

Caractérisation thermo-hydro-mécanique des roches en laboratoire

Jean-Pierre Tshibangu & Fanny Descamps

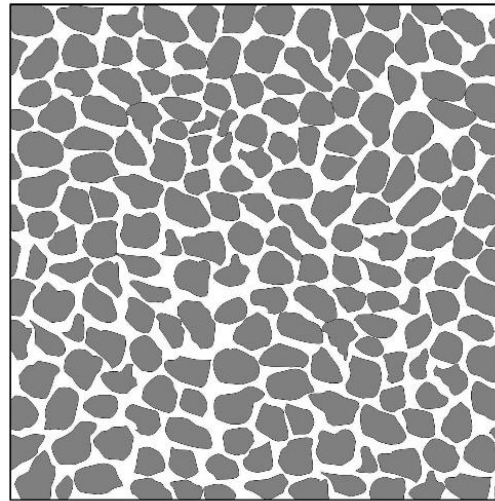
Caractérisation thermo-hydro-mécanique des roches en laboratoire

- Quelles roches?
- Mécanismes de transport en milieu poreux
- Lois de comportement thermo-hydro-mécaniques
- Essais en laboratoire
- Vers des lois de comportement tridimensionnelles

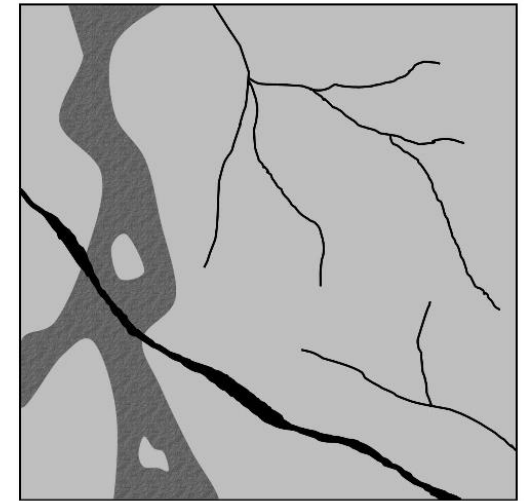
Quelles roches pour le stockage?

Formations géologiques typiques :

- Argiles
- Granite
- Sel



Primary porosity



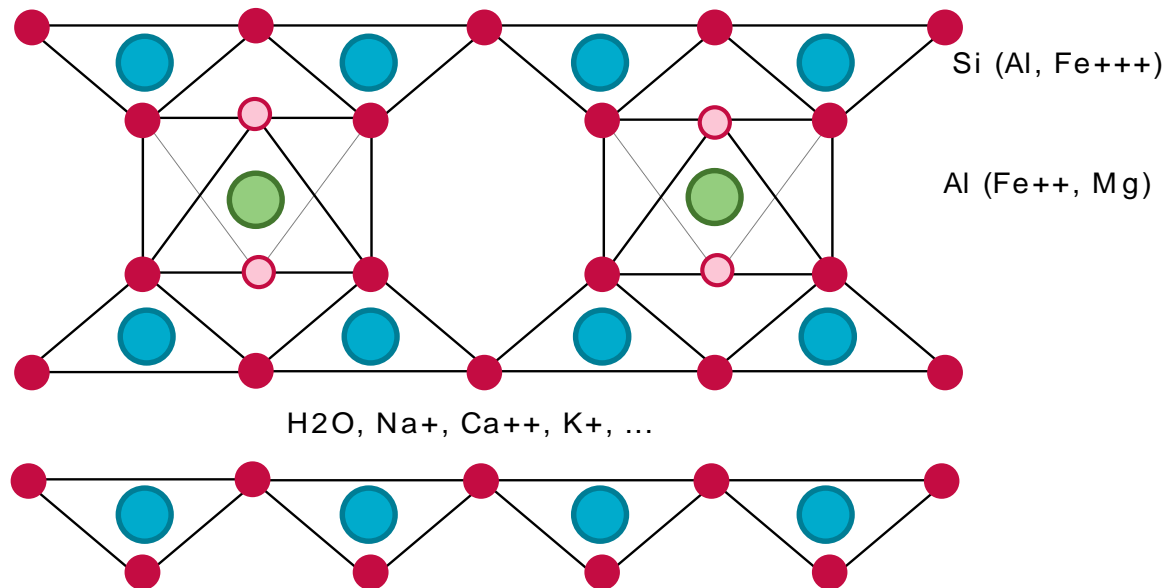
Secondary porosity

⇒ Milieux poreux avec :

- Capacité de stockage → porosité, saturation
- Transmissibilité de fluides → écoulement hydraulique, diffusion

Cas particulier des argiles

- Comportement vis-à-vis de l'eau dépend de:
 - Interaction électrostatique → capacité d'échange (meq/100 g)
 - Concentration en sel → pression osmotique
 - Degré de saturation → pression de succion



Tshibangu et al. (1996)

Carte d'identité de l'argile de Boom

(données CEN Mol)

- Paramètres géochimiques:
 - Fluide de pore à base de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) 10-2 N
 - pH : 8.5
 - CEC (Meq/100 g) : Ag-TU 30 ± 3.9 ; Sr 24.4 ± 3.4 ; Ca 23.3 ± 3.1
- Paramètres géomécaniques
 - Résistance à la compression simple : 2.2 – 2.8 MPa
 - Module d'Young : 200 – 400 MPa
 - Coefficient de Poisson : 0.4
 - Cohésion : 0.8 – 1 MPa
 - Angle de frottement interne : 4°
 - Pression de gonflement [MPa]: 0.9 MPa
 - Déformation de gonflement : 5 – 10 %
- Paramètres pétrophysiques et hydrauliques:
 - Poids spécifique global : 1.9 à 2.1 t/m³
 - Poids spécifique moyen des grains : 2.65 t/m³
 - Teneur en eau : 19 à 24 % poids sec
 - Porosité totale : 36 à 40 %
 - Surface spécifique : 44 m²/g
 - Conductivité thermique : 1.68 W/m³K
 - Capacité thermique : 2.8 MJ/m³K
 - Vitesse sismique Vp : 1300 – 1600 m/s
 - Conductivité hydraulique [m/s]:
 - au labo : verticale $1.3 - 3.4 \cdot 10^{-12}$, horizontale $3.5 - 7.9 \cdot 10^{-12}$
 - in-situ : verticale $2.1 \cdot 10^{-12}$, horizontale $4.5 \cdot 10^{-12}$

Mécanismes de transport en milieu poreux

Écoulement

hydraulique

- ≠ pression ou charge hydraulique
- f (k , viscosité)
- Milieux perméables
- $\vec{q} = -k \nabla p$

Transport

osmotique

- ≠ potentiel chimique de l'eau
- f (activité eau)
- Membrane semi-perméable
- $q^w = L^w \nabla \mu^w$

Communication

ouverte

- ≠ potentiel chimique de l'eau et des ions
- Pas d'effet « membrane »
- $q_i^r = -\sum_s L_{ij}^{rs} \nabla_j C^s$

+ conservation de la masse : $\nabla q^r = -\frac{\partial m^r}{\partial t}$

Loi de diffusivité : $\frac{\partial^2 C^r}{\partial x^2} = \frac{1}{L^r} \frac{\partial C^r}{\partial t}$ (diffusion, 1D)

1 éq. à 2 inc.
→ loi de comportement

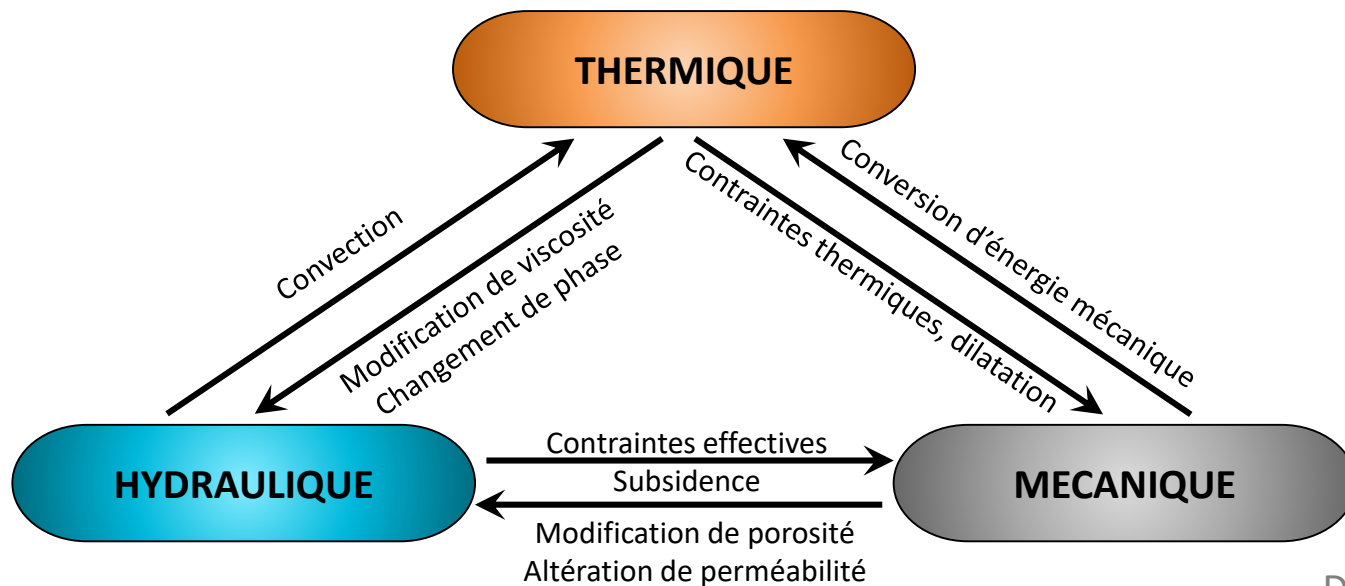
Loi de comportement thermo-hydro-mécanique

■ Variables d'état :

- Déformation $[\varepsilon]$
- Apport de masse fluide par unité de volume m
- Température T

■ Forces thermo associées :

- Contrainte $[\sigma]$
- Pression de pore p
- Entropie S



Descamps (2007)

Poroélasticité généralisée

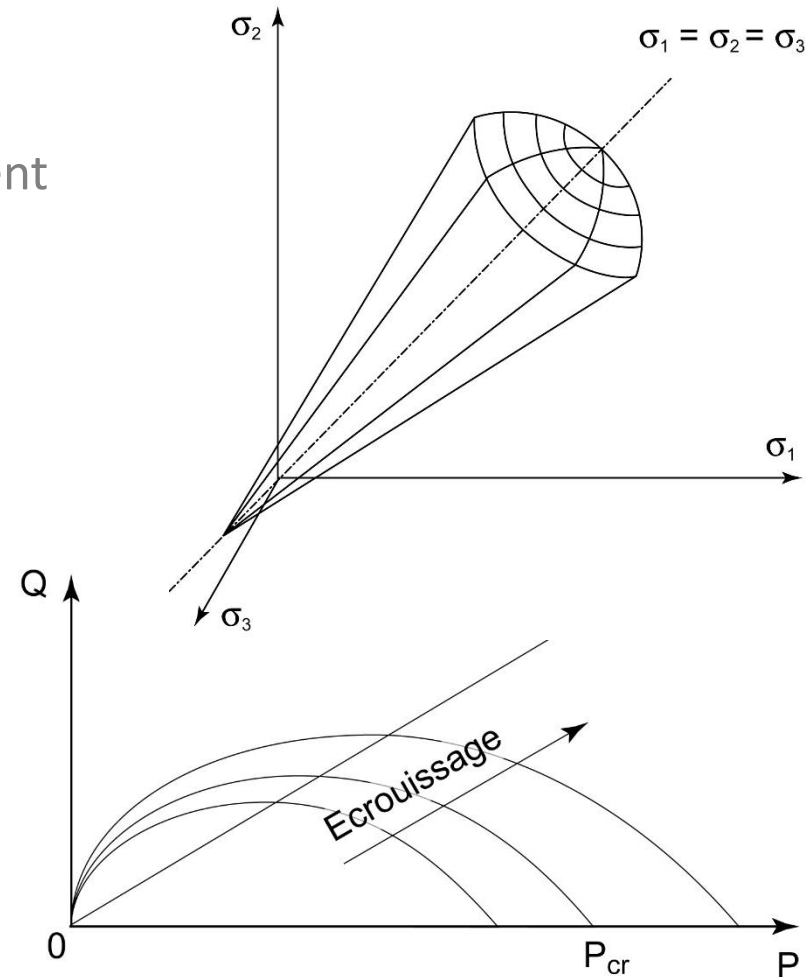
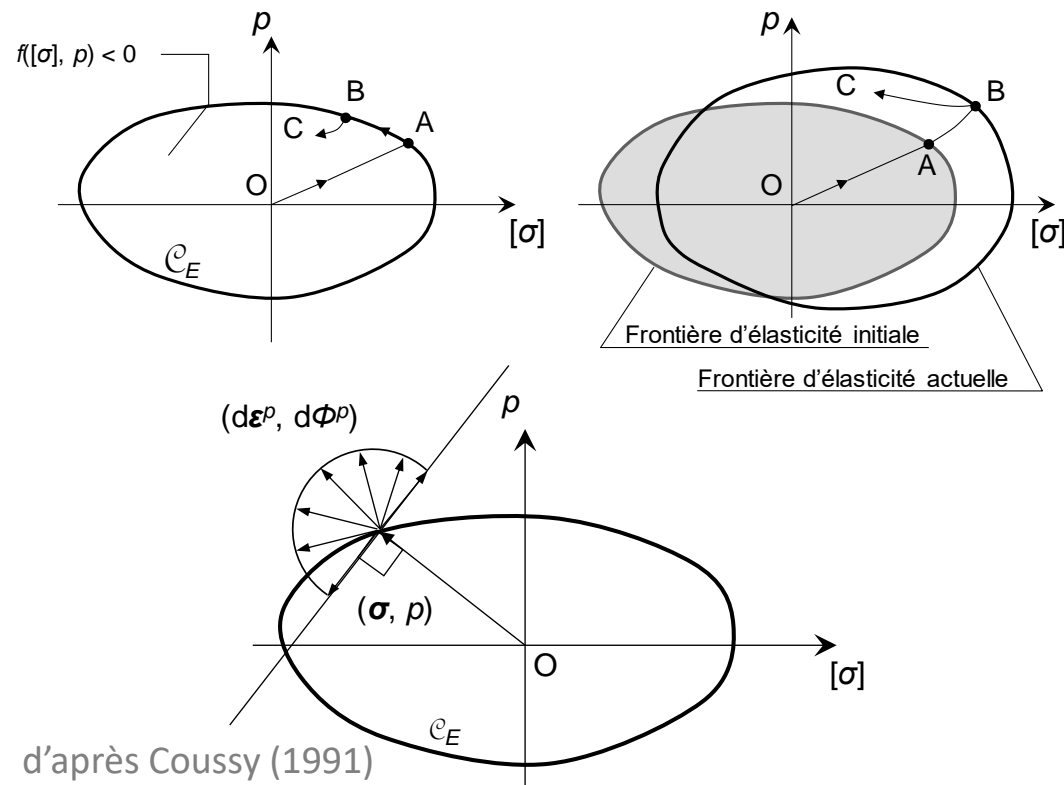
Cas d'un système élémentaire avec 1 solvant et r-1 autres espèces dans le fluide de pore :

$$d\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} d\sigma_{kl} + \sum_r Q_{ij}^r d\mu^r$$
$$dm^r = Q_{ij}^r d\sigma_{ij} + \sum_s B^{rs} d\mu^s$$

- μ^r : potentiel chimique de l'espèce r
- m^r : masse de l'espèce r par unité de volume de référence
- ε_{ij} : déformation
- σ_{ij} : contrainte

Loi de comportement thermo-hydro-mécanique

- Plasticité – lois complémentaires :
 - Définition d'un potentiel plastique
 - Critère de plasticité et règle d'écoulement

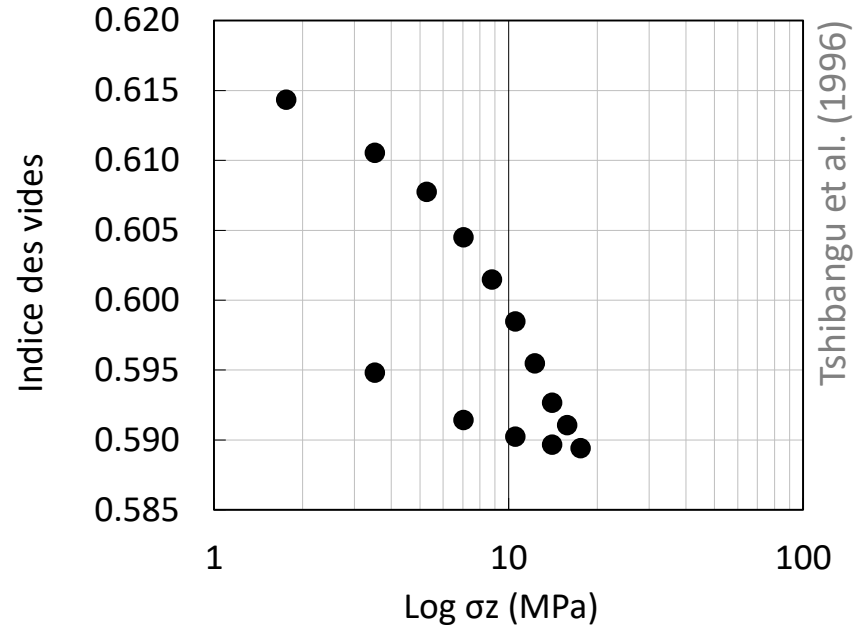
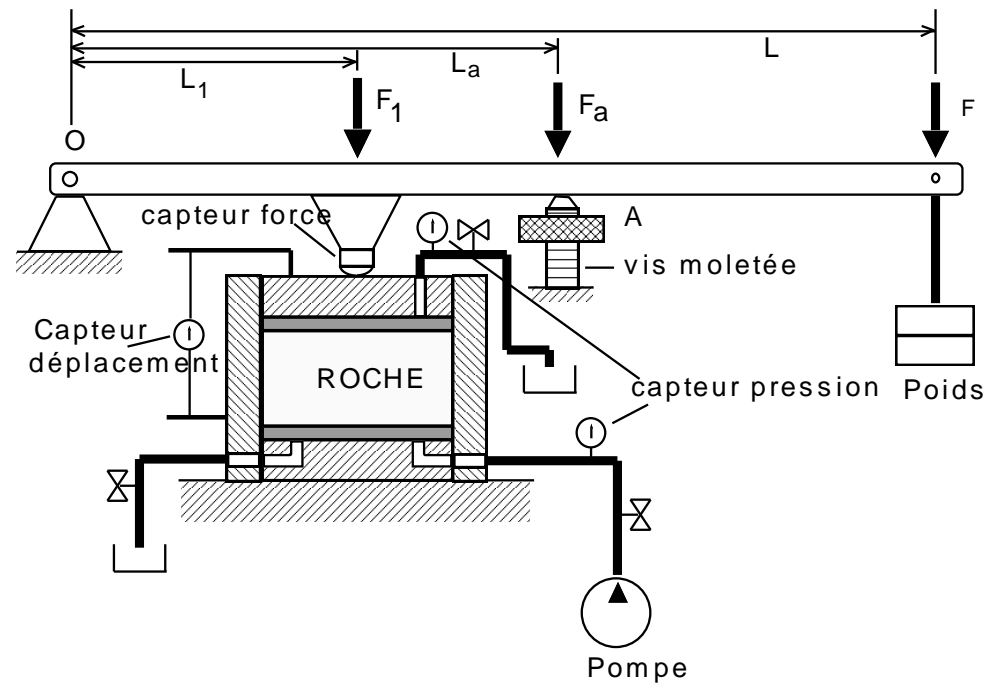


d'après Coussy (1991)

Essais en laboratoire sur l'argile de Boom

- Essais oedométriques
- Essais triaxiaux
- Perméabilité – consolidation
- Advection et diffusion
- Tomographies RX

Essai oedométrique



- Contrainte de consolidation : 6.5 MPa
- Contrainte verticale : 6.2 Mpa
- Argile normalement consolidée

- Indice de consolidation :

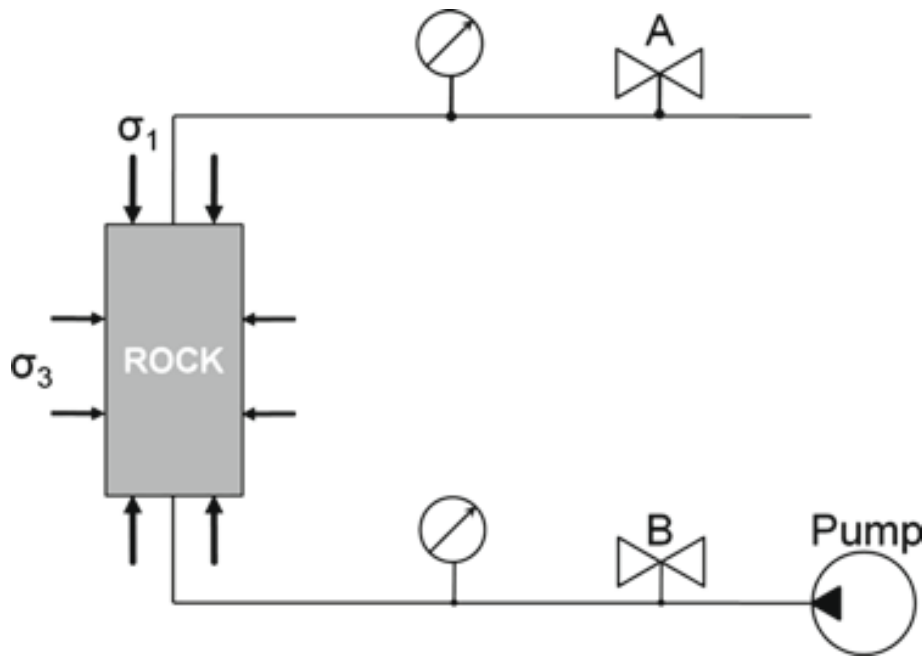
$$\lambda = -\frac{\Delta e_c}{\Delta \log \sigma_z} = -0.0398$$

- Indice de gonflement :

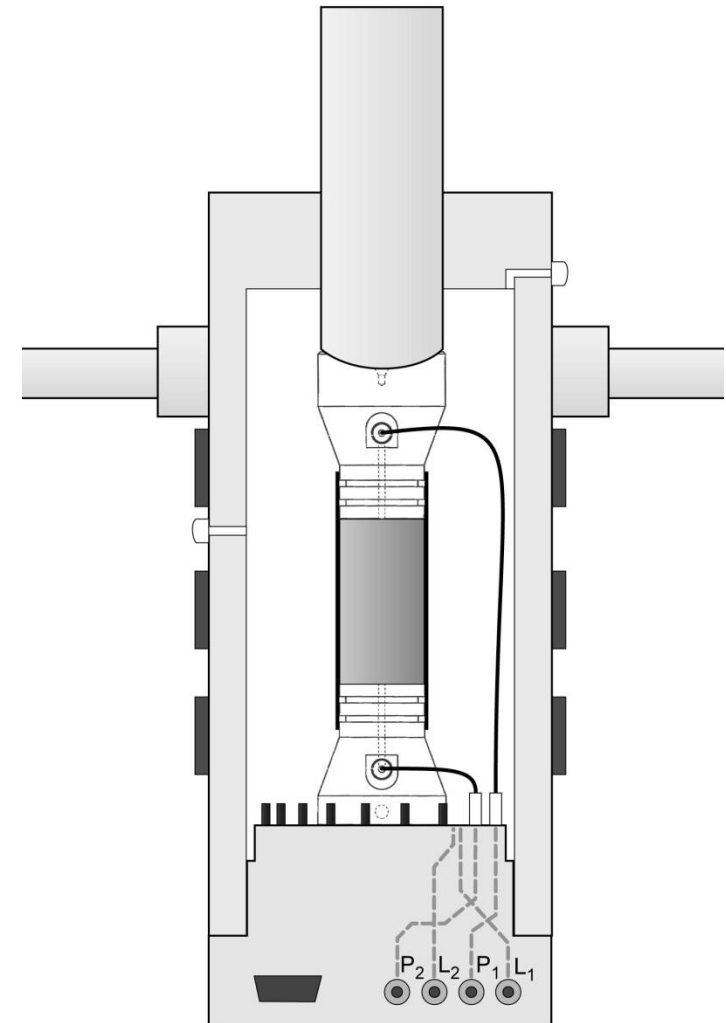
$$\kappa = -\frac{\Delta e_g}{\Delta \log \sigma_z} = -0.0067$$

Essai triaxial – écoulement sous confinement

- Essai drainé : $p = p_0$ (vannes ouvertes)
- Essai non-drainé : $m = 0$ (vannes fermées)
- Paramètres de rupture ou plastification



Tshibangu et al. (1996)

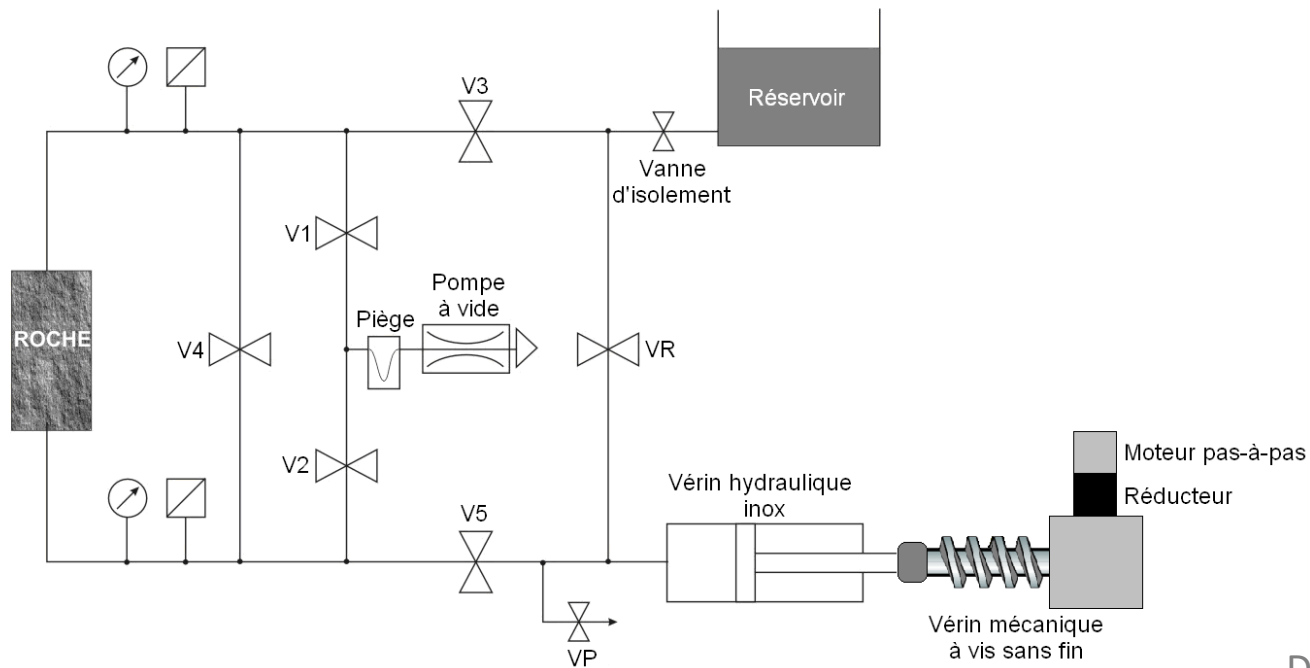


Descamps (2007)

Essai de perméabilité - consolidation

- Montage à pressions constantes (adapté aux matériaux peu perméables)
- Montage à débit constant
- Technique d'impulsion de pression transitoire

Ex.: vérin mécanique à vis sans fin commandé par moteur pas-à-pas

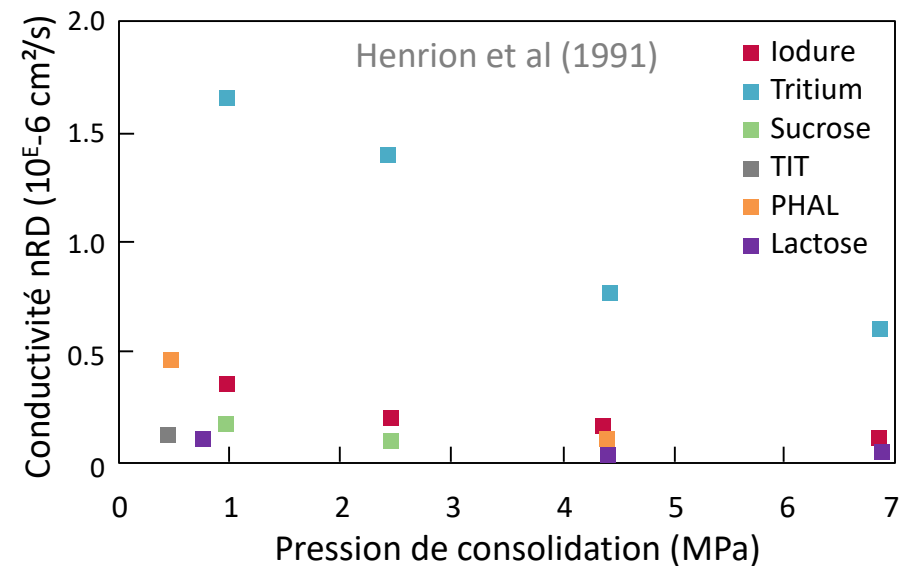
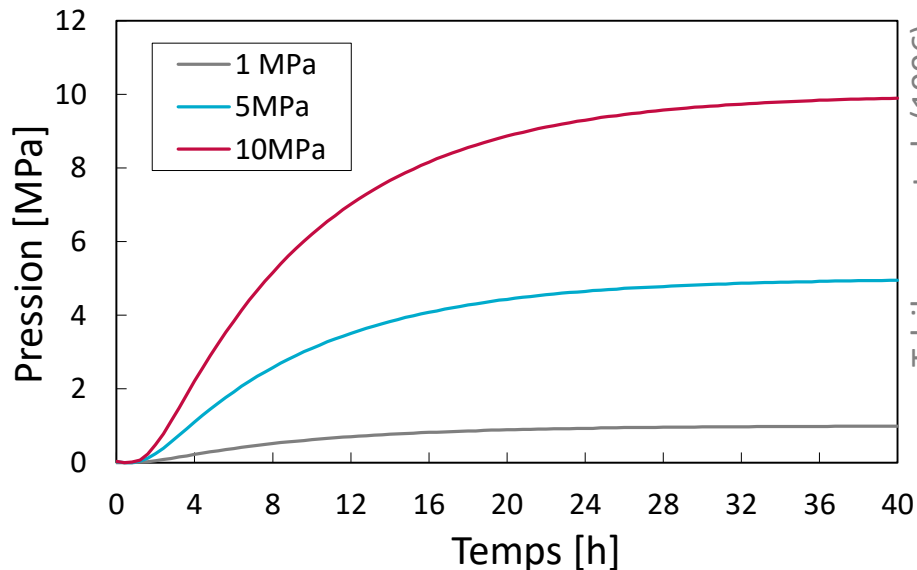
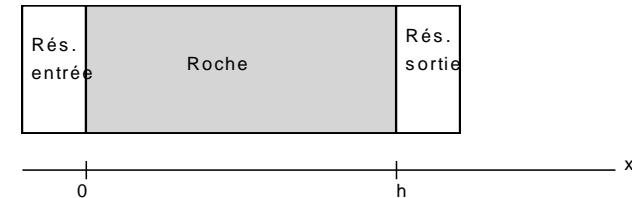


Descamps (2007)

Propagation de pression & diffusion

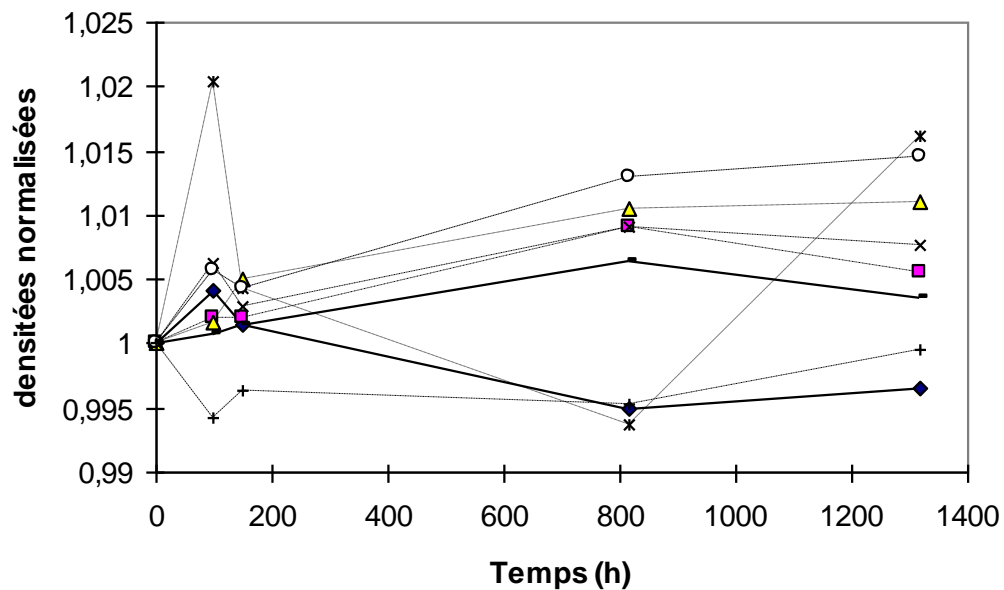
$$p = p_0 - \frac{4p_0}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp \left[-C_0(2n+1)^2 \frac{\pi^2 t}{4h^2} \right] \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2h}$$

$$Q(t) = \eta R S h C_e \left[\frac{tD}{h^2} - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-\frac{n^2 \pi^2 t D}{h^2}} \right]$$



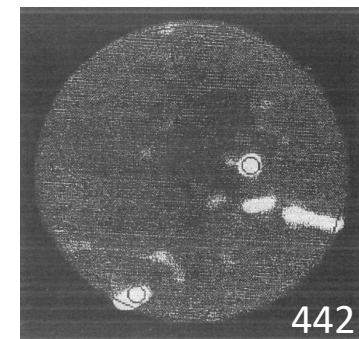
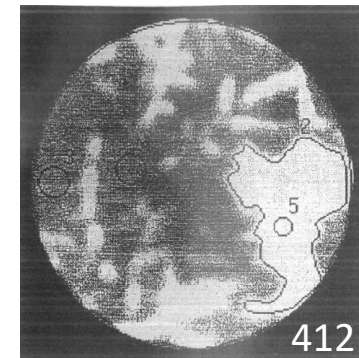
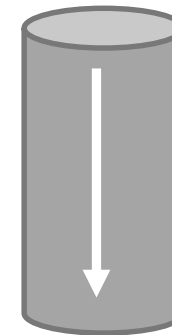
Essai triaxial & RX

- Cellule triaxiale perméable aux rayons X
- La cellule peut être démontée du bâti pour passage au scanner sans affecter les pressions
- Tomographie pour étudier les phénomènes de migration



Expérience de migration de NaCl dans un échantillon d'argile de Boom
(Tshibangu et al. 1996)

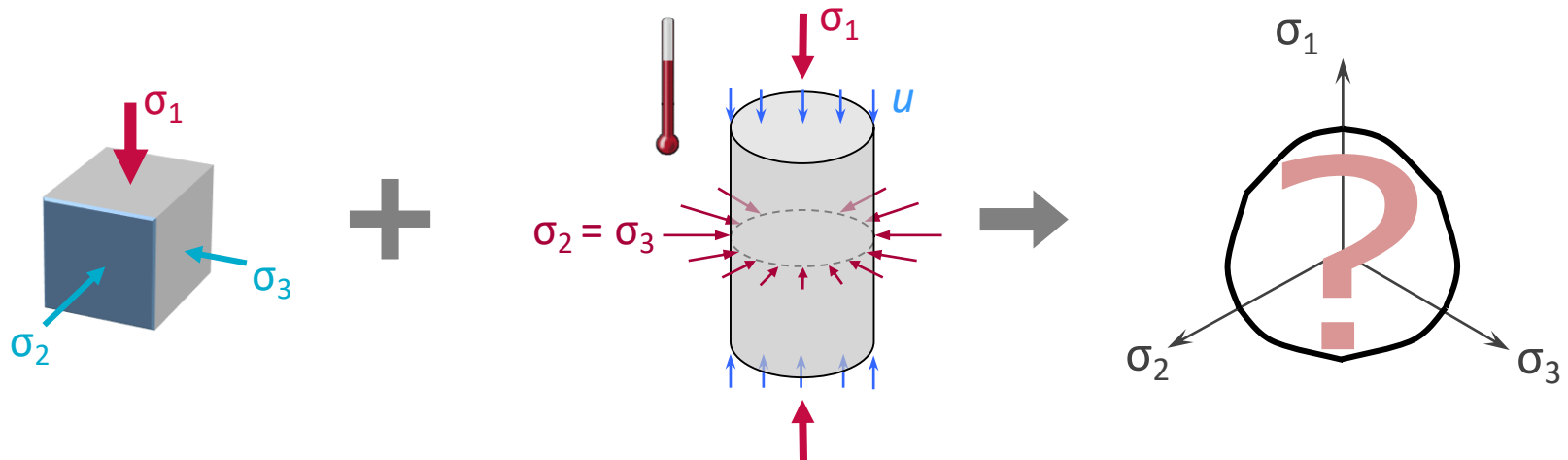
Entrée



Vers des lois de comportement 3D

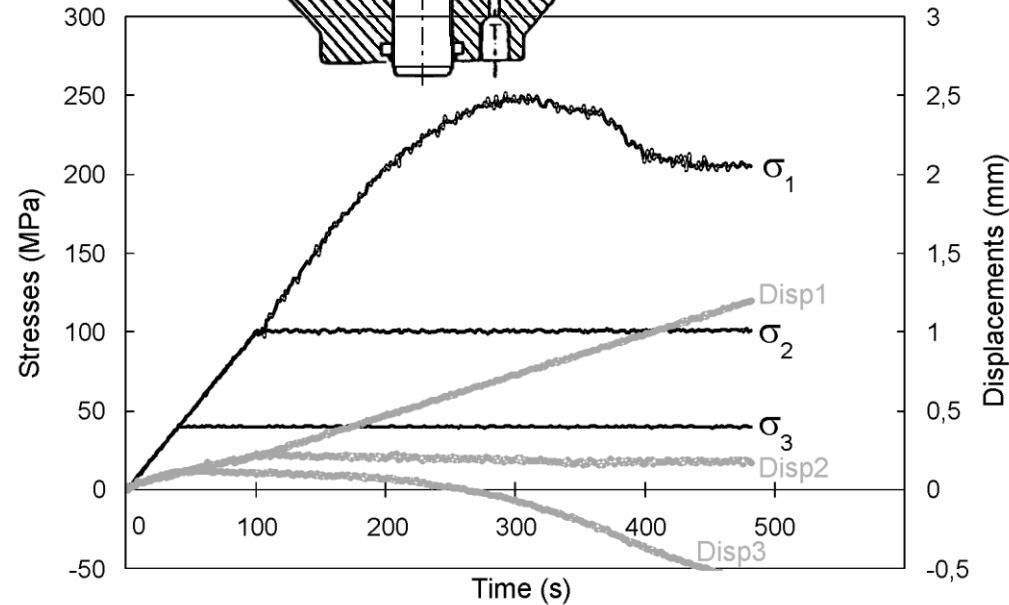
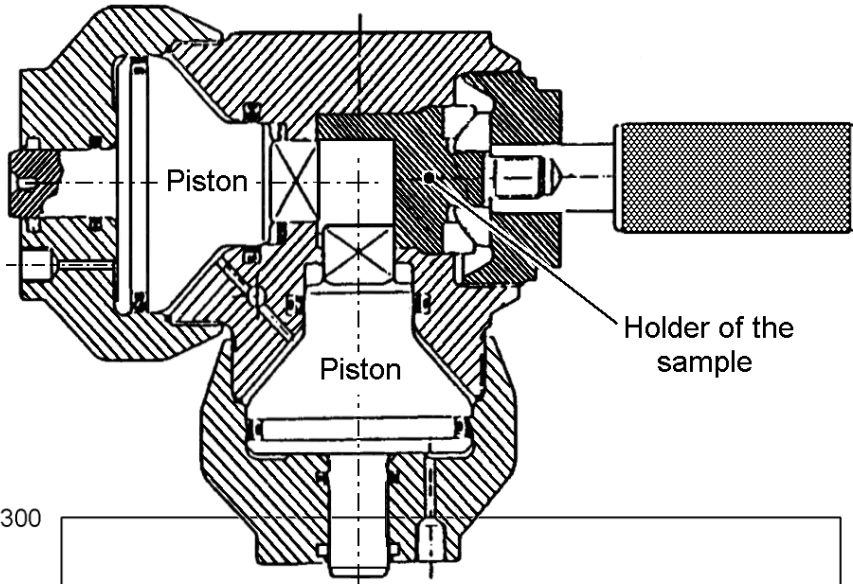
Principe = combiner

- Essais triaxiaux sur roche saturée
 - Essais polyaxiaux sur roche sèche
- ⇒ Effet de la pression de pore et de la température sur les enveloppes limites



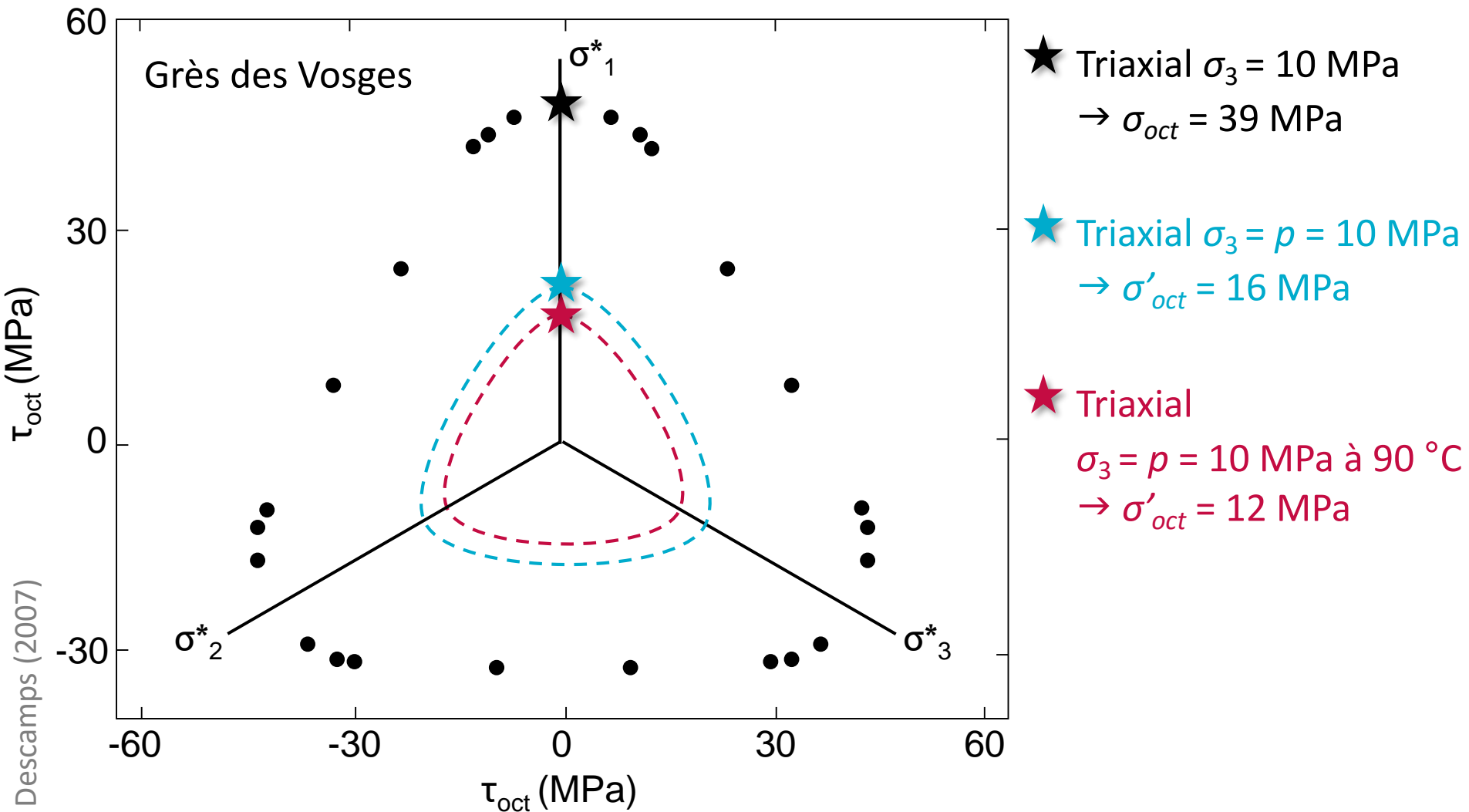
Essai polyaxial

Tshibangu (1993)



- 3 pistons rigides
- Cubes de 30mm de côté
- Jusqu'à 500 MPa dans chaque direction
- Système rigide (3.2 MN/mm)
- Mesures :
 - ϵ : capteurs de déplacement
 - σ : capteurs de pression
 - + calibrations

La combinaison p et t° décale l'enveloppe dans les plans octaédriques et réduit sa taille



Conclusions

- Différentes formations géologiques
 - Focus sur argiles et argile de Boom
 - Mécanismes de transport :
 - écoulement hydraulique
 - transport osmotique
 - communication ouverte
 - Mécanismes de déformation
+ plastification – rupture
 - Essais en laboratoire : oedomètre, triaxial... polyaxial
↳ Essais longs et délicats
- Couplage THM

Références

- Coussy O. (1991). Mécanique des milieux poreux, éditions Technip.
- Tshibangu J-P. (1993). Etude des effets du confinement sur le comportement mécanique des roches pour application au calcul des ouvrages souterrains, Thèse de doctorat, Faculté Polytechnique de Mons
- Tshibangu JP, Descamps F (2011). Engineering Challenges in the Geological Disposal of Radioactive Waste and Carbon Dioxide. In Toth F. (ed) Geological Disposal of Carbon Dioxide and Radioactive Waste: A Comparative Assessment, Advances in Global Change Research 44, DOI 10.1007/978-90-481-8712-6_7
- Tshibangu JP, Sarda JP, Audibert-Hayet A. (1996). Etude des interactions mécaniques et physico-chimiques entre les argiles et les fluids de forage. Application à l'argile de Boom (Belgique), in Oil and Gas Science and Technology – Revue de l'IFP, 51 (4) 497-526
- Descamps F. (2007). Etude du comportement des roches poreuses saturées aux conditions de grande profondeur. Mise au point d'un système de compression triaxiale intégrant les effets de la pression de pore et de la température. Thèse de doctorat, Faculté Polytechnique de Mons