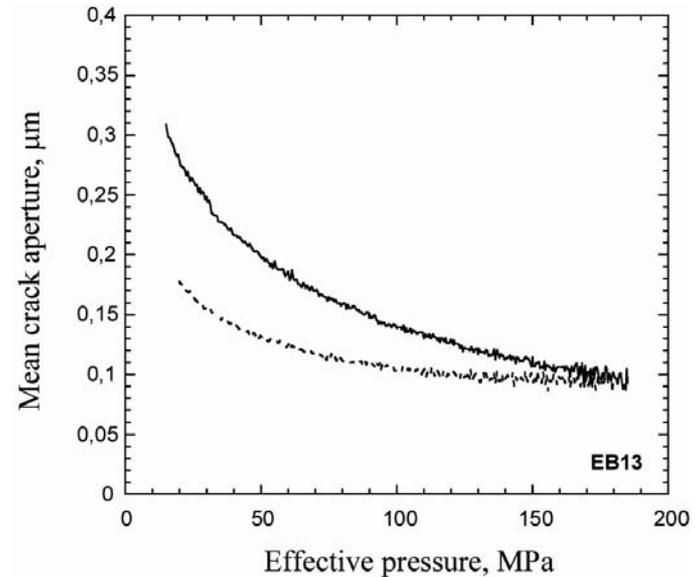
→ Corrélation densité de fissures obtenue par la vitesse des ondes élastiques et perméabilité



*Modèle de physique statistique pour estimer la perméabilité d'un milieu fissuré (Guéguen et Dienes 89):*

$$k = \frac{2}{15} w \xi \rho$$

↓  
*Ouverture moyenne des fissures  $w$*

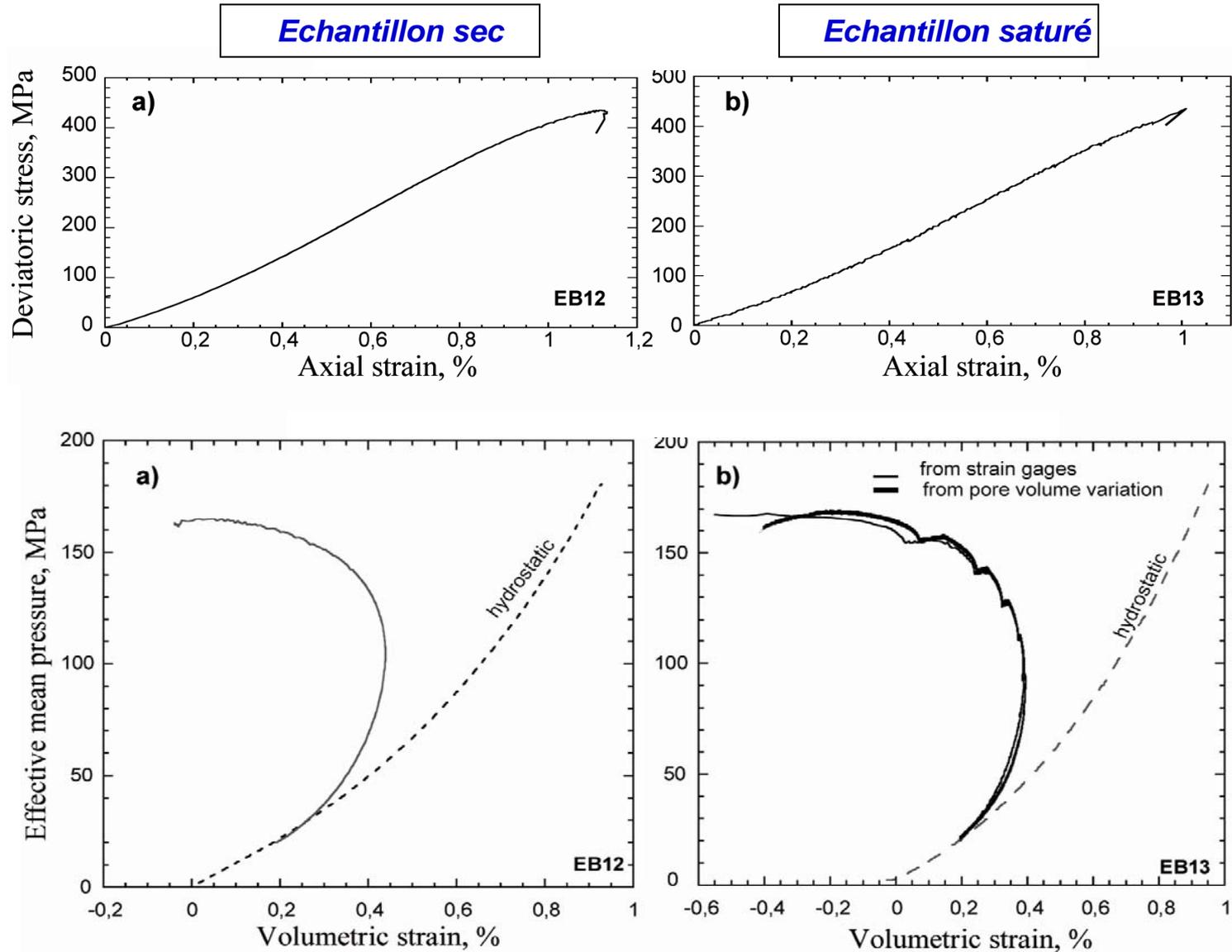


*Remarque:  $c = w / \xi \approx 0.3 \mu\text{m} / 5 \cdot 10^{-3} \approx 0.7 \text{mm}$   
taille des grains : 0.6-1.6 mm*

# IV- Résultat – chargement déviatorique ( $P_c=20$ MPa)

→ Contrainte déformation & Evolution de la porosité

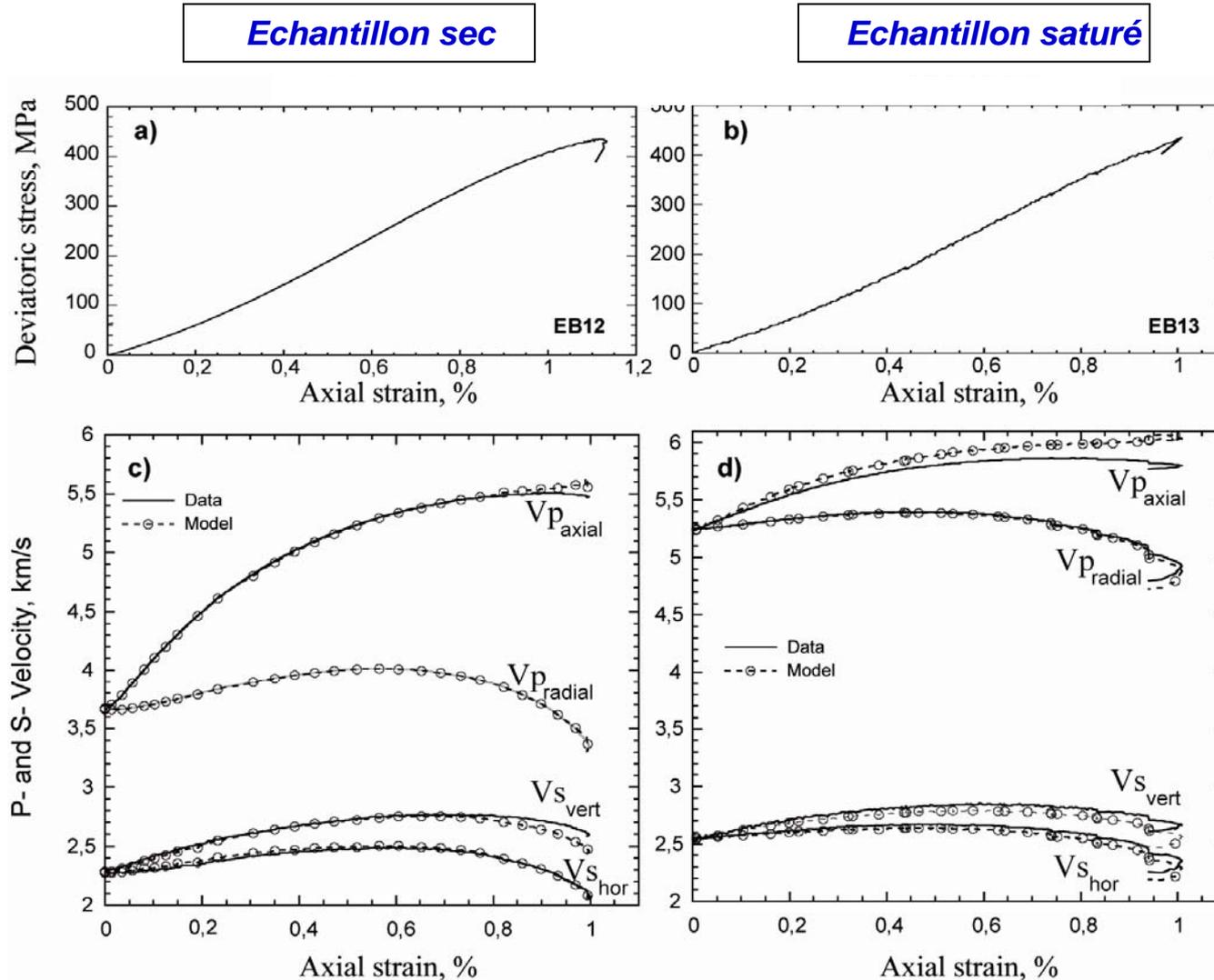
*Basalte l'Etna – porosité 2%*



# IV- Résultat – chargement déviatorique ( $P_c=20$ MPa)

→ Evolution des vitesses

*Basalte l'Etna – porosité 2%*



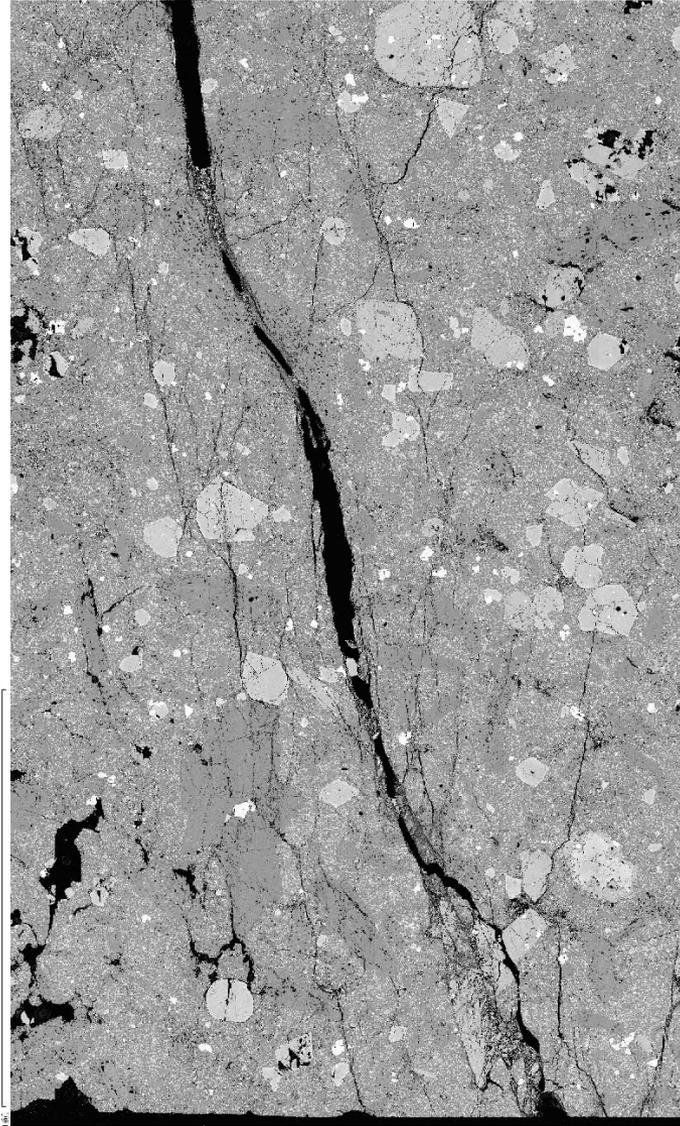
# IV- Résultat – chargement déviatorique ( $P_c=20$ MPa)

→ Microstructure

*Basalte l'Etna – porosité 2%*

**Echantillon saturé**

10 mm



## IV- Chargement déviatorique : Interprétation

---

→ Interprétation des vitesses en terme d'évolution de la densité de fissures

---

### *Symétrie transverse isotrope :*

*5 vitesses indépendantes pour déterminer le tenseur d'élasticité  $\underline{\underline{C}}$  qui est calculé toutes les 30 secondes pendant le chargement (d'où  $\underline{\underline{S}} = \underline{\underline{C}}^{-1}$ )*

### *Modèle de milieu effectif pour un milieu fissuré en symétrie transverse isotrope:*

#### *Choix des paramètres microstructuraux :*

- 2 populations de fissures : - une population de fissures aléatoirement orientées : densité  $\rho_i$*
- une population de fissures verticales : densité  $\rho_v$*

#### *- Hypothèse de non interaction*

*-Ecriture des modules de souplesse  $S_{ij}$  effectifs théoriques en fonction de  $\rho_i$  et  $\rho_v$  (cas sec) et de  $\rho_i$ ,  $\rho_v$ ,  $\zeta_i$  et  $\zeta_v$  pour le cas saturée*

*(obtenus à partir des expressions générales de Kachanov 94)*

*Minimisation entre modules de souplesse mesurés et modules de souplesse effectifs théoriques, pour obtenir les densités de fissures  $\rho_i$  et  $\rho_v$*

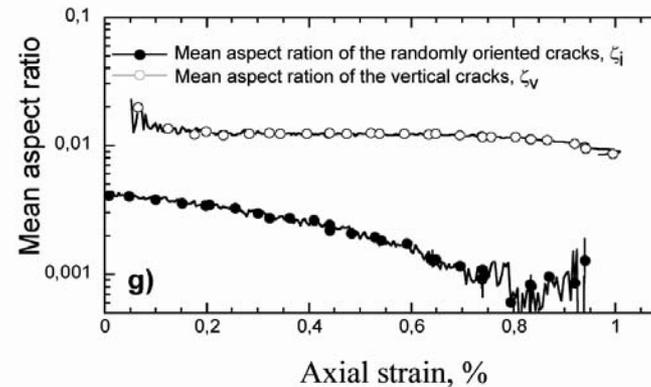
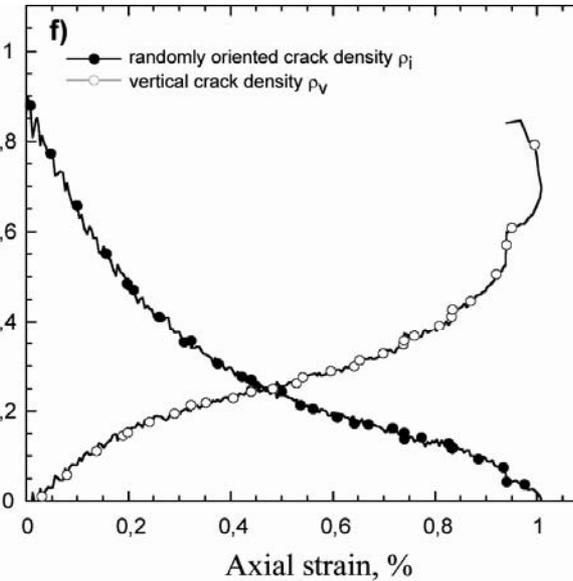
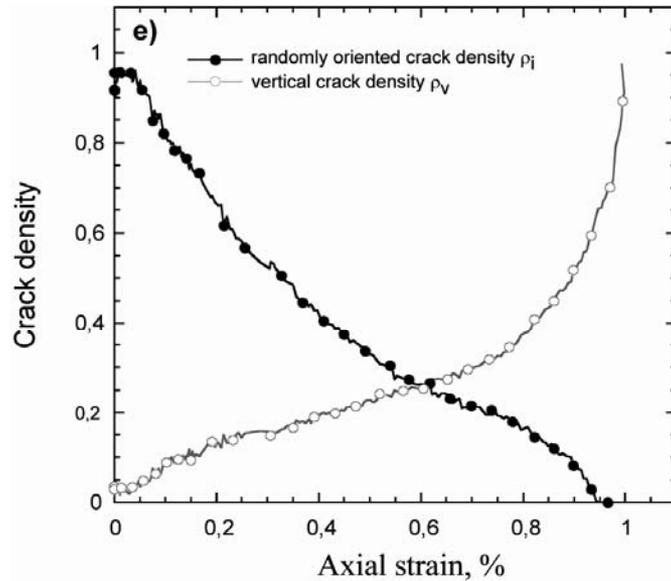
# IV- Chargement hydrostatique : Interprétation

→ Interprétation des vitesses en terme d'évolution de la densité de fissures

*Basalte l'Etna – porosité 2%*

**Echantillon sec**

**Echantillon saturé**

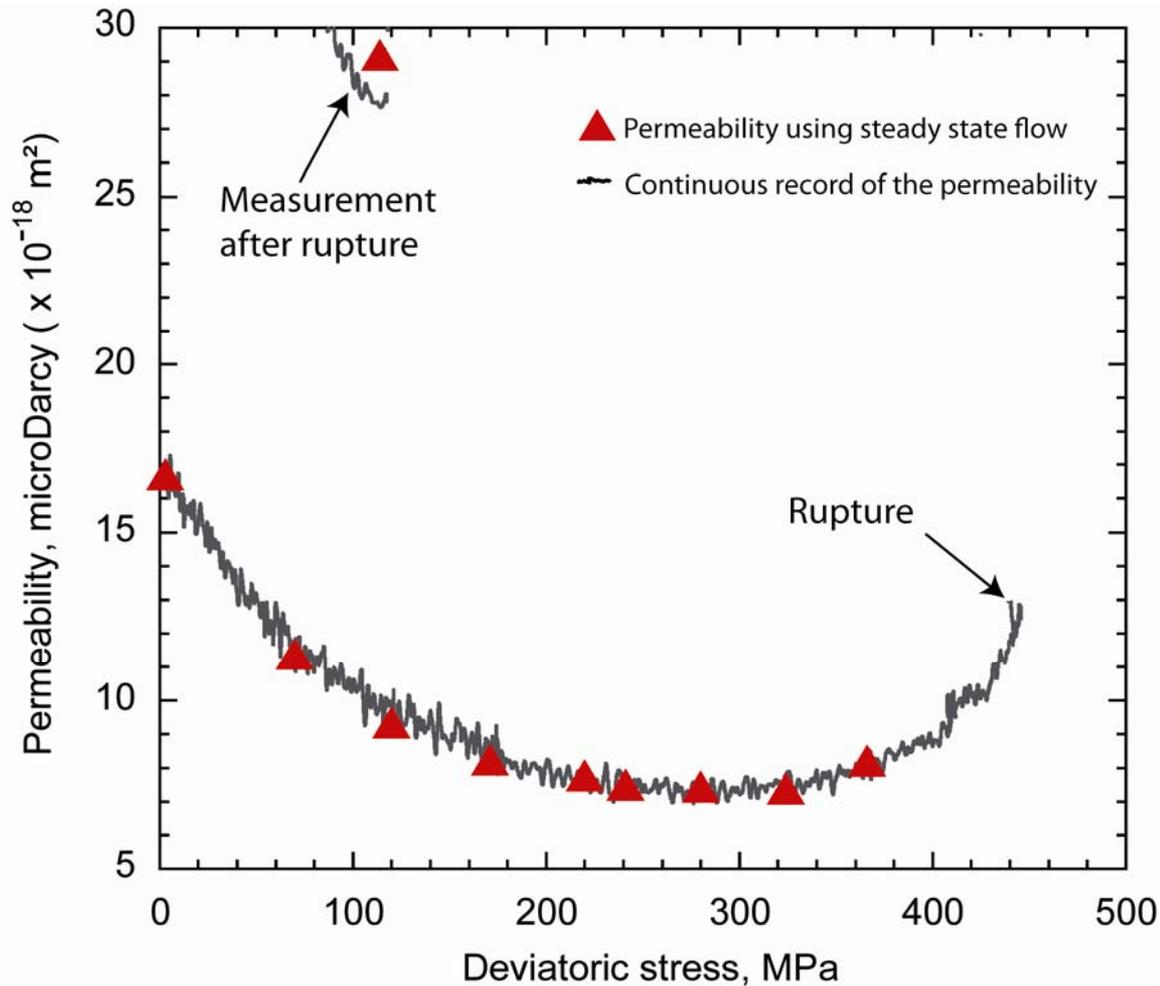


# IV- Chargement déviatorique : perméabilité

→ Evolution de la perméabilité

*Basalte l'Etna – porosité 2%*

*Echantillon saturé*



---

## Partie I- Conclusions

**-L'utilisation des vitesses est un outil complémentaire qui permet de mieux comprendre l'évolution de la microstructure de la roche avec le chargement**

→ Sous chargement hydrostatique :

- la fissuration pré-existante contrôle les propriétés physiques (perméabilité et vitesse des ondes)
- cohérence entre les mesures de vitesses des ondes élastiques et de perméabilité

→ Sous chargement déviatorique :

- Compétition entre fissures pré-existantes et fissures induites par le chargement axial sur les propriétés physiques
  - *Remarque : l'approche en densités de fissures n'est plus valable dès lors qu'il y a localisation de la déformation ...*
-

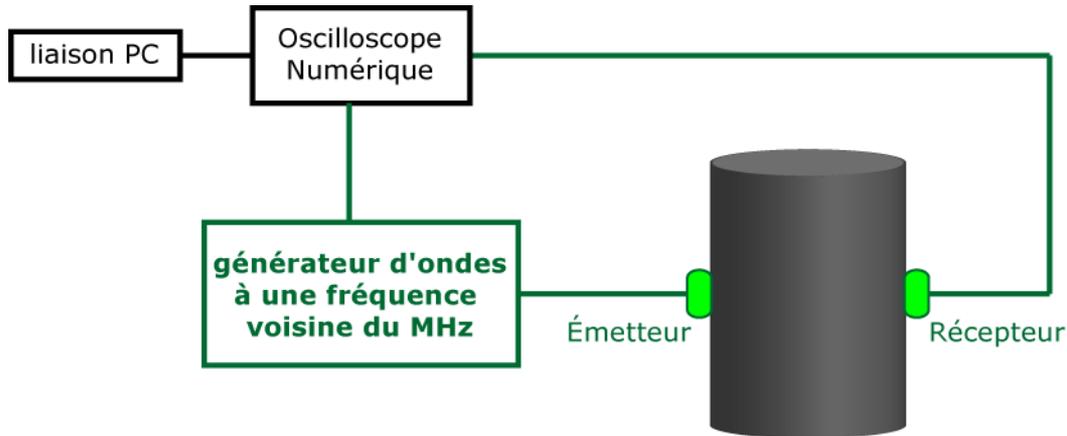
---

**Partie II- Etude de la dispersion liée au changement d'échelle de fréquence (modules élastiques basses et hautes fréquences)  
(basalte Islandais)**

---

# I- Le problème du changement d'échelle fréquentielle

Du terrain au laboratoire : un changement d'échelle spatiale  
et un changement d'échelle fréquentielle

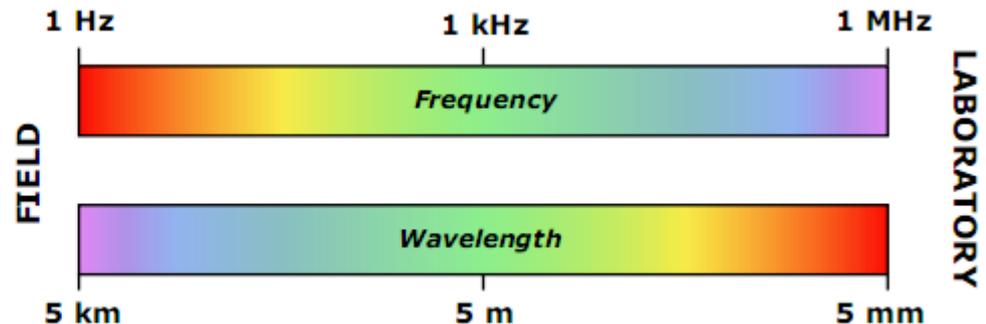


*Au laboratoire il est possible de mesurer  
les vitesses des ondes  
- sous contrainte  
-et/ou pour différentes natures de fluides  
(conditions in situ)*

**Mais les fréquences utilisées sont différentes ...**

## Frequency - wavelength

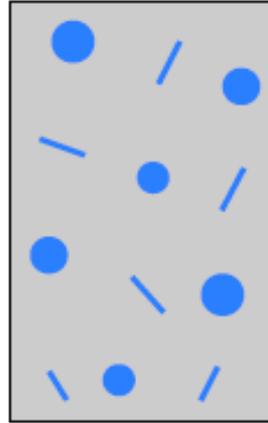
for an elastic wave velocity  
of 5 km/s (P-wave type)



# I- Etat basse fréquence (BF) et Etat haute fréquence (HF)

---

## **Roche saturée**

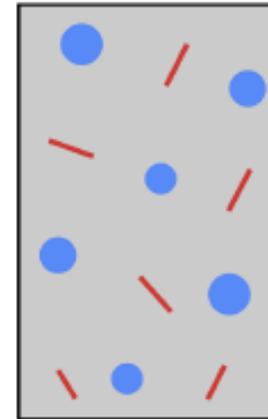


### ***Etat basse fréquence***

- *pression de fluide isobare*
- *pas de gradient de fluide entre inclusions*
- *cadre de la poroélasticité*

### ***Etat haute fréquence***

- *la pression de fluide dans une inclusion dépend de sa géométrie*
- *Déplacement de fluide entre des zones plus compressibles vers des zones moins compressibles*



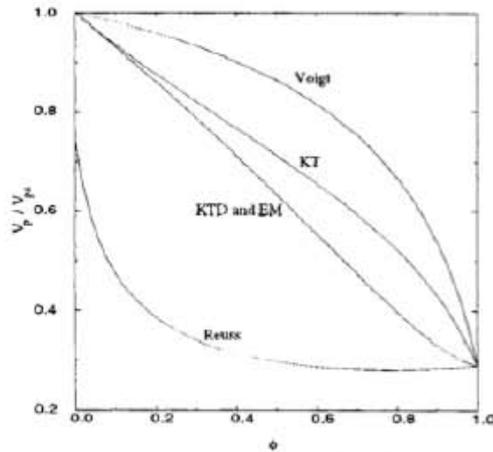
---

**Roche sèche** : pas d'effet de fréquence

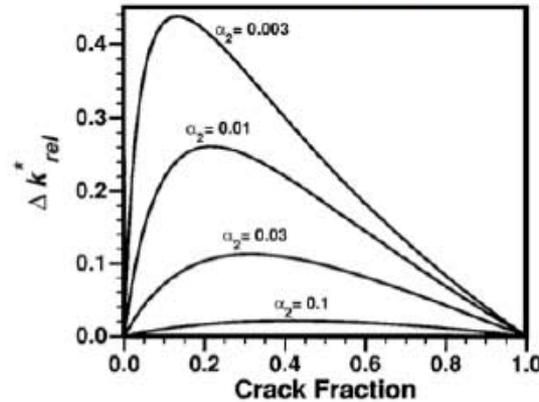
# I- Vitesse des ondes et fréquences

*-Beaucoup d'études théoriques sur l'effet de fréquence*

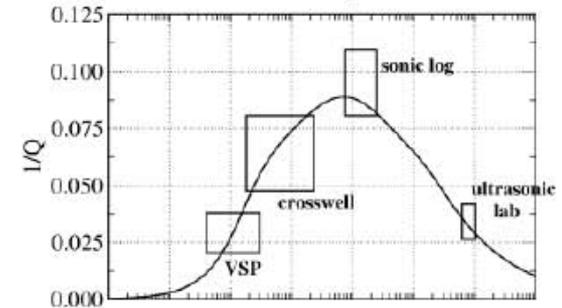
Le Ravalec et al., 1996



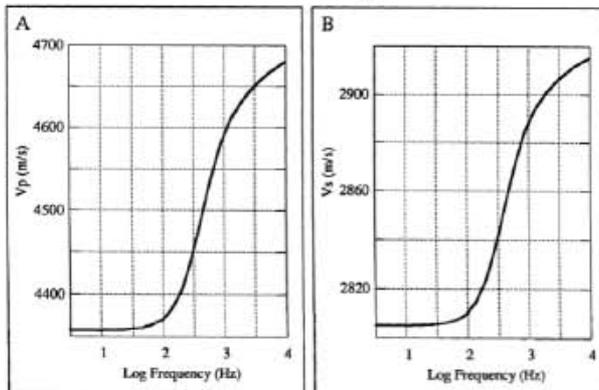
Endres and Knight, 1997



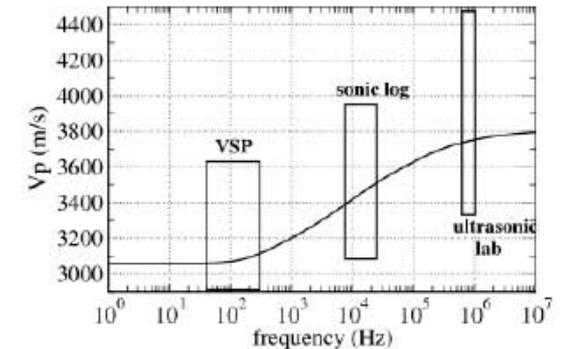
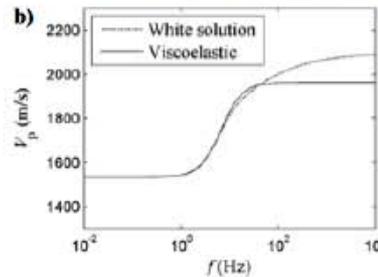
Pride et al., 2004



Dvorkin et al., 1995



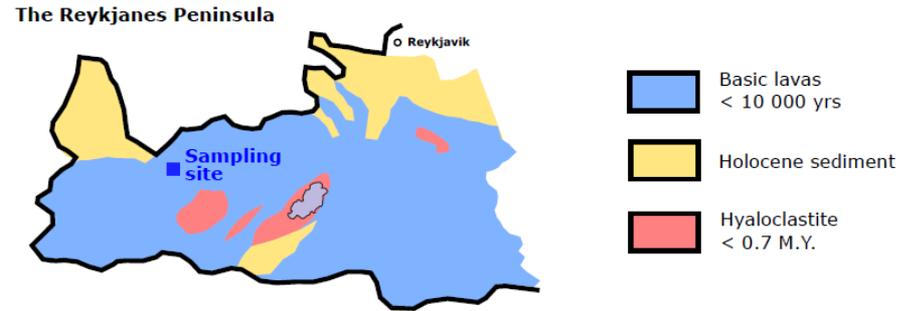
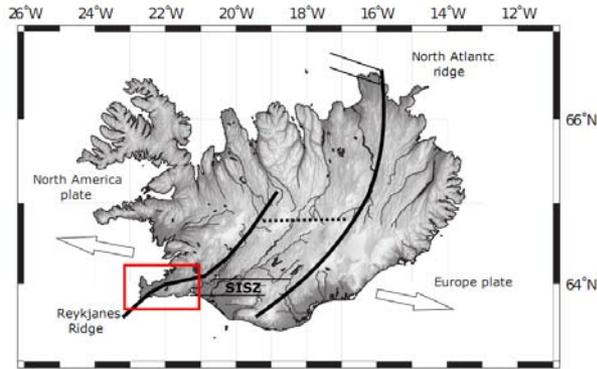
Quintal et al., 2009



*- Mais très peu de données expérimentales* Batzle et han 2006, Adam et Batzle 2008

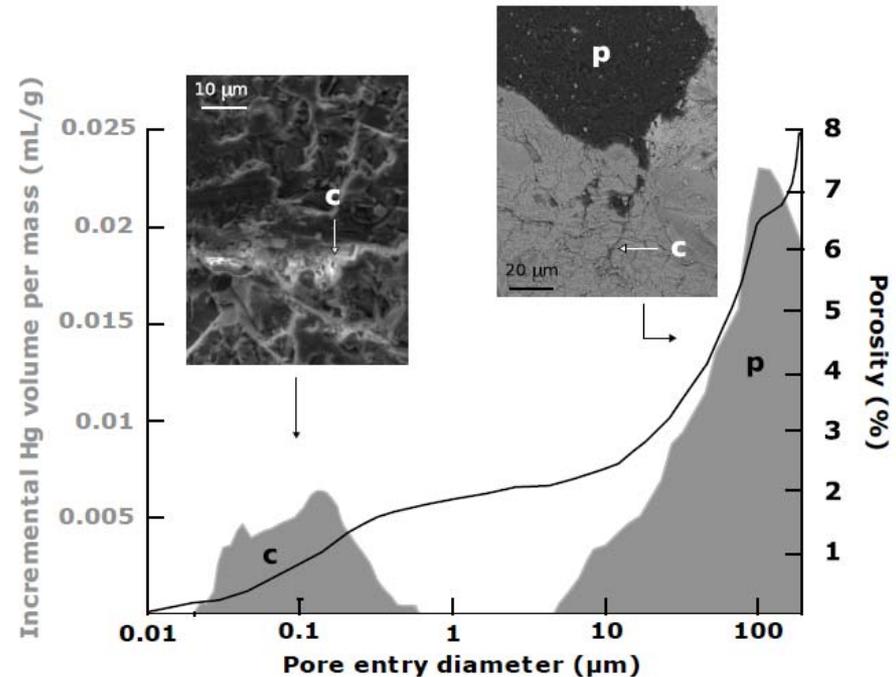
# II- Approche expérimentale

→ Roche étudiée : basalte Islandais



**Porosité connectée totale 8 %**  
caractérisée par une **double porosité**

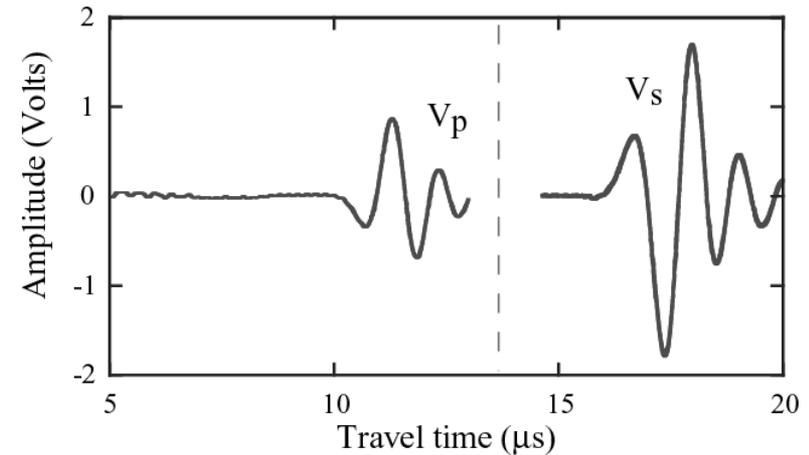
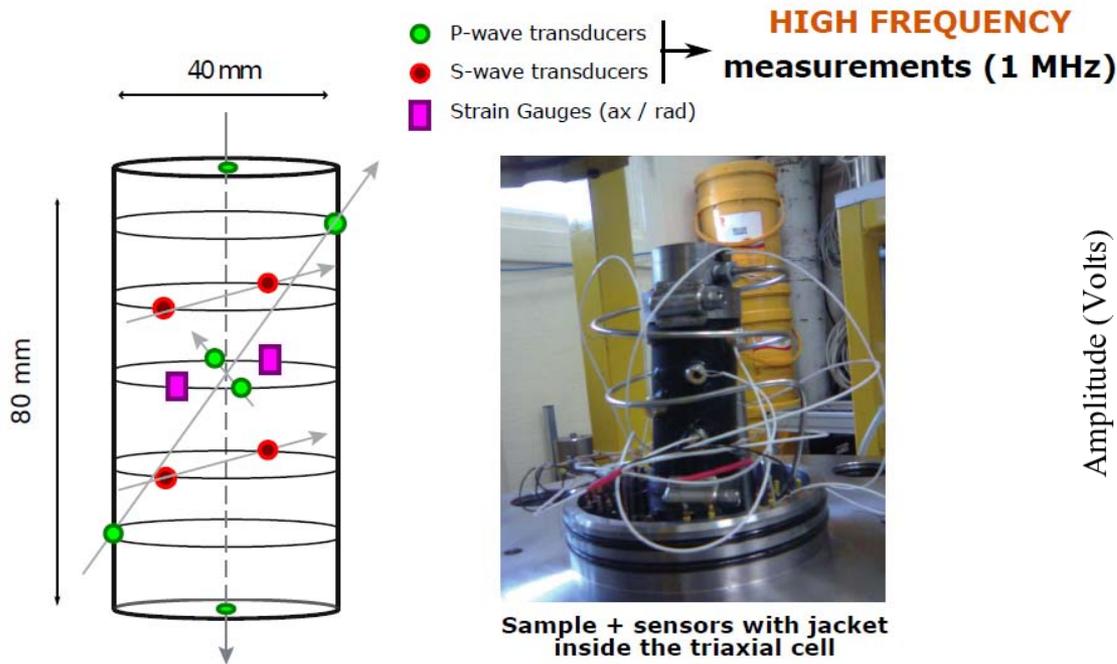
- porosité de fissures 1 %
- porosité de pore ronds 7 %



## II- Approche expérimentale

→ Protocole expérimental pour mesurer des modules haute fréquence et basse fréquence

### Mesures Haute fréquence



$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \Longrightarrow \quad \text{D'où évolution de } K^{HF} \text{ avec la pression de confinement}$$

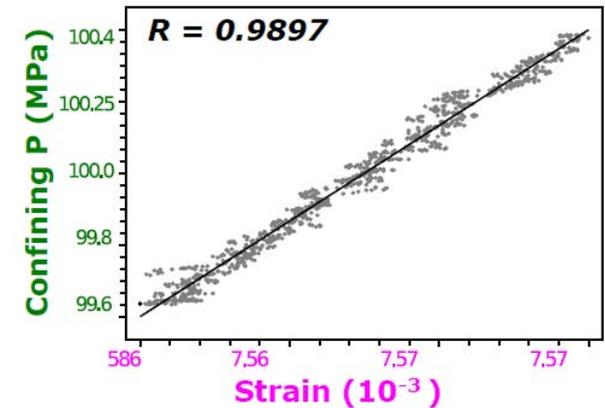
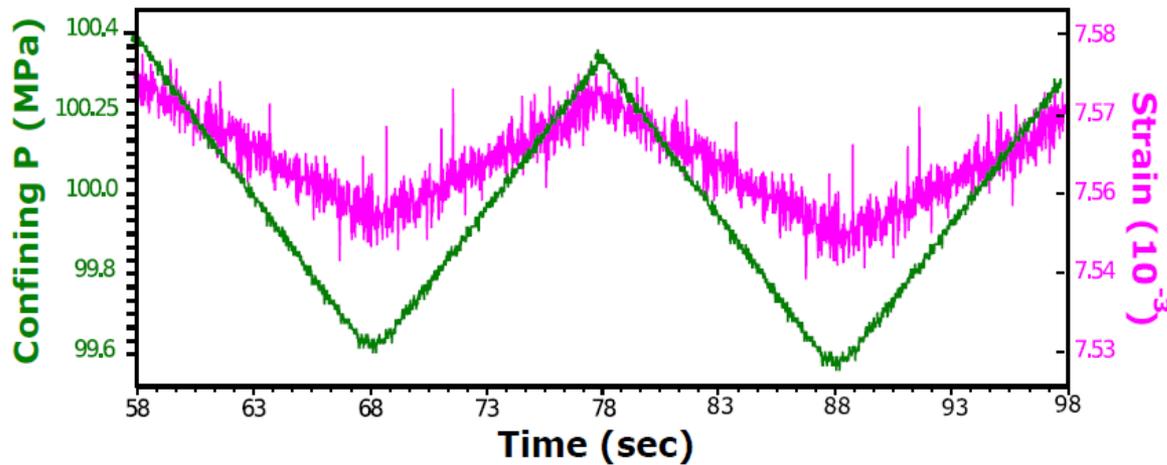
## II- Approche expérimentale

→ Protocole expérimental pour mesurer des modules haute fréquence et basse fréquence

### Mesures Basse fréquence

Oscillating test  
at  $P_c = 100$  MPa

LOW FREQUENCY  
measurements (0.01 Hz)

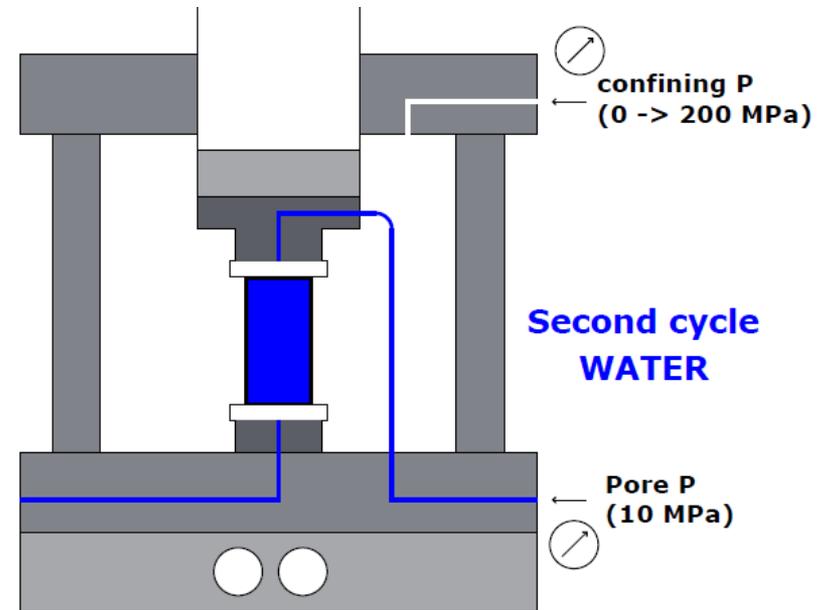
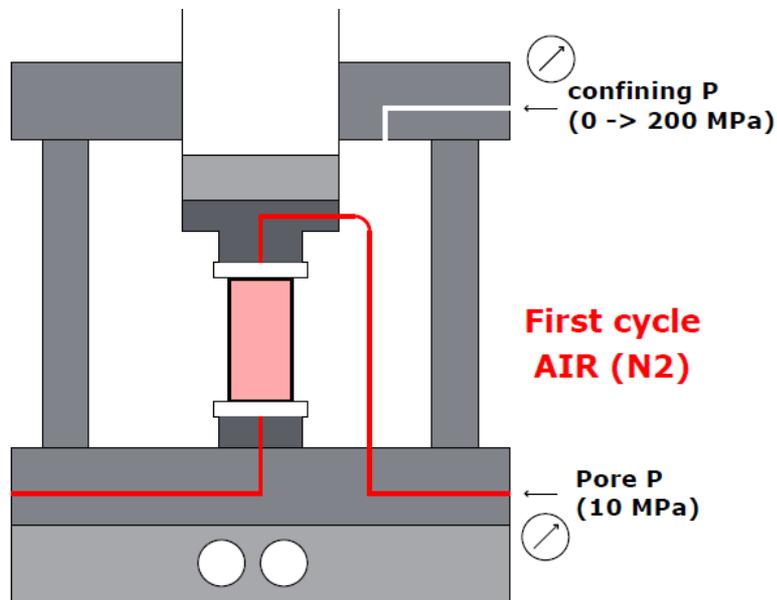


⇒ D'où évolution de  $K^{BF}$  avec la pression de confinement

## II- Approche expérimentale

→ Protocole expérimental pour mesurer des modules haute fréquence et basse fréquence

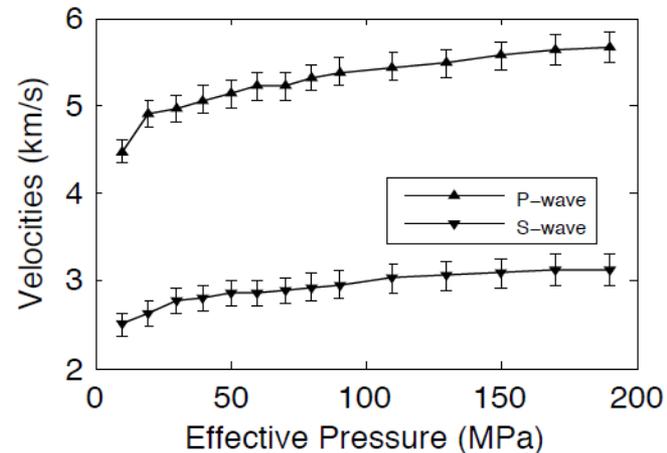
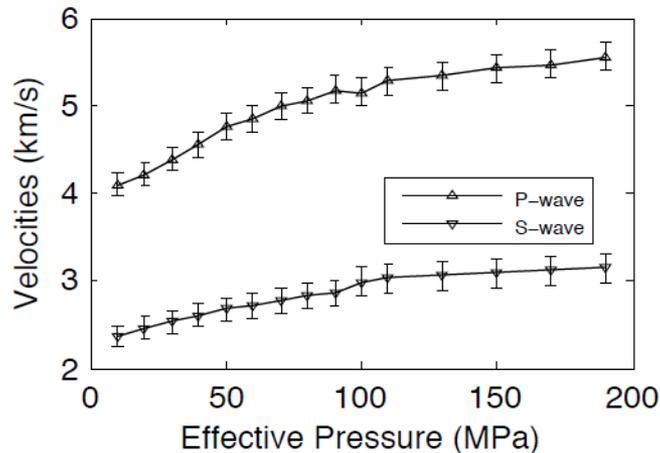
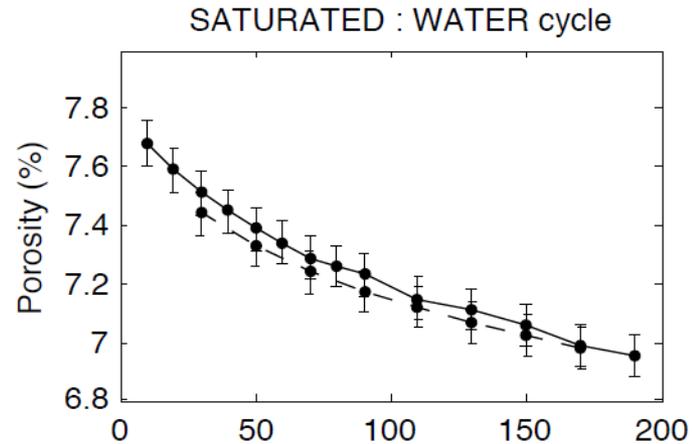
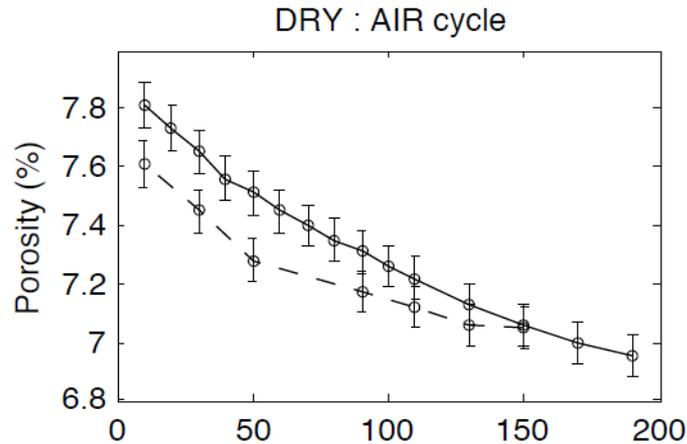
2 cycles : air puis eau



⇒ D'où évolution de  $K_{sec}$  et  $K_{sat}$  avec la pression de confinement

# III- Résultats

## A – Données mécanique : Evolution de la porosité – Evolution des vitesses *Mise en évidence de la fermeture de la porosité de fissures (1%)*

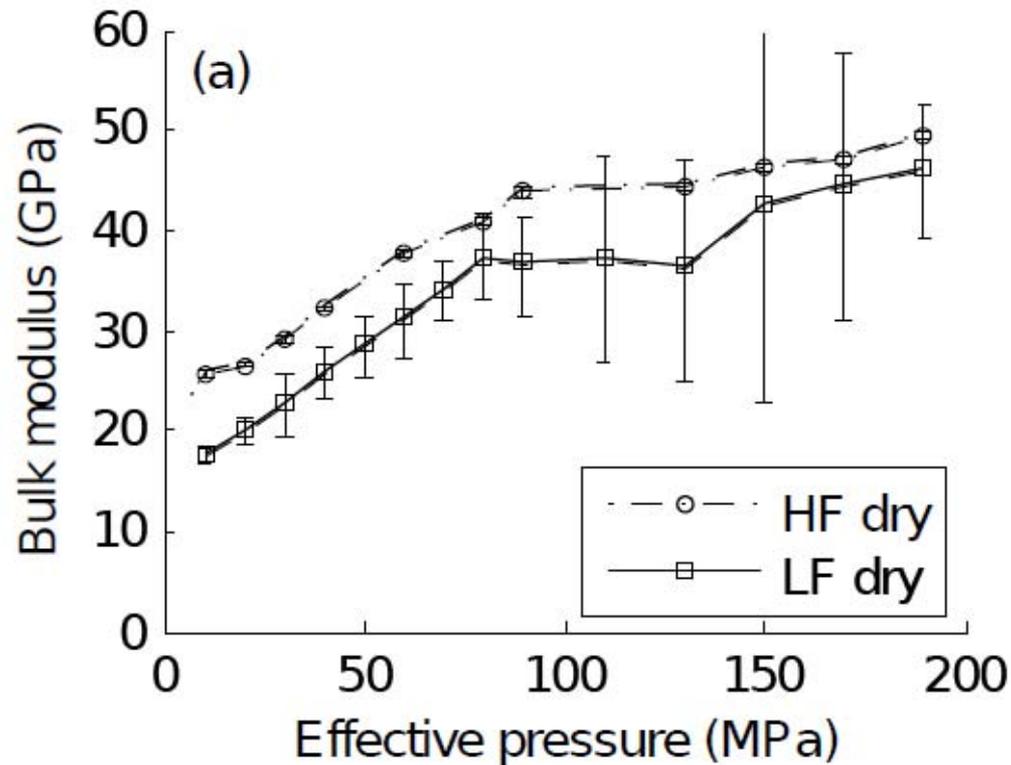


# III- Résultats

## C – Données haute et basse fréquence

*Basalte Islandais – porosité 8%*

Sec



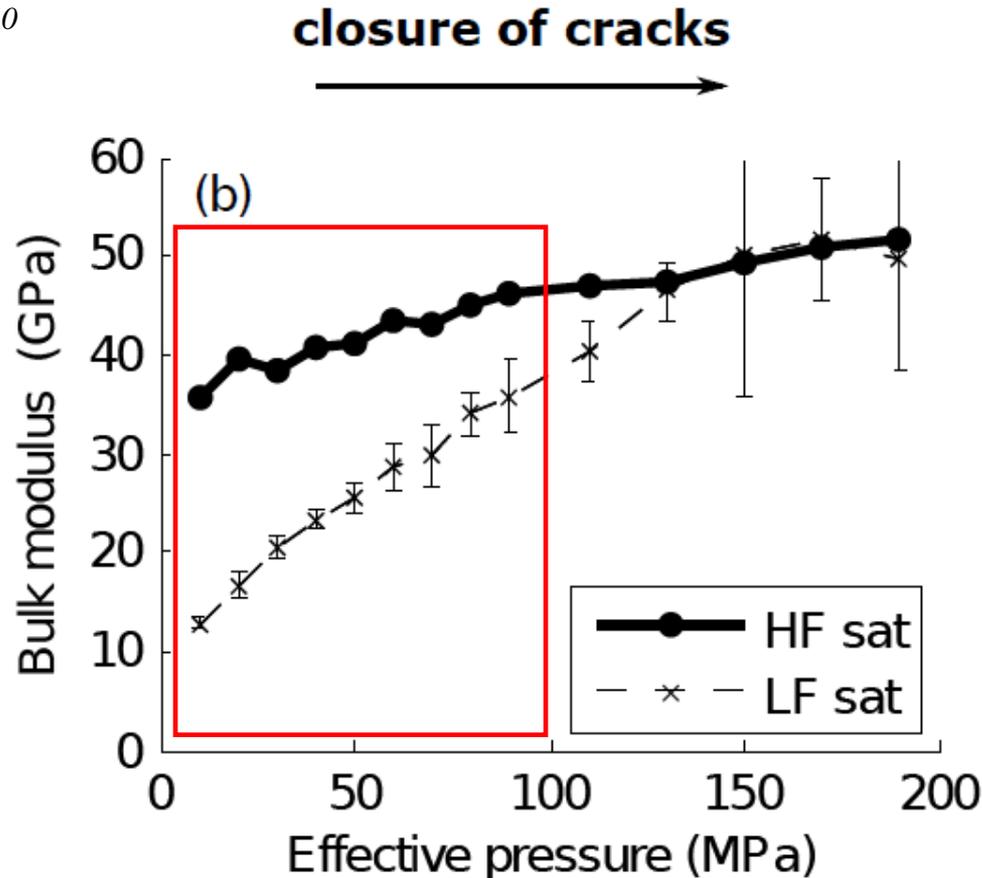
→ Dans le cas 'sec' :  $K_{\text{sec}}^{HF} \approx K_{\text{sec}}^{BF}$

# III- Résultats

## C – Données haute et basse fréquence

Basalte Islandais – porosité 8%

Adelinet et al. GRL 2010

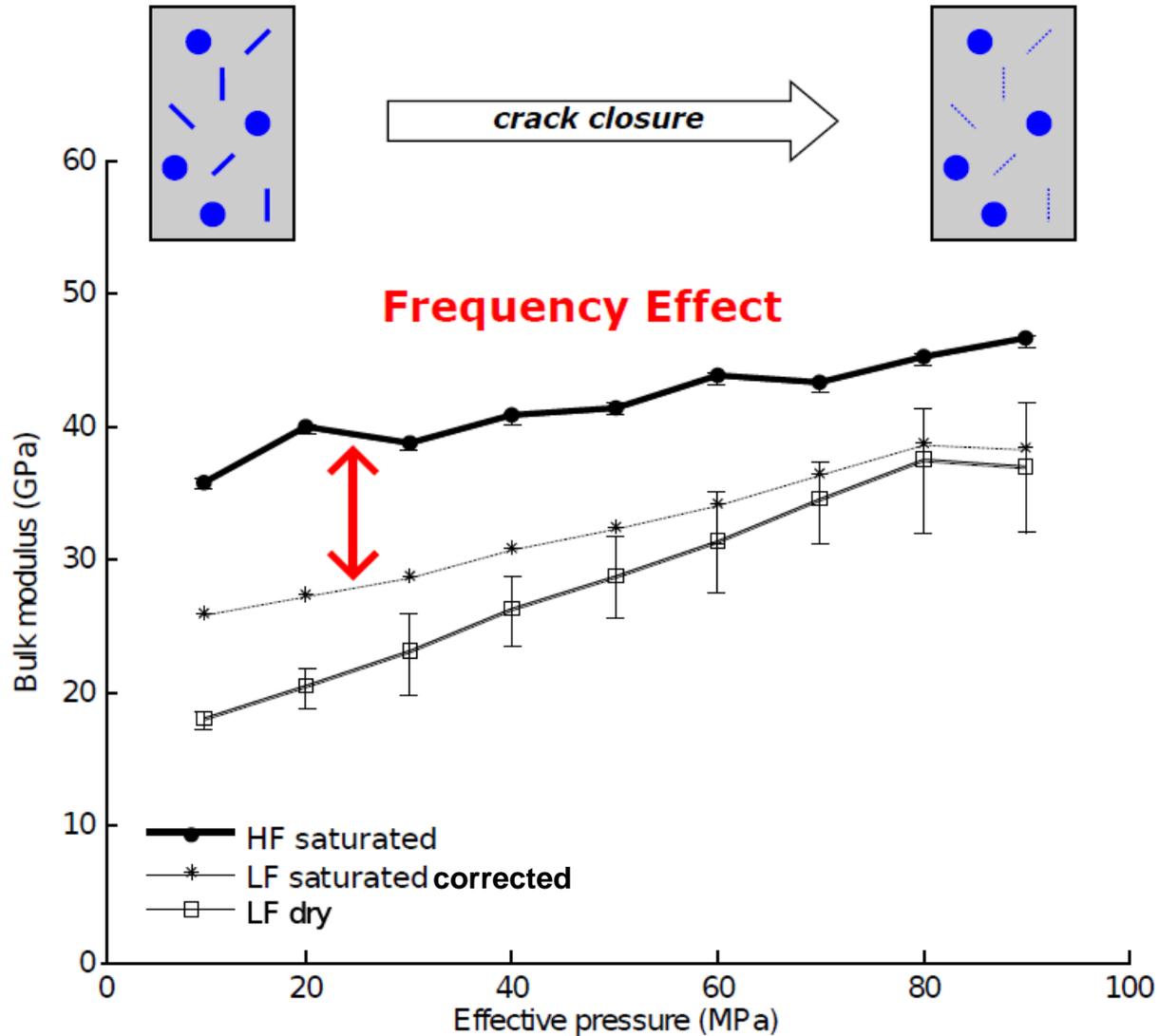


→ Dans le cas ‘saturé’ :  $K_{saturé}^{HF} \neq K_{saturé}^{BF}$  mais la différence disparaît avec la fermeture des fissures

# III- Résultats

## D – Mise en évidence de l'effet de fréquence

Adelinet et al. GRL 2010



---

## **Partie II- Conclusions**

- **Mise en place d'une nouvelle technique expérimentale permettant de travailler à des fréquences rarement étudiées au laboratoire**
- **Mise en évidence expérimental d'un effet de fréquence quand les fissures sont ouvertes**

→ Expliqué par un écoulement entre fissures et pores (cet effet est présent, car la porosité du basalte Islandais est bi-modale).

→ En accord avec un modèle théorique de milieu effectif simple (*Adelinet et al . Soumis*)

Remarque : Dans cette étude nous nous sommes uniquement intéressés au module d'incompressibilité. Quid du module de cisaillement  $G$  ou du module d'Young  $E$  ?

### **Perspectives :**

-Développement d'un dispositif pour mesurer  $E$  sous pression, sur une plage de fréquence 0-100khz

---