



Étude du comportement thermo-hydro-mécanique de matériaux rocheux poreux dans une cellule triaxiale en relation avec la séquestration du CO₂

Présentation du travail de fin d'études

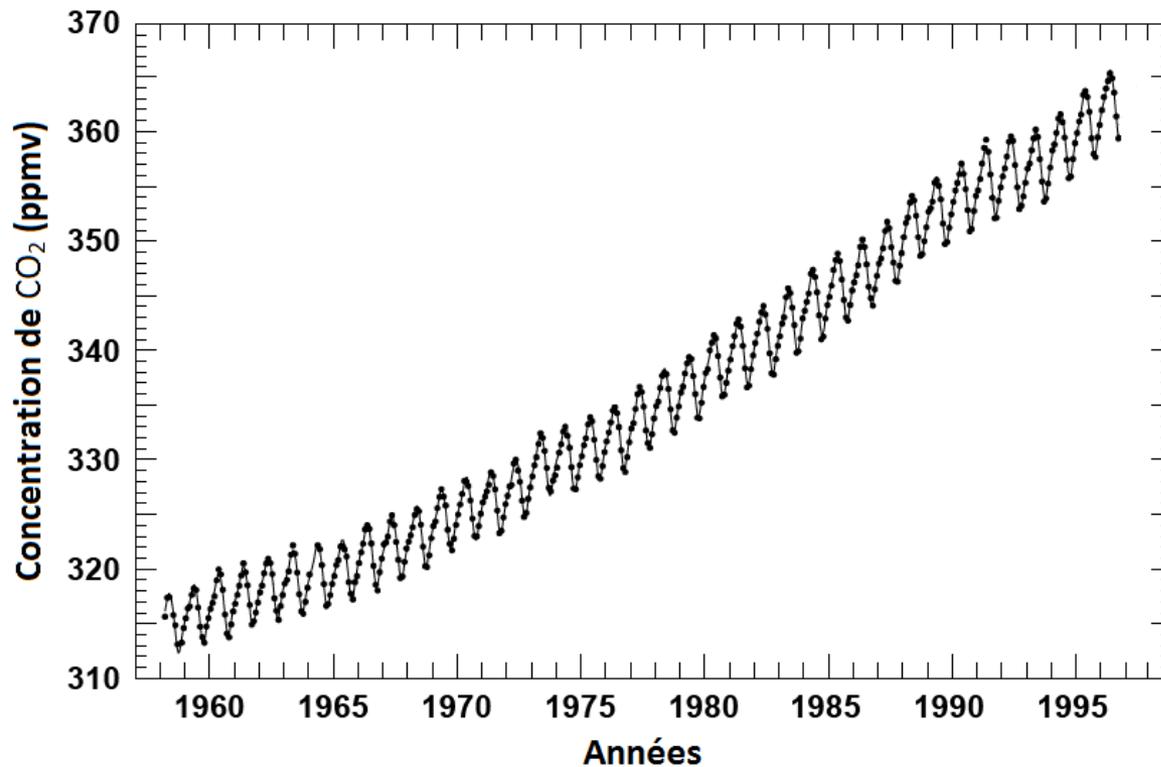
Promoteurs : Prof. Dr Ir J.-P. Tshibangu Katshidikaya
Dr Ir F. Descamps

Réchauffement climatique

- Problématique
- Lié à l'augmentation de la concentration en GES

Le dioxyde de carbone

- 55% de l'effet de serre anthropique
- Concentration en constante augmentation



→ Stocker le CO₂
géologiquement

3 phénomènes lors de l'injection

Étude géomécanique pour ϵ
avec comportement THM

→ Long terme

Plan de la présentation

Le stockage du CO₂

Le comportement thermo-hydro-mécanique (THM)

- Définition
- Étude en laboratoire

Étude expérimentale

- Les matériaux utilisés
- Conditions pratiques des essais triaxiaux
- Essais sur échantillons secs
- Essais sur échantillons saturés

Analyse des résultats

- Influence du confinement
- Influence de la pression de pore
- Influence combinée de la pression de pore et de la température

Conclusions et perspectives

Le stockage du CO₂

Séquestration géologique

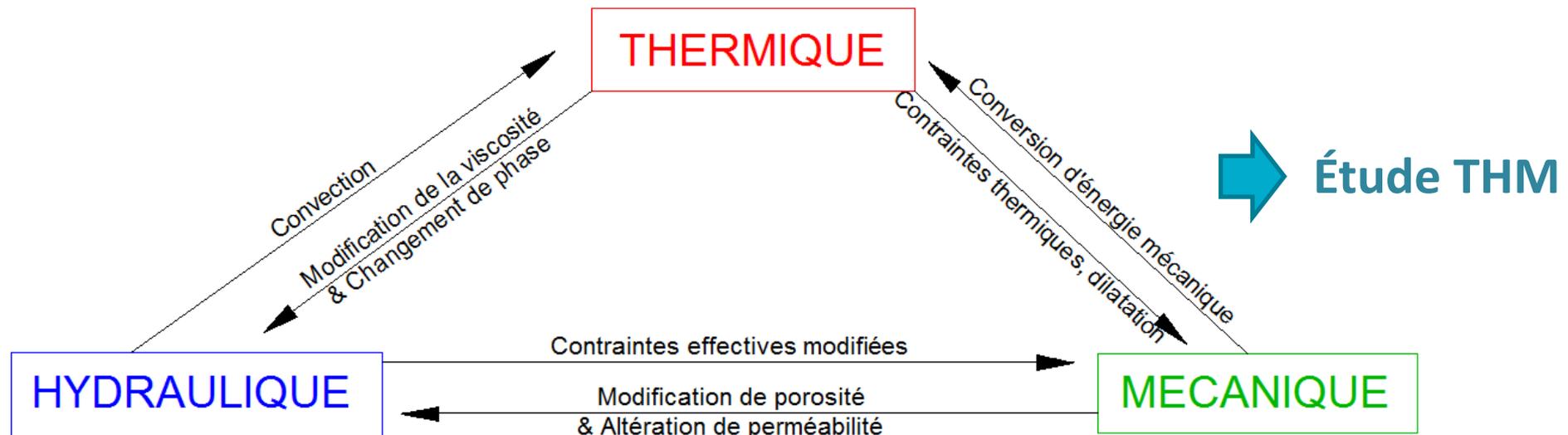
- CO₂ supercritique
- Grandes capacités de stockage

→ Paramètres de formation liés

→ Porosité (capacité de stockage)

→ Perméabilité (propension du matériau à se faire traverser par un fluide)

→ Phénomènes interconnectés liés



Le comportement THM

Définition

- Détermine la déformation de la roche suite aux sollicitations THM
 ↳ Géomécaniquement désirée
- 3 variables pour THM: **T, m, ε**
 ↳ nécessite 3 équations
- Par la thermodynamique des milieux continus:
 → Équations d'états de la thermo-poro-élasticité linéaire (matériau isotrope):

$$[\sigma] = \sigma_0 [1] + \lambda_u \text{tr}[\varepsilon] [1] + 2G[\varepsilon] + b M \frac{m}{\rho_{fl_0}} [1] + 3K_u \alpha_u (T - T_0) [1]$$

$$p = p_0 + M \left(b \text{tr}[\varepsilon] + \frac{m}{\rho_{fl_0}} \right) + \rho_{fl_0} l (T - T_0)$$

$$S = S_0 + m s_{m_0} + 3K_u \alpha_u \text{tr}[\varepsilon] - l m + d (T - T_0)$$

Le comportement THM

Définition

- Détermine la déformation de la roche suite aux sollicitations THM
 ↳ Géomécaniquement désirée

- 3 variables pour THM: **T**, **m**, **ε**
 ↳ nécessite 3 équations

- Par la thermodynamique des milieux continus:
 → Équations d'états de la thermo-poro-élasticité linéaire (matériau isotrope):

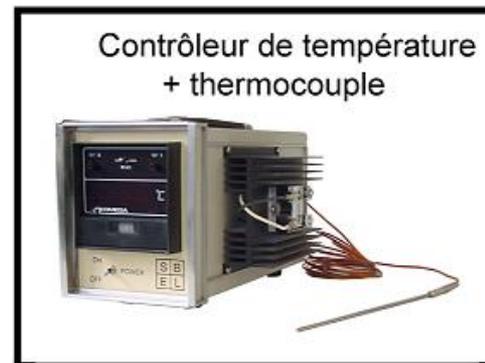
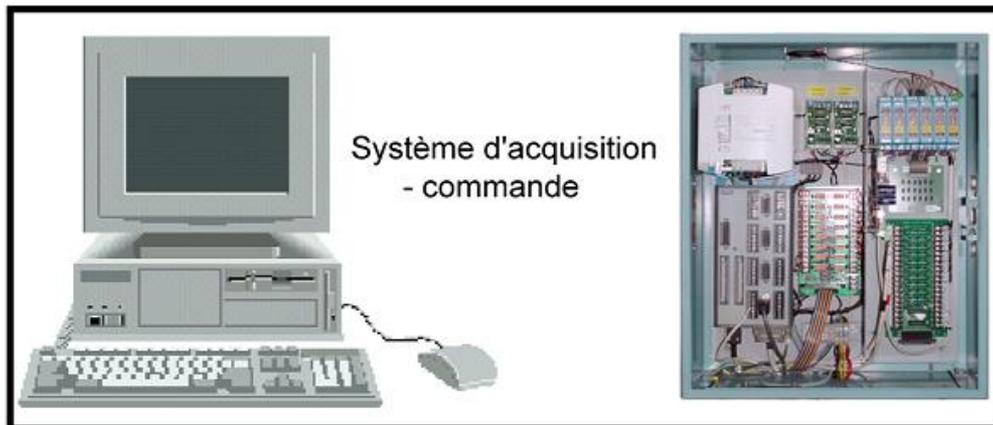
$$[\sigma] = \sigma_0[1] + \lambda_u \text{tr}[\varepsilon][1] + 2G[\varepsilon] + b M \frac{m}{\rho f l_0} [1] + 3K_u \alpha_u (T - T_0) [1]$$

↳

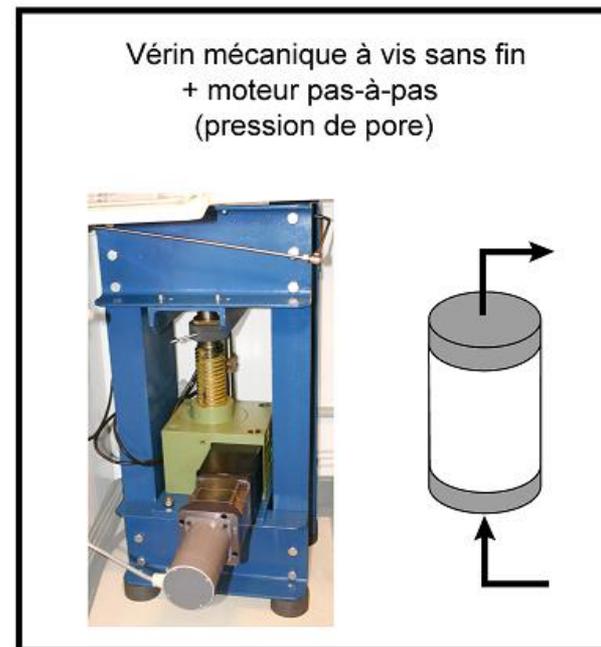
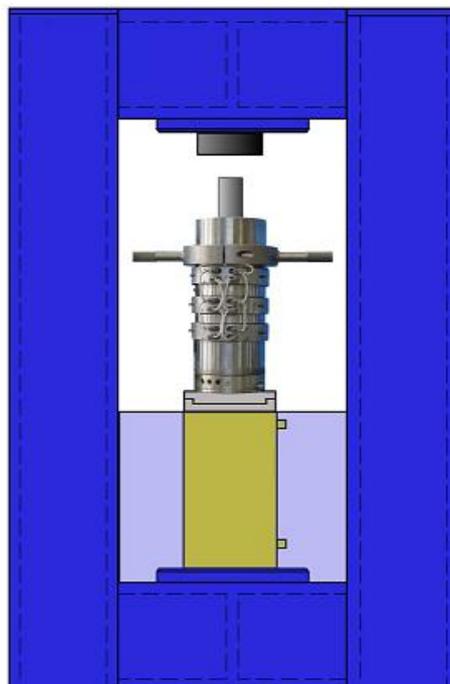
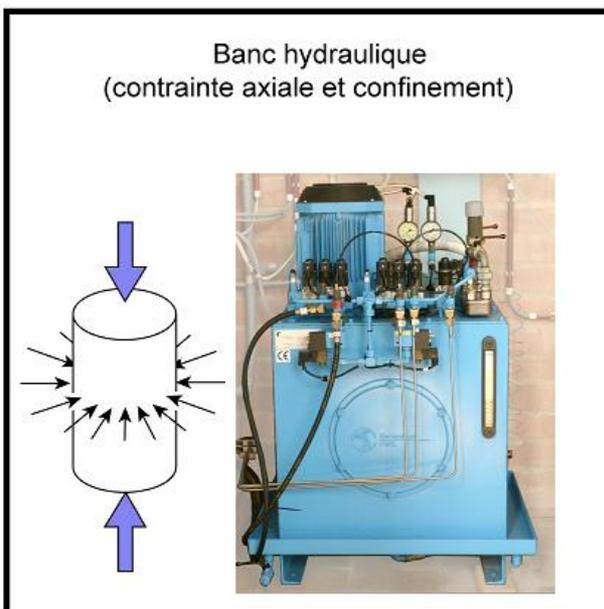
$$\underbrace{(E - 2G)[\varepsilon] - \lambda_u \text{tr}[\varepsilon][1]}_{\rho f l_0} = \varepsilon_0 E_0 [1] + \frac{bM}{\rho f l_0} \mathbf{m}[1] + 3K_u \alpha_u (\mathbf{T} - T_0)[1]$$

$$S = S_0 + m s_{m_0} + 3K_u \alpha_u \text{tr}[\varepsilon] - l m + d (T - T_0)$$

Étude en laboratoire

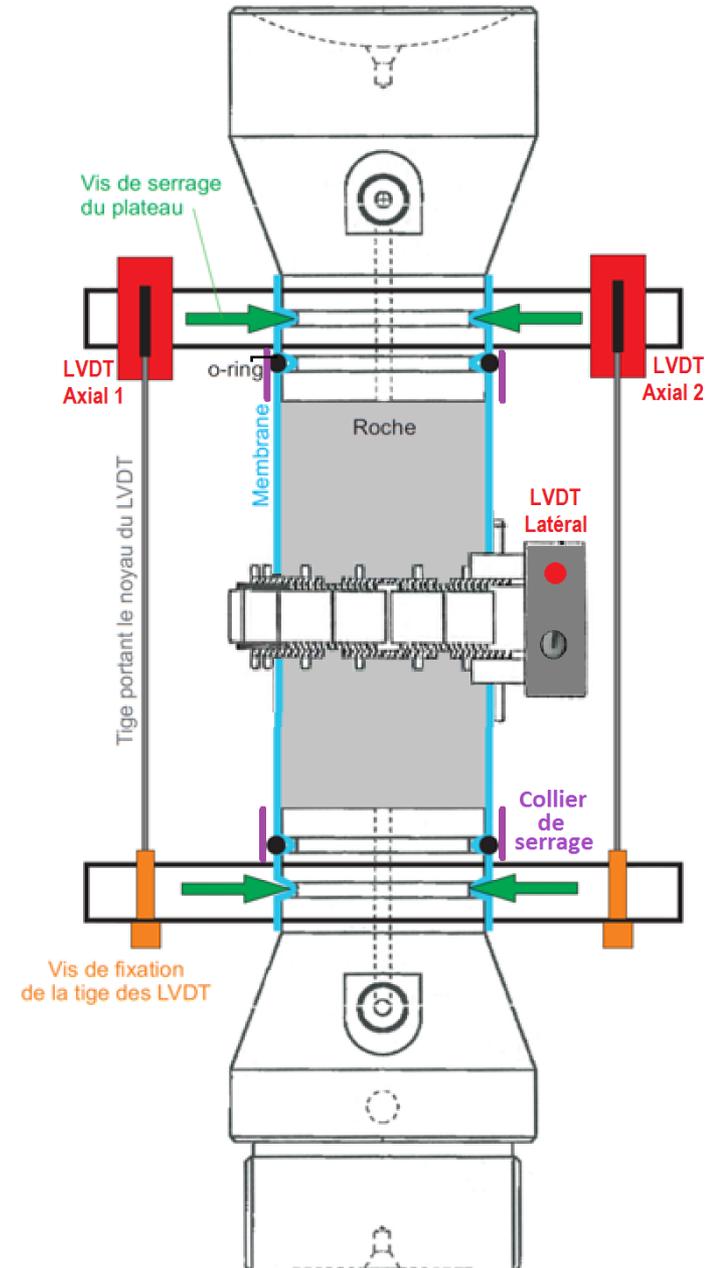


PRESSE DE COMPRESSION TRIAXIALE



Système de mesure des déformations

- À l'intérieur de la cellule
- 3 capteurs LVDT
- Déformations maximales mesurables
 - Axiales: 4,8 %
 - Latérales: 3,47 %



Définition pratique du comportement

- Obtention des paramètres pour écrire les équations
 - Mesure de la porosité initiale
 - Essai sans membrane (K_S) →
 - Essai drainé (E et K)
 - Calculer K_{FL} et tous les autres paramètres nécessaires
 - Essai de dilatation pure (α_u)
- Préciser une fonction de charge (lorsqu'on quitte le domaine élastique)
- ➔ Dans ce travail, on s'est limité à déterminer les paramètres nécessaires à l'écriture des équations d'état de la thermo-poro-élasticité linéaire



Étude expérimentale

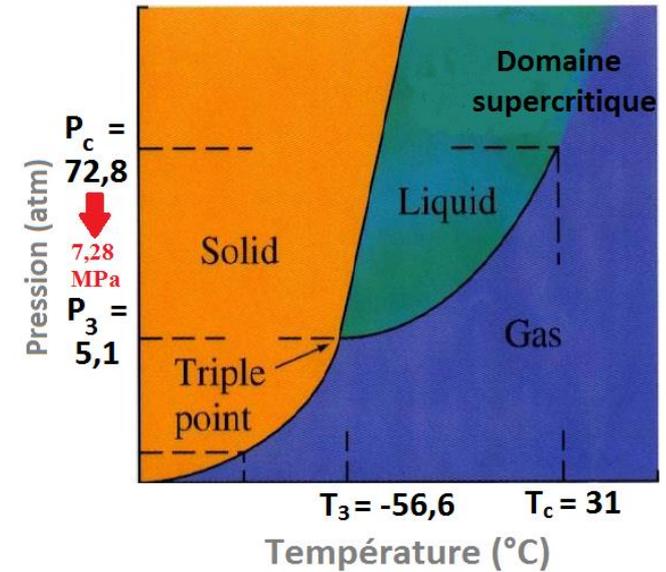
Les matériaux utilisés

- Choisis selon
 - Leurs propriétés
 - Leurs différences de constitution
- Grès des Vosges
 - Très étudié
 - 70 à 95 % de quartz
 - Porosité moyenne de 20 %
 - Perméabilité intrinsèque: 125 mD
- Calcaire de Sorcy
 - Relativement homogène et isotrope
 - 99,5 % de calcite
 - Porosité moyenne de 25 à 30 %
 - Perméabilité intrinsèque: 710 mD

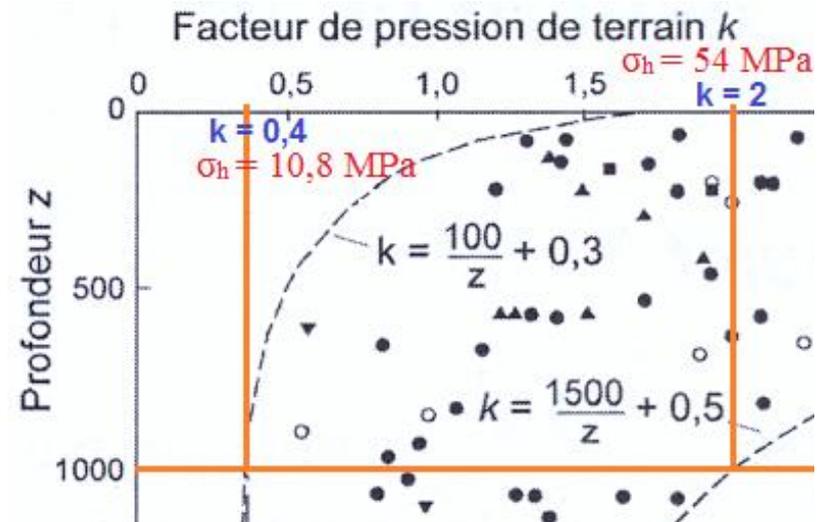
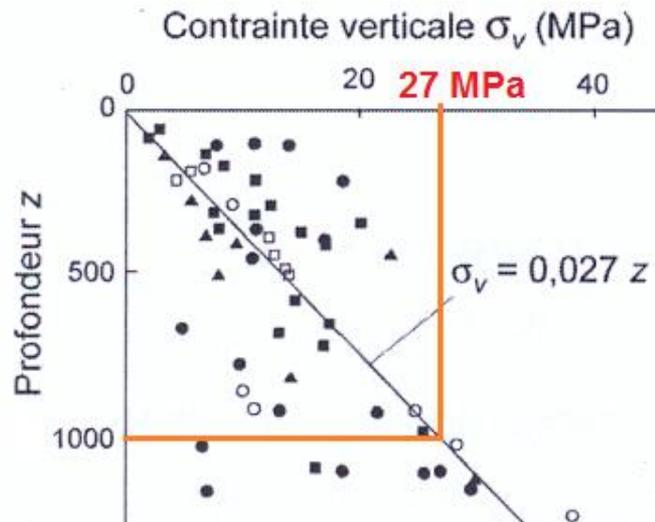


Conditions pratiques des essais triaxiaux

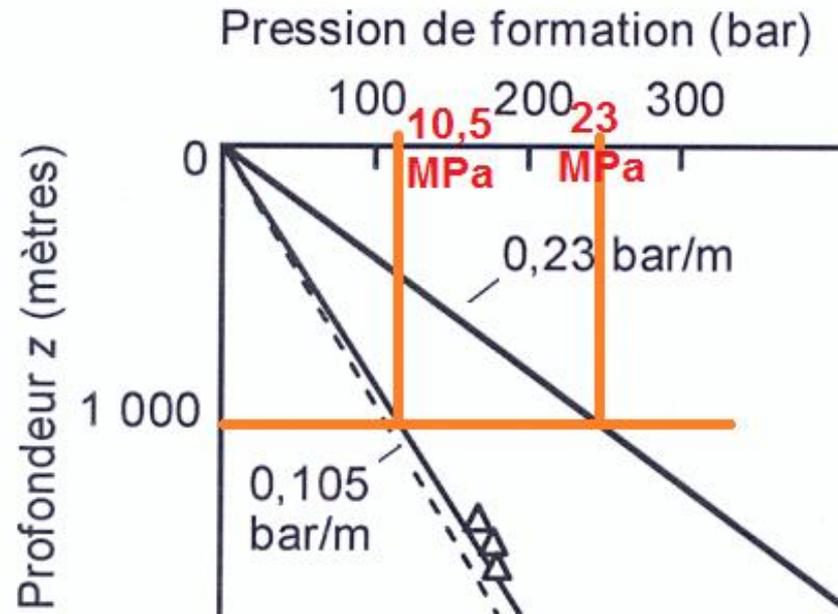
- Choisies de manière à concorder avec:
 - D'autres études (source de comparaison)
 - Le cas du stockage géologique
- Relations conditions d'essai – profondeur de stockage



Confinement



Pression de pore



Température: gradient normal de $3^\circ\text{C}/\text{hectomètre}$

→ **30°C** à 1000 mètres de profondeur

Essais sur échantillons secs

- Permettent la comparaison avec d'autres études
- Conditions d'essai
 - Drainées ($p=p_0=0$)
 - Chargement hydrostatique puis déviatorique
 - Contrôle en déformation (taux: 10^{-3} %/s)

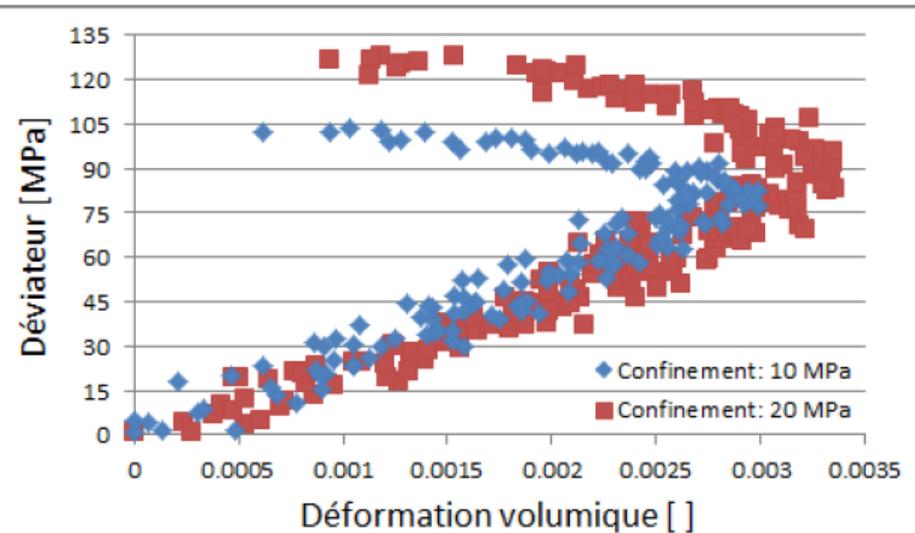
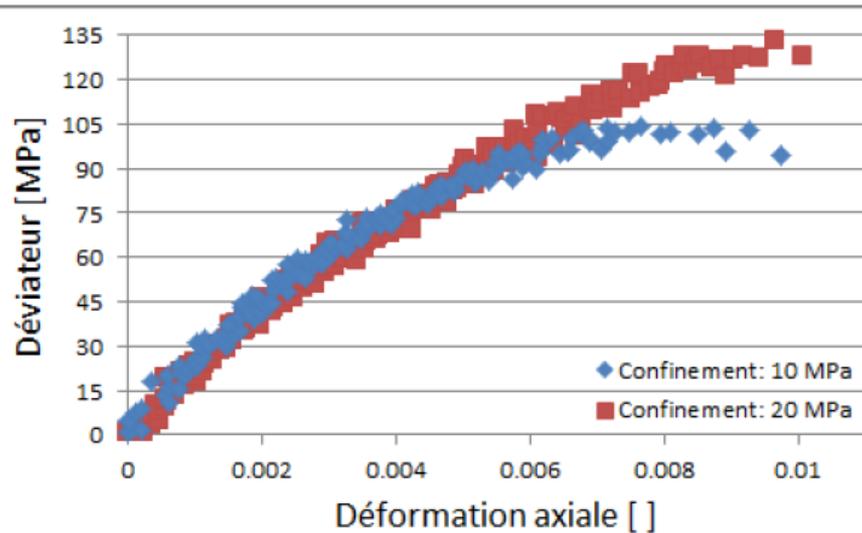
Essais sur échantillons saturés

- Font valoir le terme « hydro » de THM (+ éventuellement « thermo »)
- Conditions d'essai
 - Saturées en huile (CO₂ supercritique eut été mieux...)
 - Viscosité dynamique de 48 cP (huile) contre 0,01 à 0,02 cP (CO₂ supercritique)
 - Sans membrane (détermination de K_s)
 - Chargement hydrostatique puis déviatorique
 - Contrôle en déformation (taux: 10^{-3} %/s)

Analyses des résultats

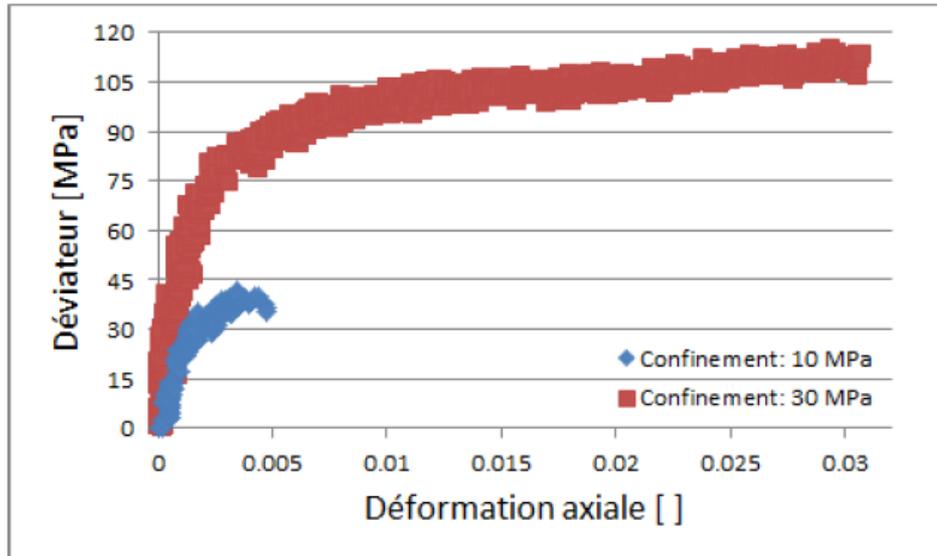
Influence du confinement

■ Grès des Vosges sec à 20°C



- Comportement identique à 10 et 20 MPa de confinement:
 - Élasto-plastique à rupture fragile
 - Dilatant
- Augmentation de la limite élastique et de la résistance avec le confinement
- Augmentation de l'angle de rupture avec le confinement

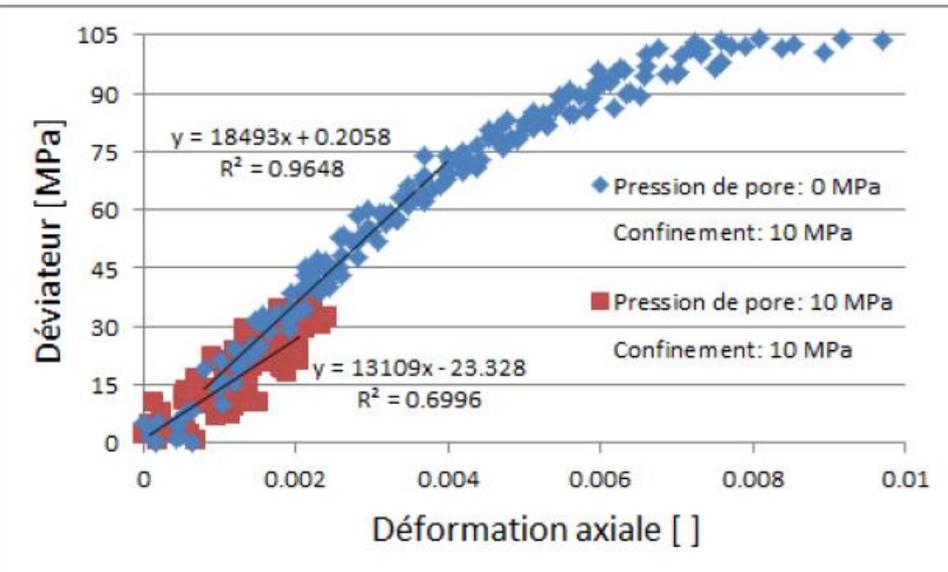
■ Calcaire de Sorcy sec à 20°C



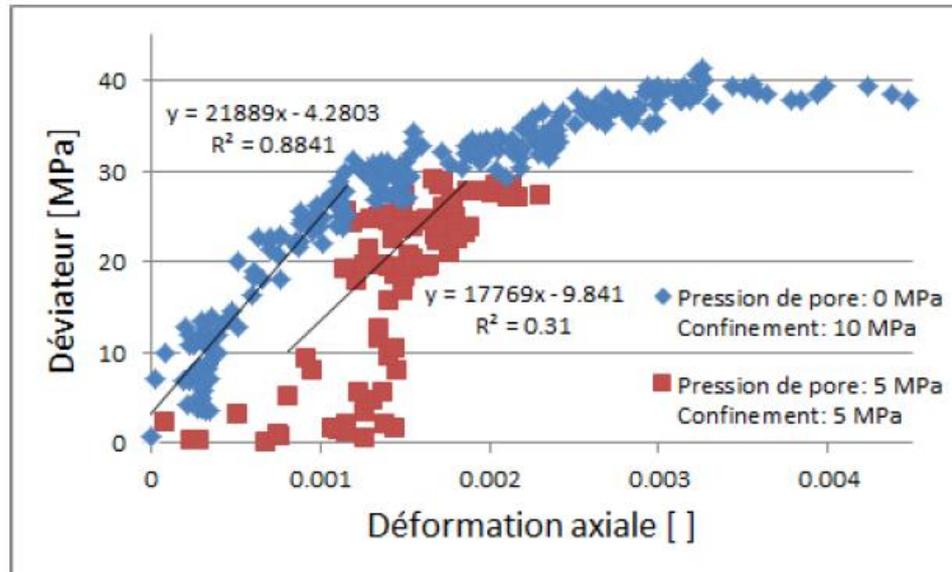
- Comportement différent entre 10 et 30 MPa de confinement:
 - Élasto-plastique à rupture fragile et ductile
 - ➔ transition fragile-ductile pour un confinement compris entre 10 et 30 MPa
 - Dilatant dans les 2 cas
- Augmentation de la limite élastique et de la résistance avec le confinement

Influence de la pression de pore (essais sans membrane)

Sur le comportement du matériau



Cas du Grès des Vosges à 20°C



Cas du calcaire de Sorcy à 20°C

→ Comportement toujours élasto-plastique à rupture fragile

Plastification diminue avec la pression de pore

Sur la limite élastique, la résistance et l'angle de rupture

→ Diminution des 3 avec la pression de pore

■ Sur les propriétés poro-élastiques

Nom	Confinement [MPa]	p [MPa]	T [°C]	E [MPa]	ν	$K_{calculé}$ [MPa]
G5	10	0	20	18493	0,12	8111
G7	10	10	20	13109	0,34	13655
S2	10	0	20	21889	0,24	14031
S4	5	5	20	17769	0,34	18509

■ Avec l'augmentation de la pression de pore (essai sans membrane):

- Diminution du module de Young
- Augmentation du coefficient de Poisson
- Augmentation du module d'incompressibilité

■ À partir des essais menés sur le Grès des Vosges:

→ calcul du coefficient de Biot

$$b = 0,406$$

$$b = 1 - \frac{K}{K_s}$$

Influence combinée pression de pore + température



Essais les plus intéressants !

■ Paramètres élastiques (E, ν et K)

Nom	Confinement [MPa]	p [MPa]	T [°C]	E [MPa]	ν	$K_{calculé}$ [MPa]
G7	10	10	20	13109	0,34	13655
G8	10	10	90	12443	0,09	5058
S4	5	5	20	17769	0,34	18509
S5	5	5	90	17176	0,22	10224

→ Diminution globale

→ Diminution du module d'incompressibilité

→ Augmentation de la compressibilité et donc diminution de la porosité

→ Quantité stockable amoindrie !

■ La variation de température n'a montré aucune influence sur:

- Le comportement des roches
- Les limites élastiques et résistances
- Les angles de rupture

Conclusions et perspectives

■ Conclusions

- Avec le confinement, les limites élastiques et résistances augmentent. On a aussi le passage d'un comportement fragile à ductile du Calcaire de Sorcy pour un confinement compris entre 10 et 30 MPa.
- La pression de pore contrecarre les effets du confinement lors d'essais sans membrane (confinement effectif nul).
- L'étude de l'influence combinée de la pression de pore et de la température est très intéressante pour la séquestration géologique.
 - L'augmentation de la température fait diminuer les paramètres élastiques.
 - La diminution de K_s sous-entend une diminution de porosité et donc une diminution du volume de stockage.
- Les données récoltées dans ce travail pourront en compléter d'autres et éventuellement contribuer à l'amélioration de modèles de réservoir.

■ Perspectives principales

- Adapter le système triaxial ainsi que le système de saturation à l'utilisation de CO₂ supercritique comme fluide.
- Réaliser plus d'essais afin
 - d'affiner
 - de compléter
 - de nuancer les résultats obtenus

Merci de votre attention

Paramètres introduits dans les équations d'états THM:

- Élastiques (pour les drainés):

$$G = \frac{E}{1 + 2\nu} \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)}$$

$$E = G \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G}$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} = \frac{3\lambda + 2G}{3}$$

$$\lambda = \frac{E \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

$$\nu = \frac{\Delta \varepsilon_{lat}}{\Delta \varepsilon_{ax}}$$

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

$$K = \frac{tr[\sigma]}{3 tr[\varepsilon]}$$

- Poro-élastiques:

$$B_S = \frac{\frac{1}{K} - \frac{1}{K_S}}{\phi_0 \left[\frac{1}{K_{fl}} - \frac{1}{K_S} \right] + \left[\frac{1}{K} - \frac{1}{K_S} \right]}$$

$$b = 1 - \frac{K}{K_S}$$

$$M = \left(\frac{b - \phi_0}{K_S} + \frac{\phi_0}{K_{fl}} \right)^{-1}$$

- Liés aux propriétés thermiques

$$\varepsilon_T = \alpha_u (T - T_0) \quad Si \ m = 0$$

$$\varepsilon_T = \alpha (T - T_0) \quad Si \ p = p_0$$