

École des Ponts  
ParisTech

Navier

CERMES

## Nouvelle cellule triaxiale pour l'étude du comportement thermo-hydro-mécanique des roches de très faible perméabilité

M. Monfared, P. Delage, J. Sulem, A.M. Tang,  
E. De Laure, M. Mohajerani, Y.J. Cui

UNIVERSITÉ  
— PARIS-EST



TIMODAZ

# PLAN

Problématique: Difficultés expérimentales pour l'étude du comportement des argilites de stockage

Présentation d'un nouveau dispositif triaxial

Applications:

Argile à Opalinus (laboratoire souterrain du Mont Terri, Suisse)

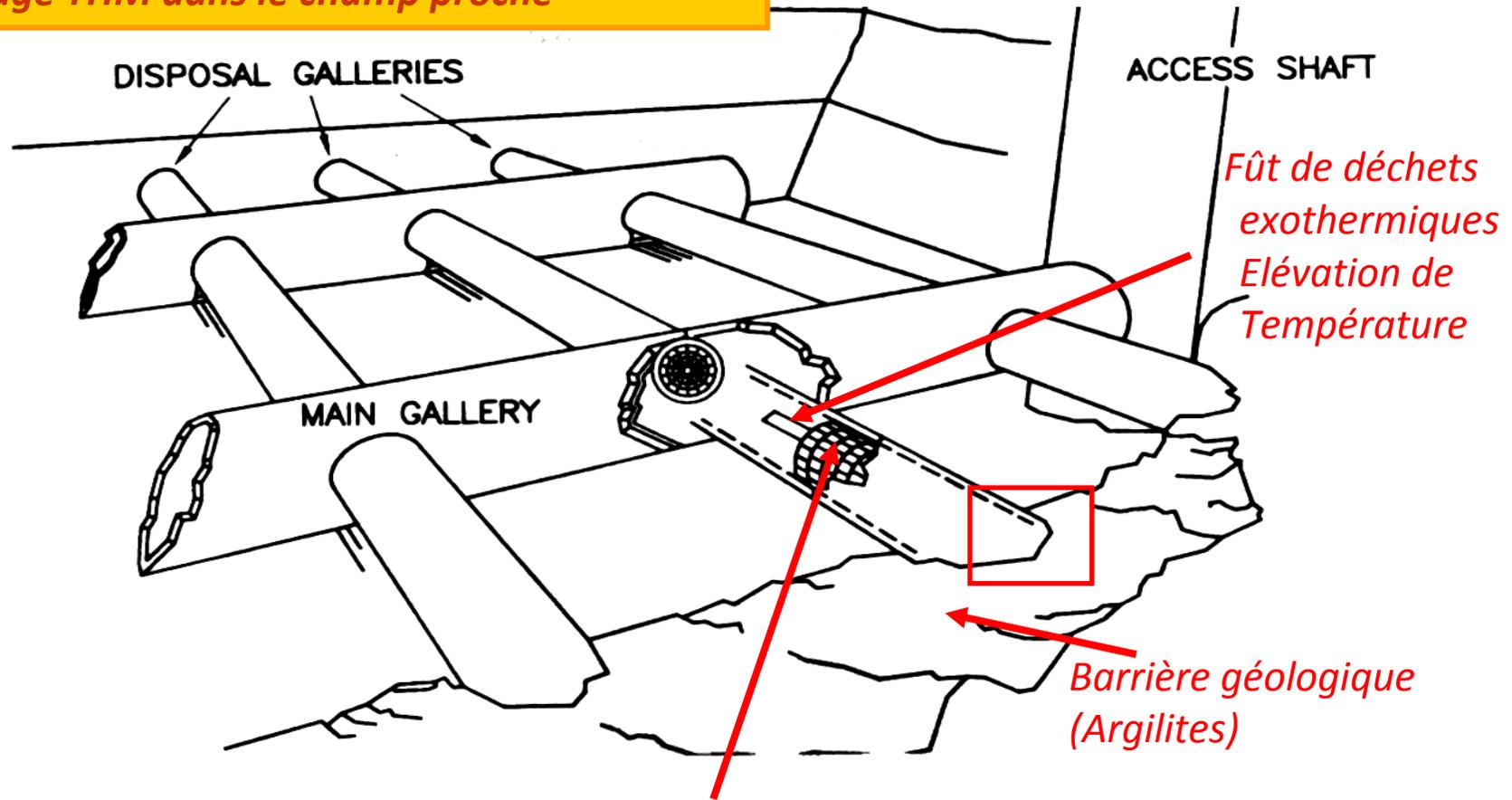
Argile de Boom (laboratoire souterrain de Mol, Belgique)

Conclusion

Autres sites (laboratoire souterrain de Bure, France)

# Stockage géologique des déchets radioactifs dans des formations d'argilite

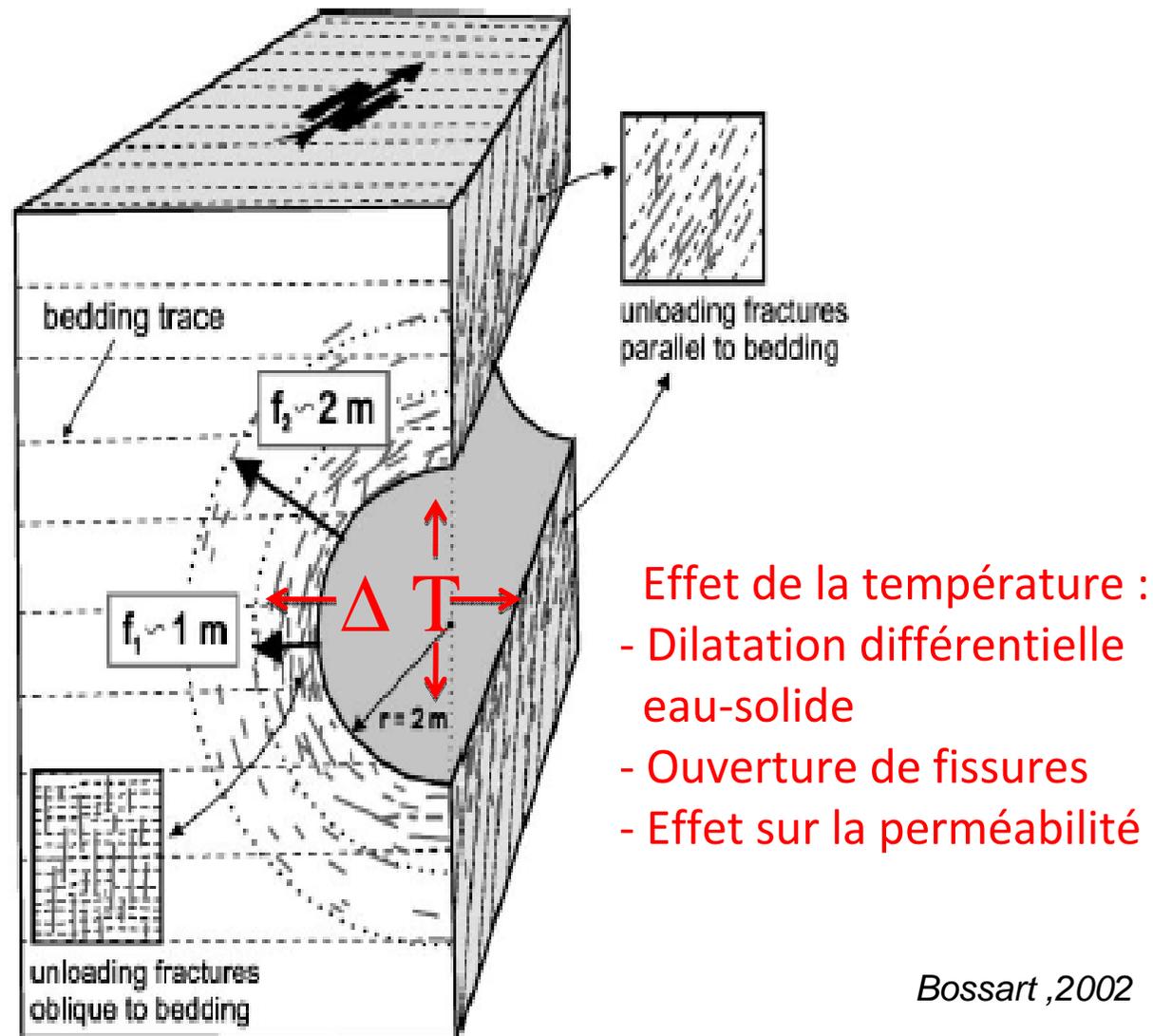
**Couplage THM dans le champ proche**



*Barrière ouvragée (bentonite compactée)*

*D'après Gens & Olivella 2001*

## EDZ : Zone endommagée par l'excavation



## Objectifs de l'étude

Couplage endommagement-perméabilité  
Couplage **température**-endommagement-perméabilité

## Approche expérimentale

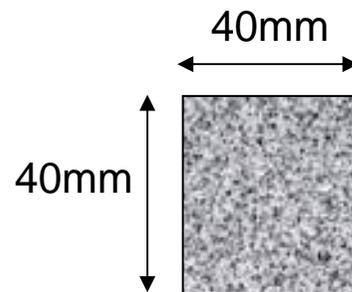
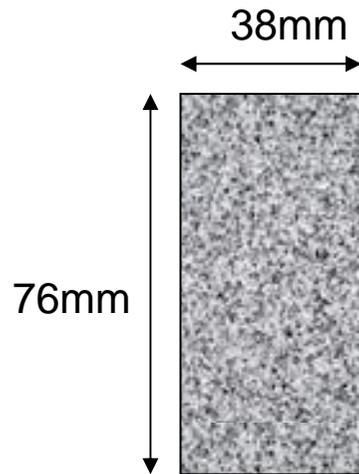
Etude en laboratoire de l'effet des contraintes et de la température sur les propriétés mécaniques et les propriétés de transport d'une argilite

## Difficultés expérimentales

**Très faible perméabilité des argilites** ( $10^{-20}$  à  $10^{-19}\text{m}^2$ , soit  $10^{-5}$  mD)

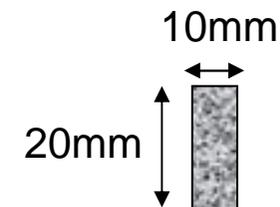
- Re-saturation des échantillons
- Réalisation d'essais 'drainés'

Essai triaxial standard sur échantillons cylindriques



Rapport d'élanement inférieur à 2

Coll 2005

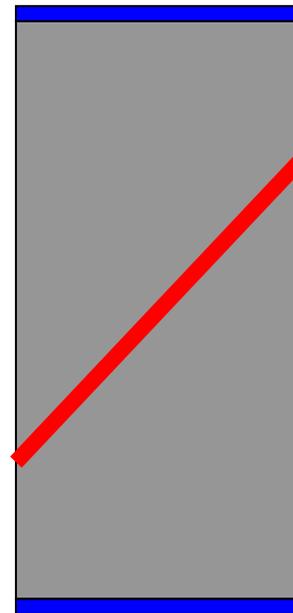
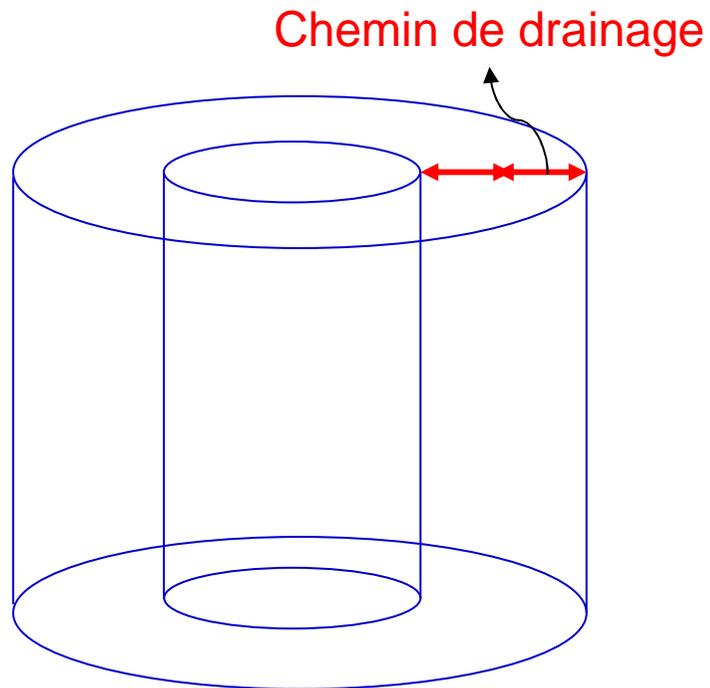


Difficulté de mesure locale  
des déformations

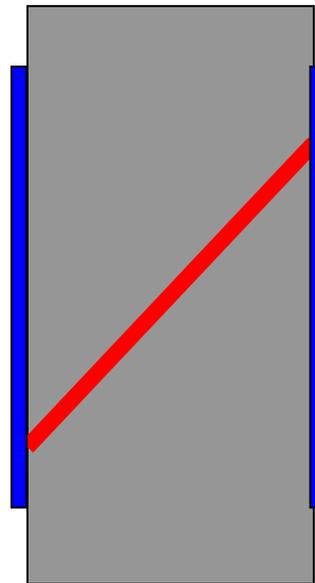
Lenoir, 2010

## Avantages des essais avec des cylindres creux minces:

- Réduire la distance de drainage (drainage radial)
- Etudier l'effet de la formation d'une bande de cisaillement sur la perméabilité



Drainage classique

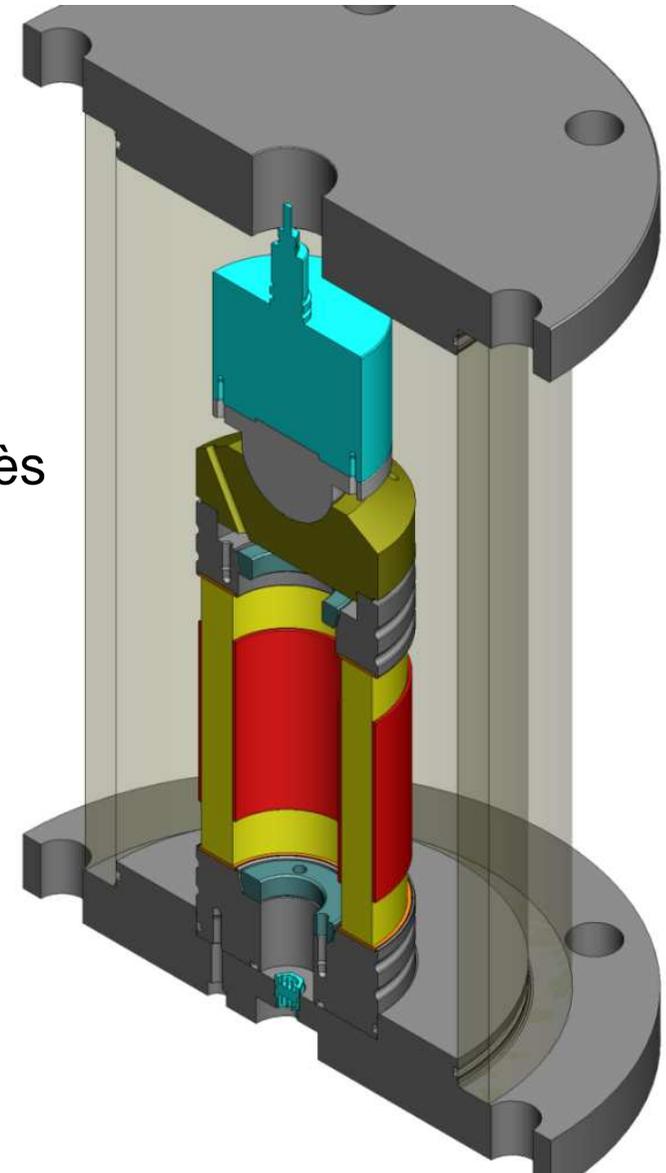


Drainage radial

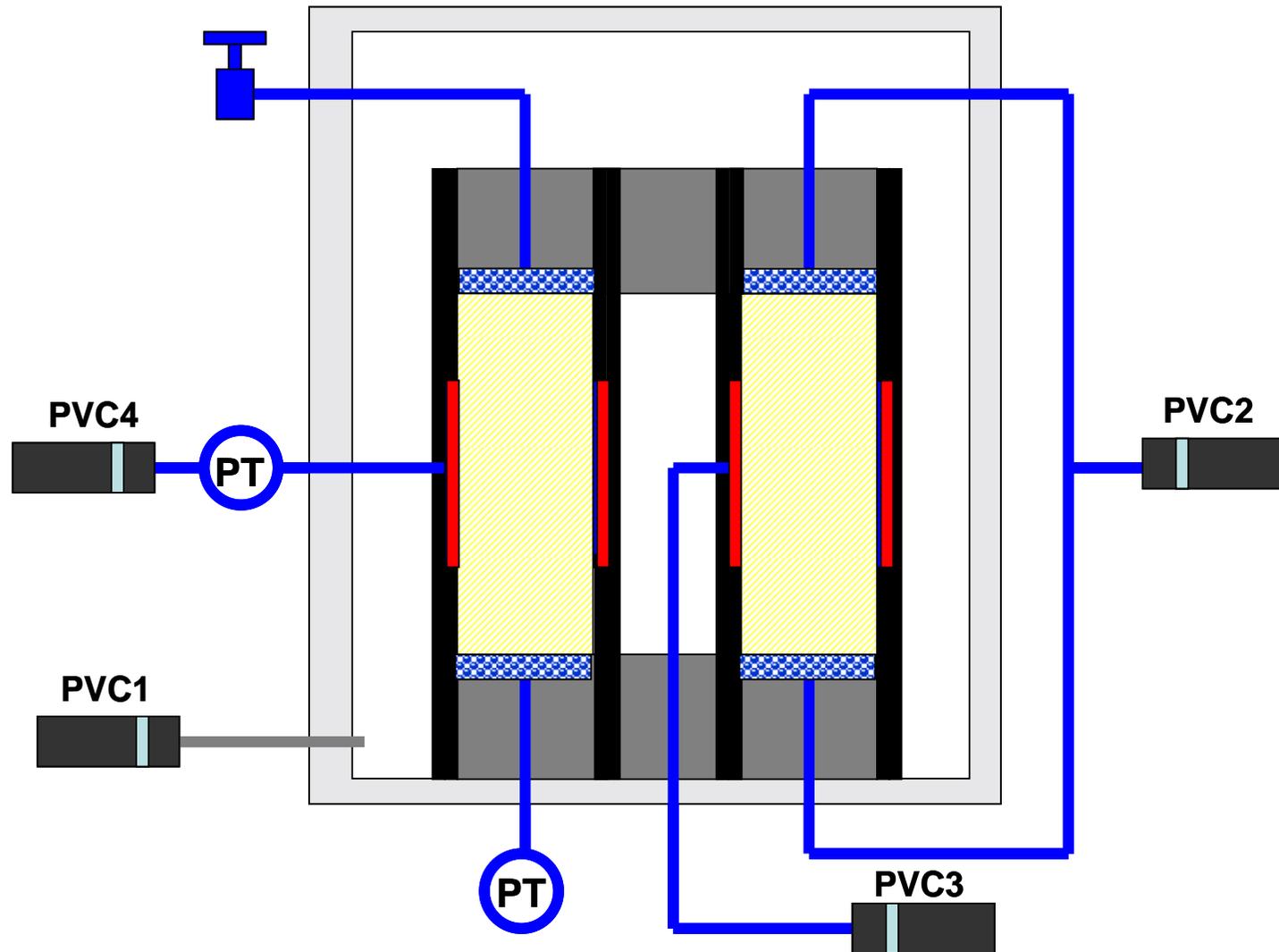
# Nouvelle cellule triaxiale à cylindre creux

Diamètre: 60 mm / 100 mm, Hauteur: 80 mm

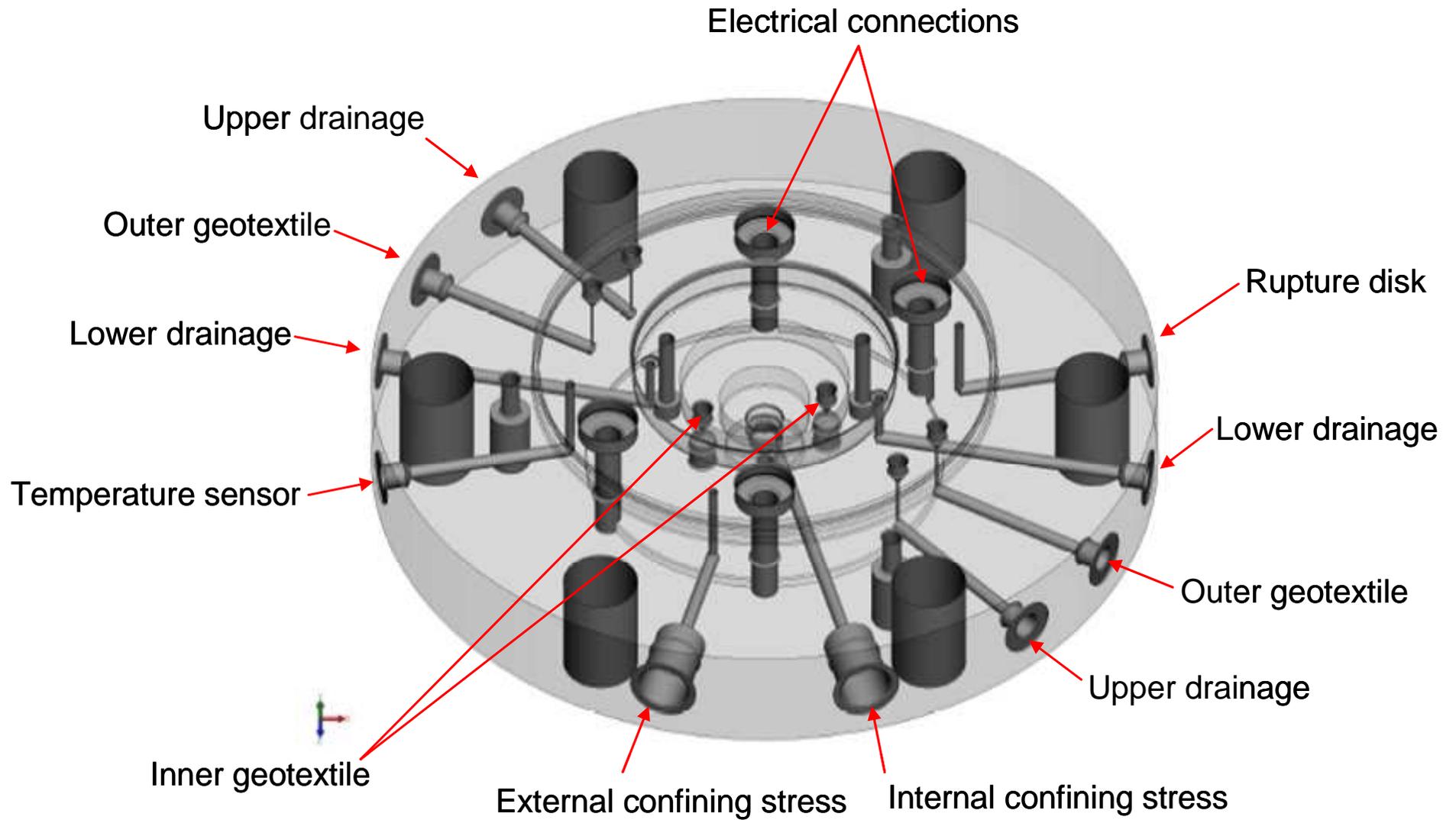
- Chemin de drainage court : 10 mm
- Capteur de force immergé
- Mesure des déformations locales
- Mesure de la perméabilité radiale avant et après cisaillement (couplage endommagement-perméabilité)
- Contrôle de la température (20 - 80°C):  
Couplage endommagement- température -  
perméabilité

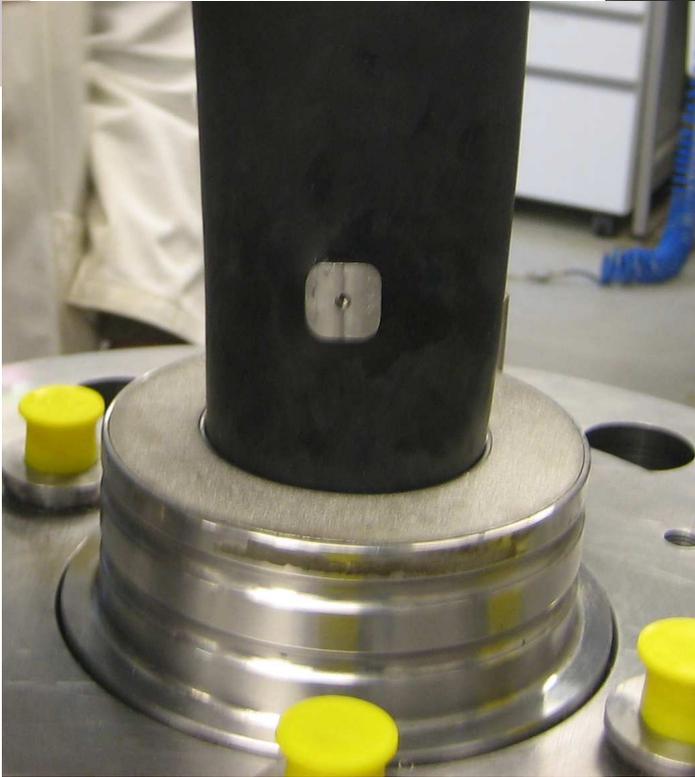
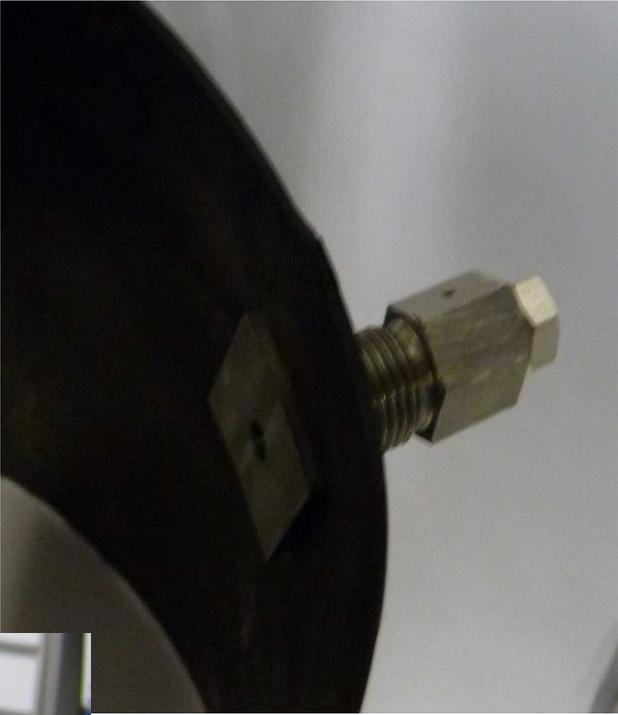


# Drainages additionnels

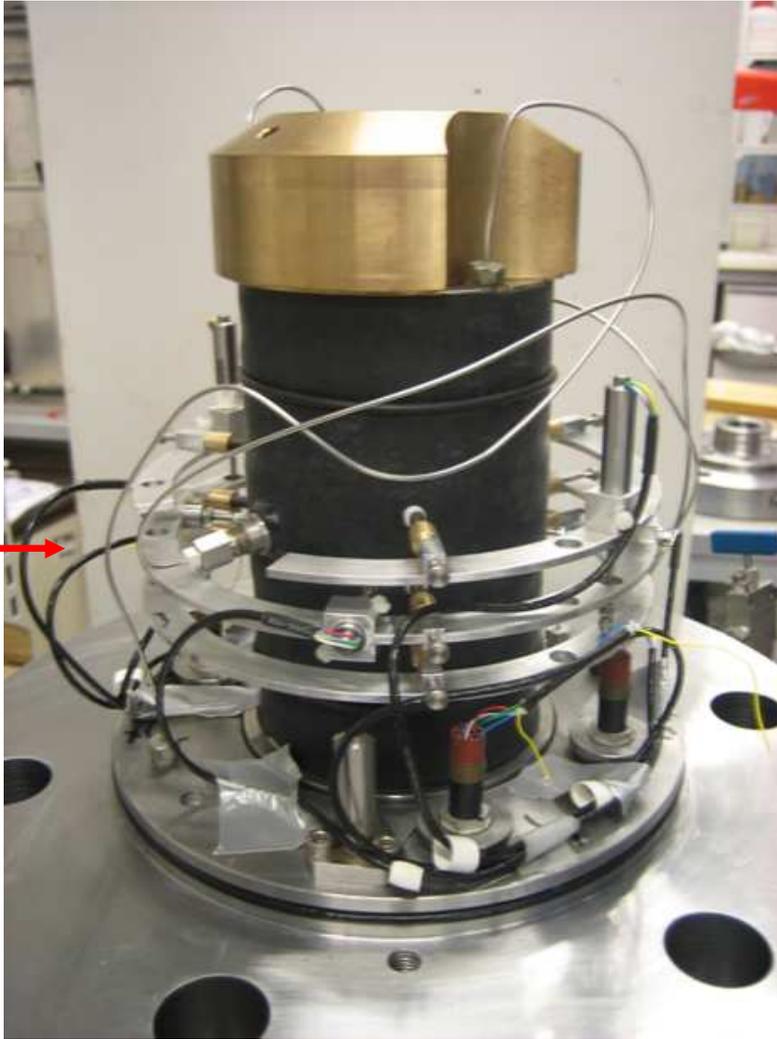
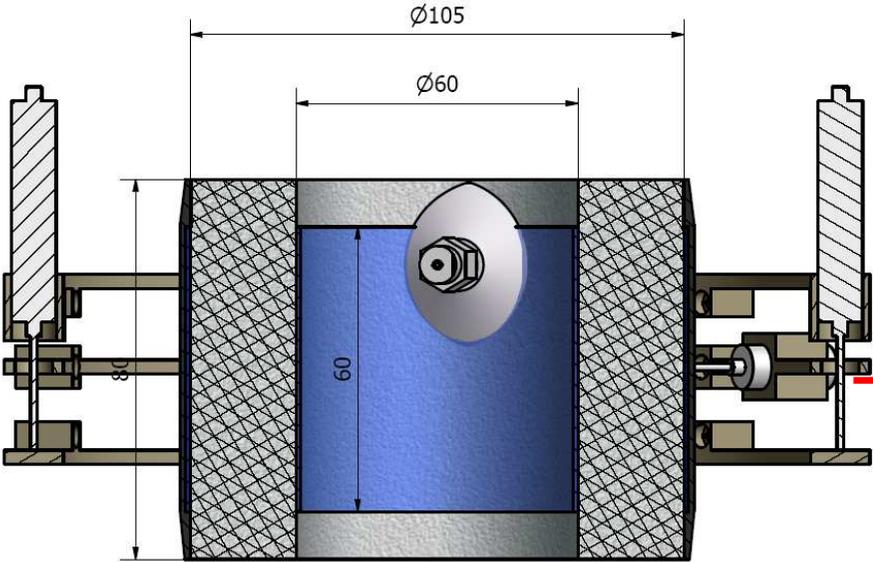


# Embase inférieure de la cellule





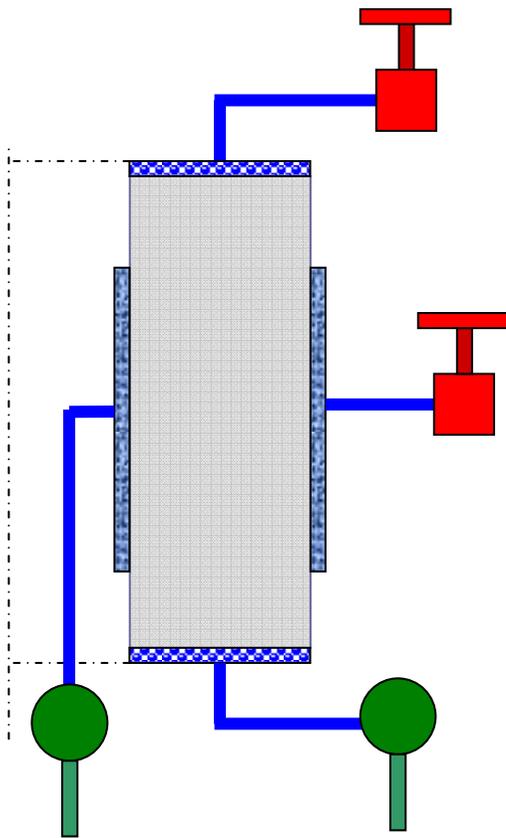
# Systeme de mesure locale des deformations



# Essai non drainé et prise en compte de la déformabilité du système de drainage

Essai non drainé: Masse de fluide **constante** dans l'échantillon

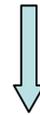
En pratique cette condition est **impossible** à réaliser



*Sollicitations thermiques et/ou mécaniques*



*Déformation du système de drainage  
(conduits hydrauliques, pierres poreuses,  
géotextiles, capteurs de pression)*



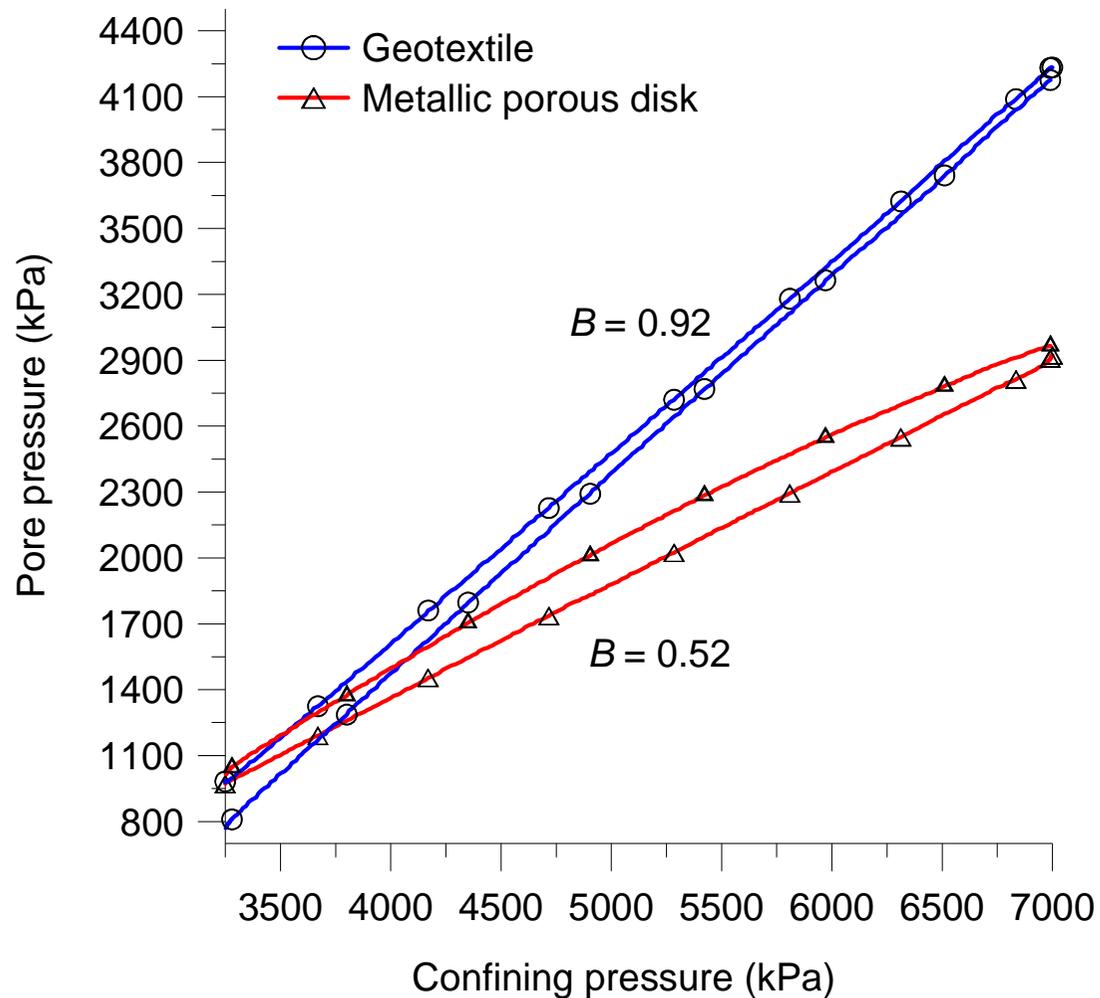
*Echanges de fluide entre le système de  
drainage et l'échantillon*

# Déformabilité du système de drainage

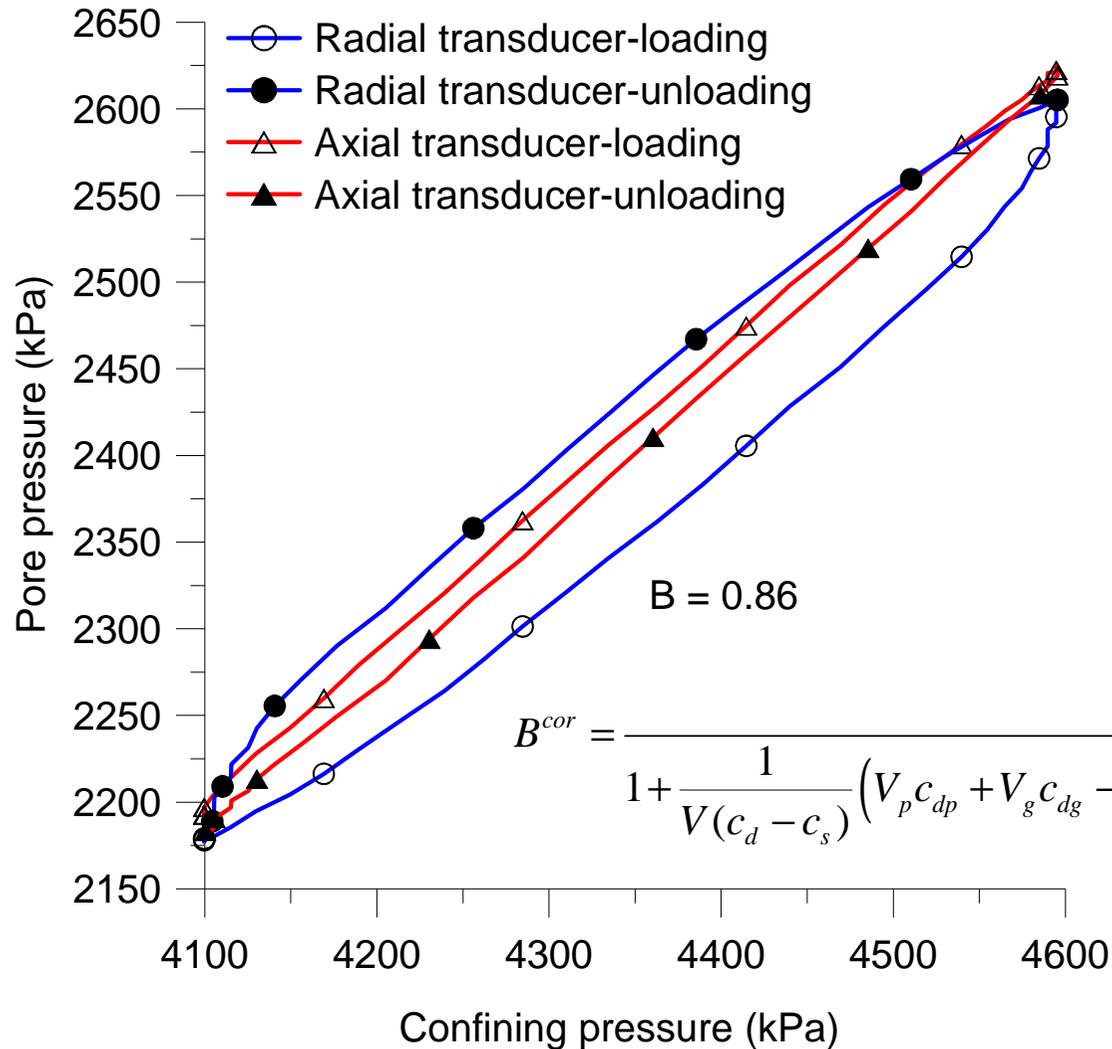
Effets du chargement mécanique (Bishop, 1976)

Effets de la température (Ghabezloo & Sulem, 2009)

## déformabilité de la pierre poreuse et de la géotextile



Exemple: Essai de compression isotrope non drainée sur un échantillon d'argile à Opalinus (Mont Terri, Suisse)

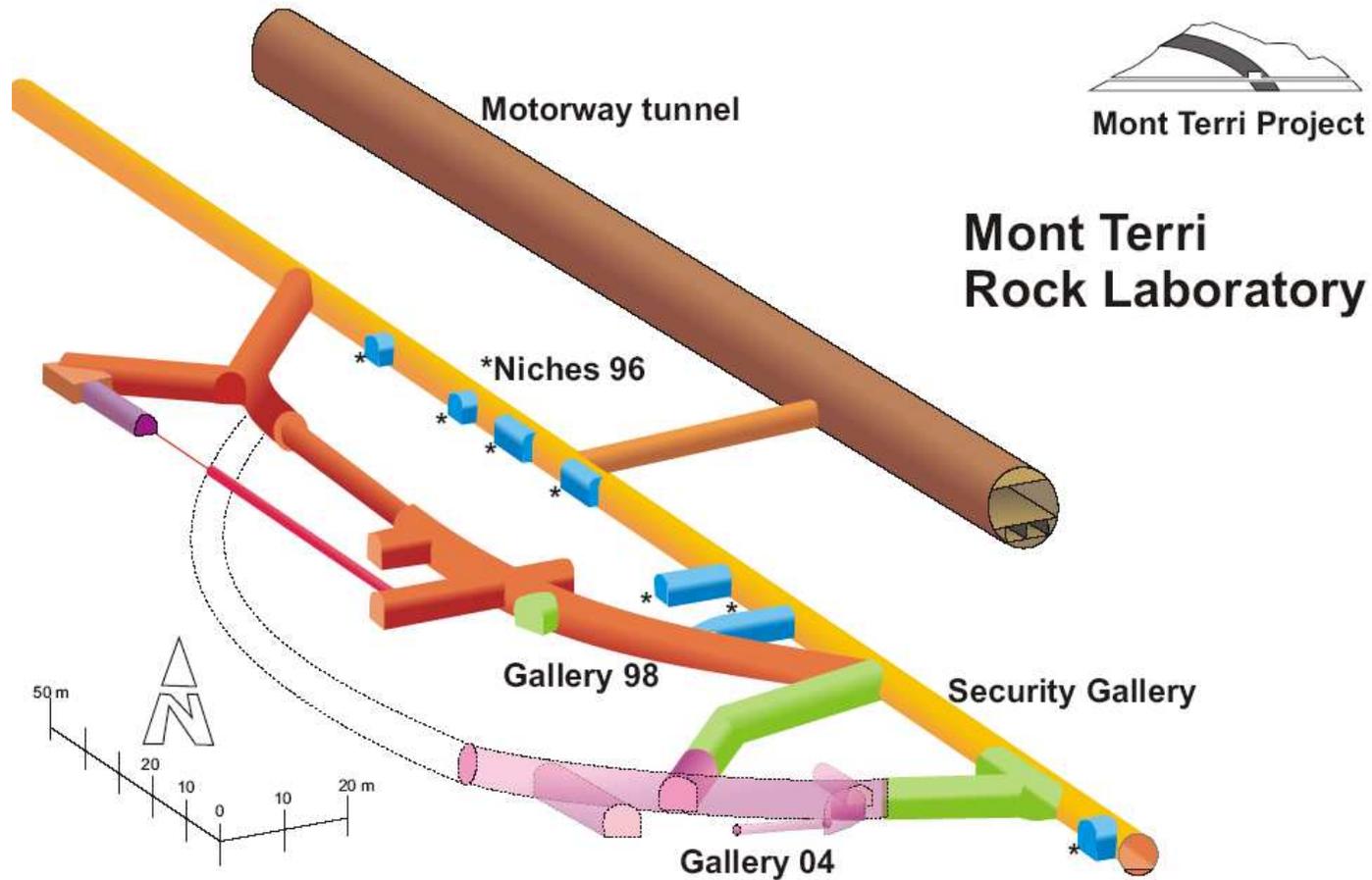


Coefficient de Skempton corrigé:

$$B = 0.89$$

$$B^{cor} = \frac{B^{mes}}{1 + \frac{1}{V(c_d - c_s)} (V_p c_{dp} + V_g c_{dg} - B^{mes} (V_p (c_{dp} + \phi_p c_w) + V_g c_{dg} + V_L (c_w + c_L)))}$$

# Application du nouveau dispositif à l'étude du comportement de l'argile à Opalinus

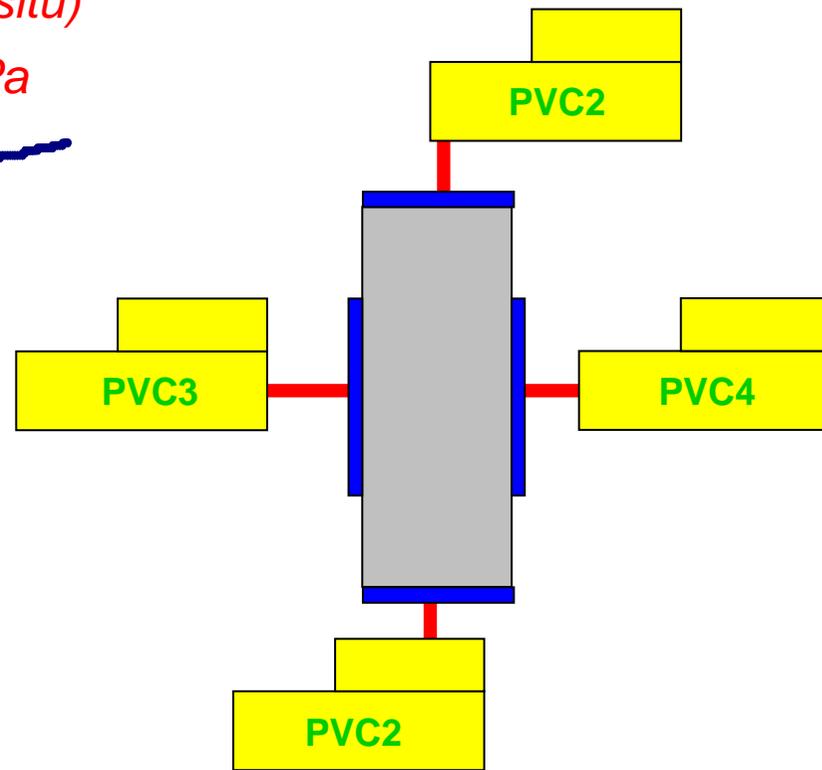
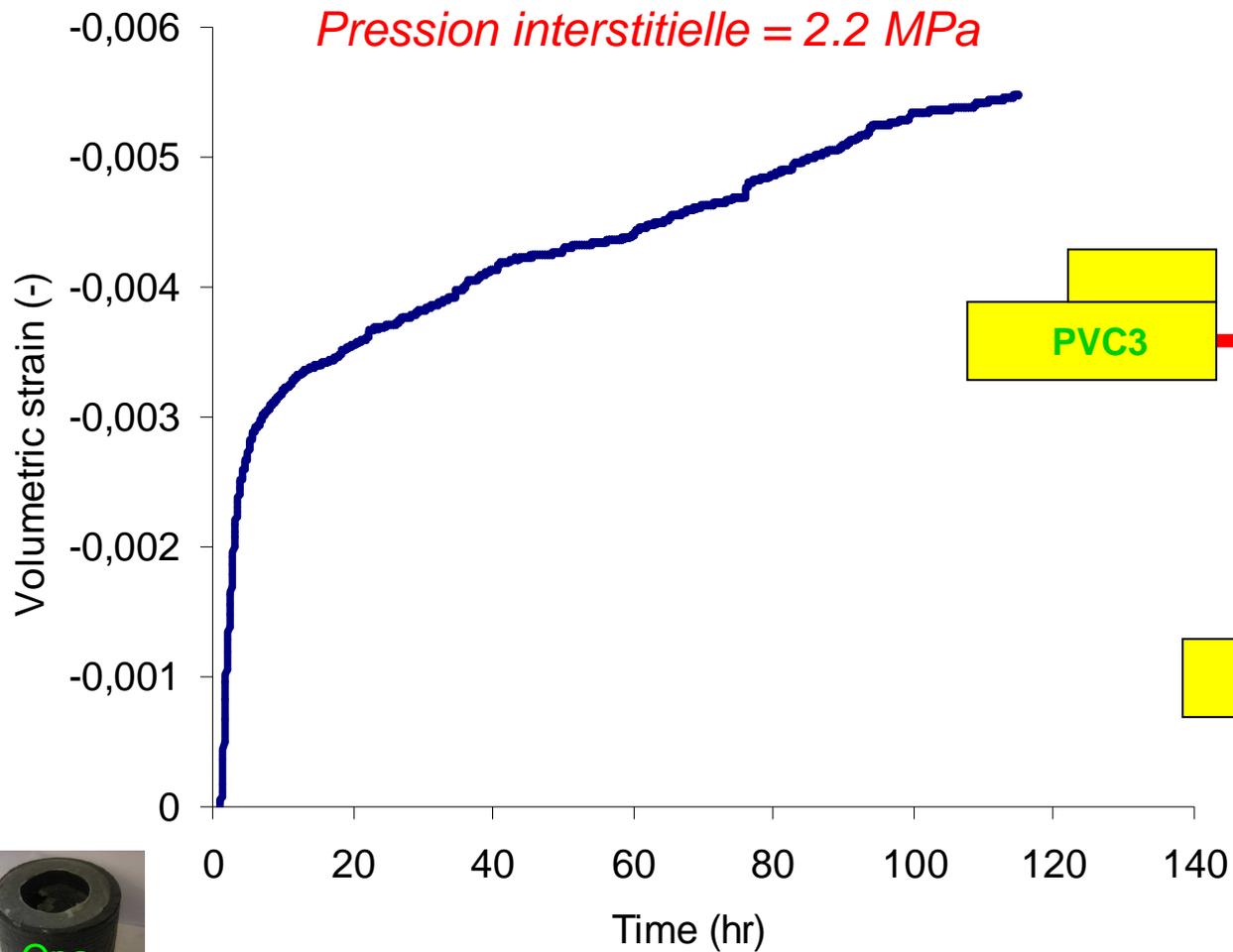


Bossart & Thury 2007

# Re-saturation dans la cellule triaxiale

*Contrainte de confinement = 4.1 MPa  
(contrainte moyenne totale in-situ)*

*Pression interstitielle = 2.2 MPa*



# Modélisation de la saturation de l'échantillon: Infiltration

zones saturées

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k_s}{\mu_f S} \nabla^2 u$$

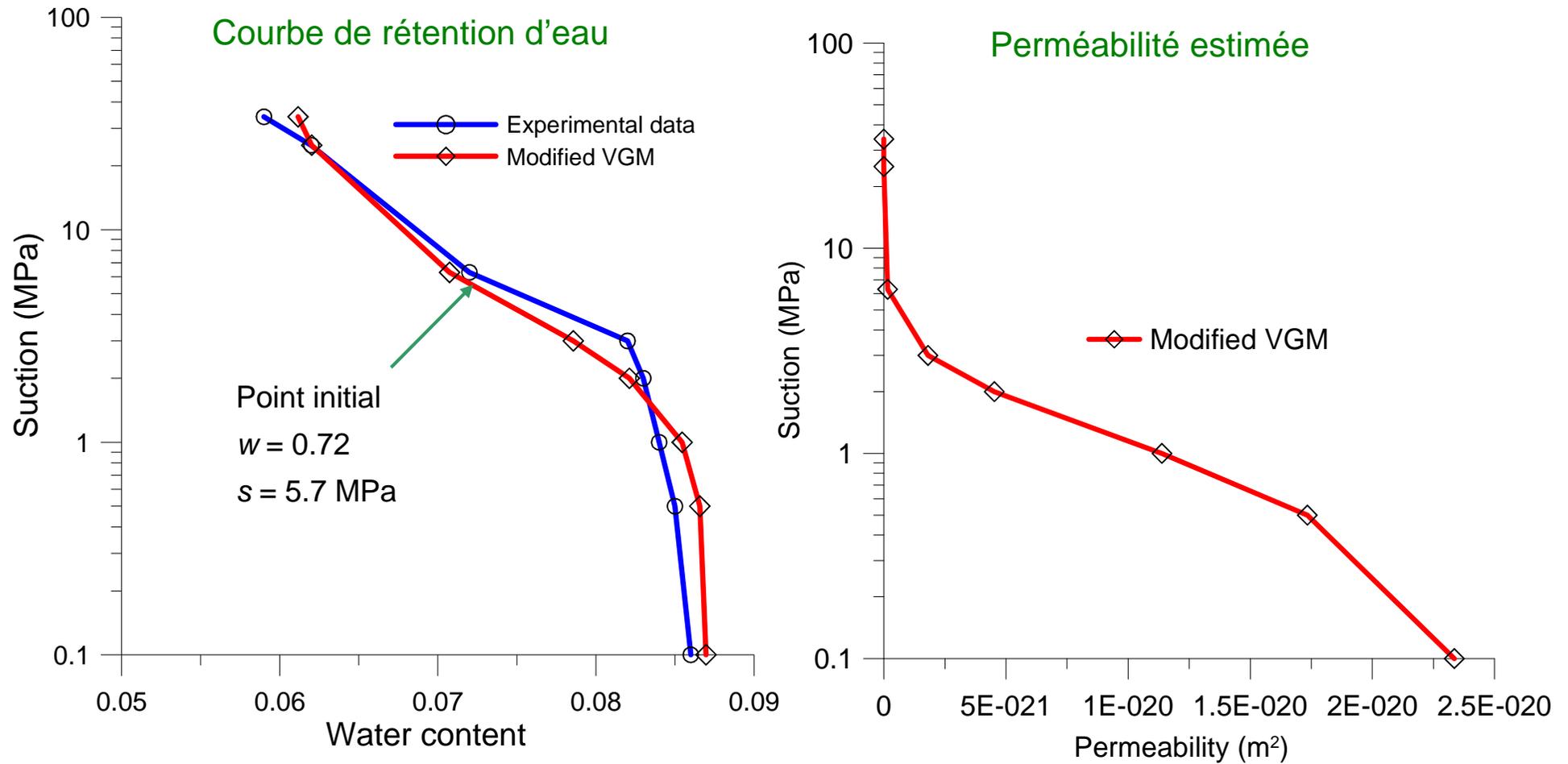
$k_s$  perméabilité du milieu saturé

• zones non saturées

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{(1-\phi)\gamma_s} \frac{\partial w}{\partial u} \nabla^2 (k_{ns} u)$$

$k_{ns}$  perméabilité du milieu non saturé

# Caractéristiques non saturées



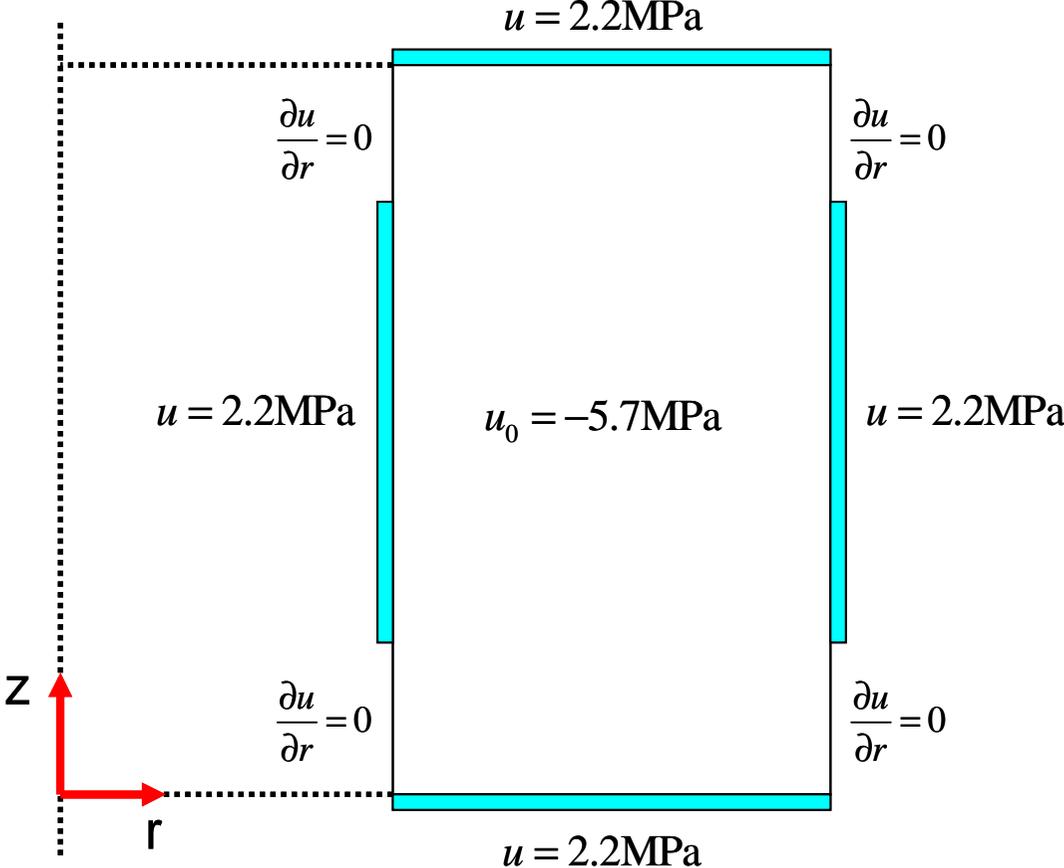
Van Genuchten modifié

$$P = 3 \text{ MPa}, P_s = 700 \text{ MPa}, \lambda = 0.5, \lambda_s = 2.73, w_r = 0.059, w_s = 0.087, k_s = 2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$$

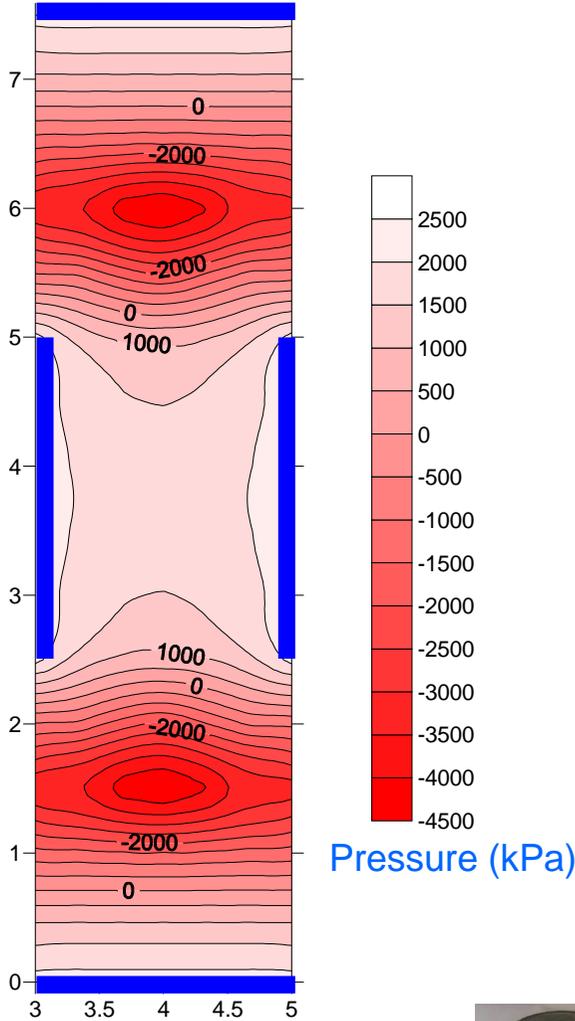
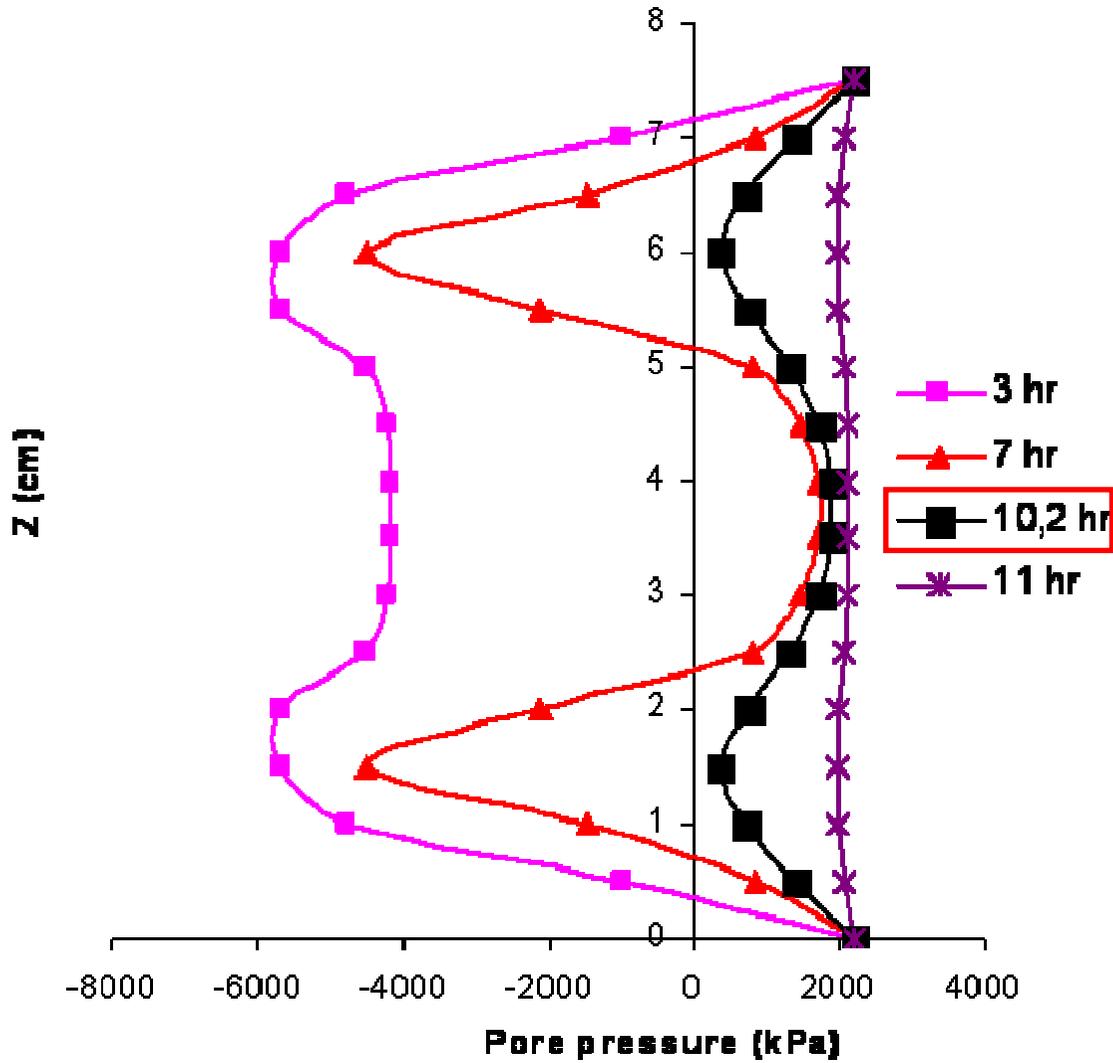
(Munoz, 2007)



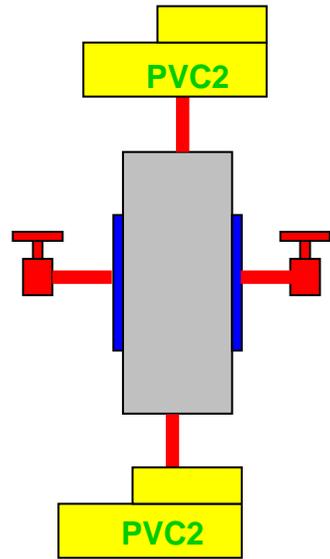
# Conditions aux limites et initiales



Résultats pour t=7 hr

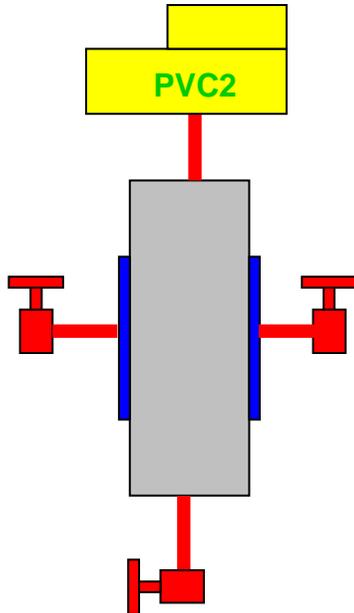
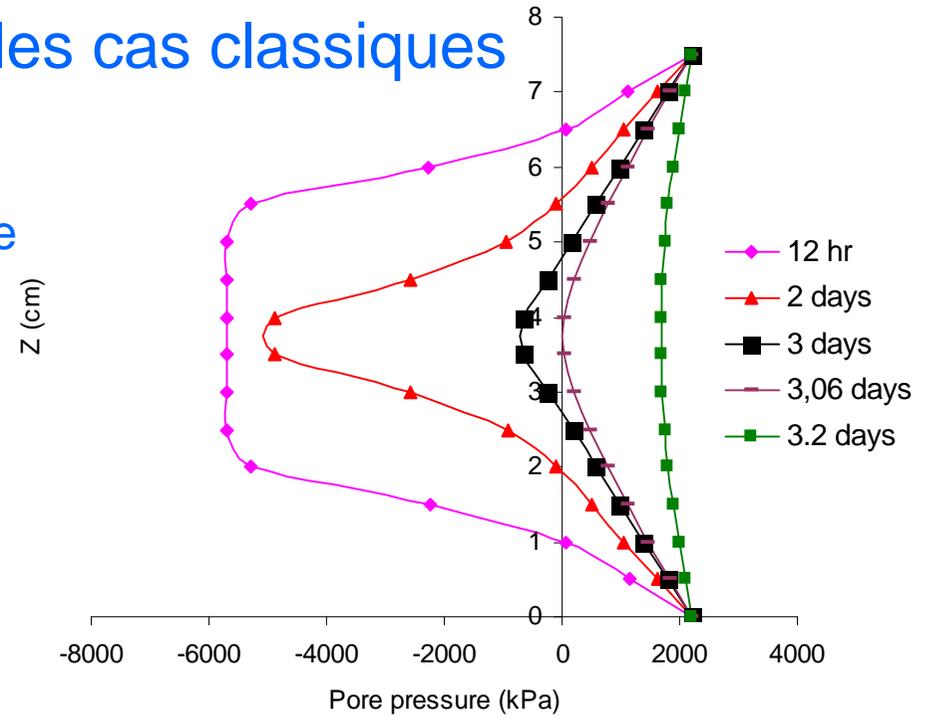


# Comparaisons avec les cas classiques



Double drainage

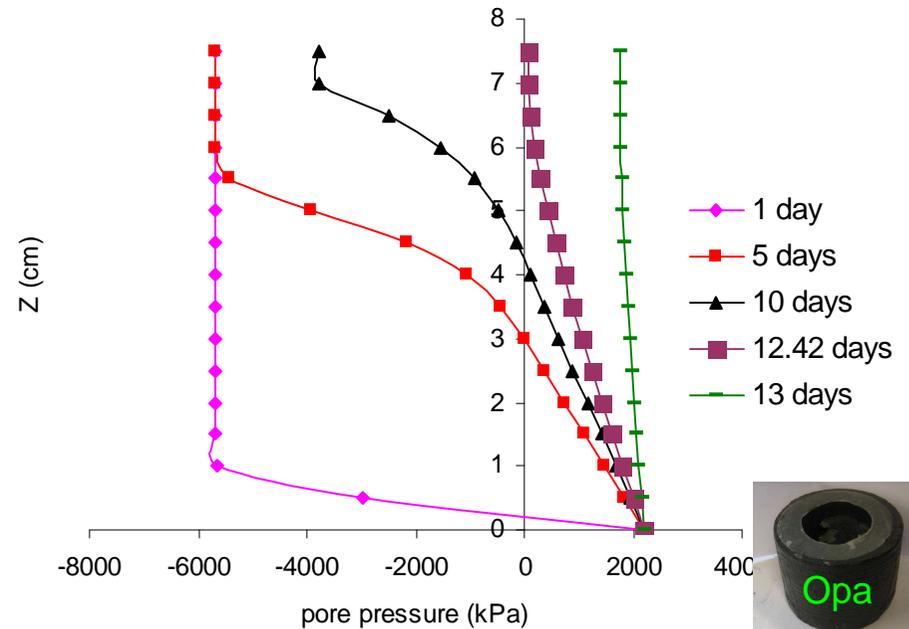
$$\frac{T_{s2}}{T_{s4}} = 7.2$$



Simple drainage

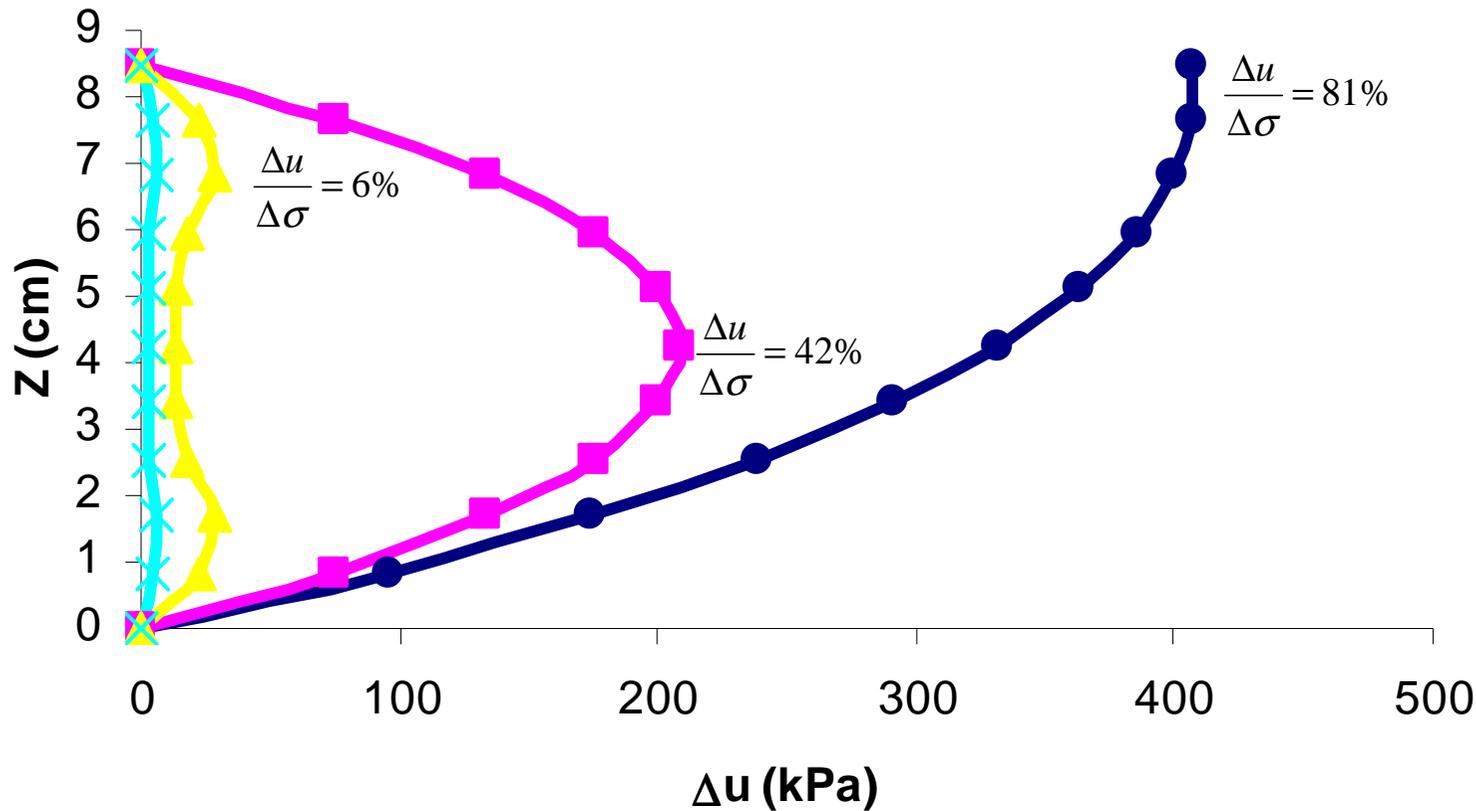
$$\frac{T_{s1}}{T_{s4}} = 29.2$$

$$\frac{T_{s1}}{T_{s2}} = 4.1$$

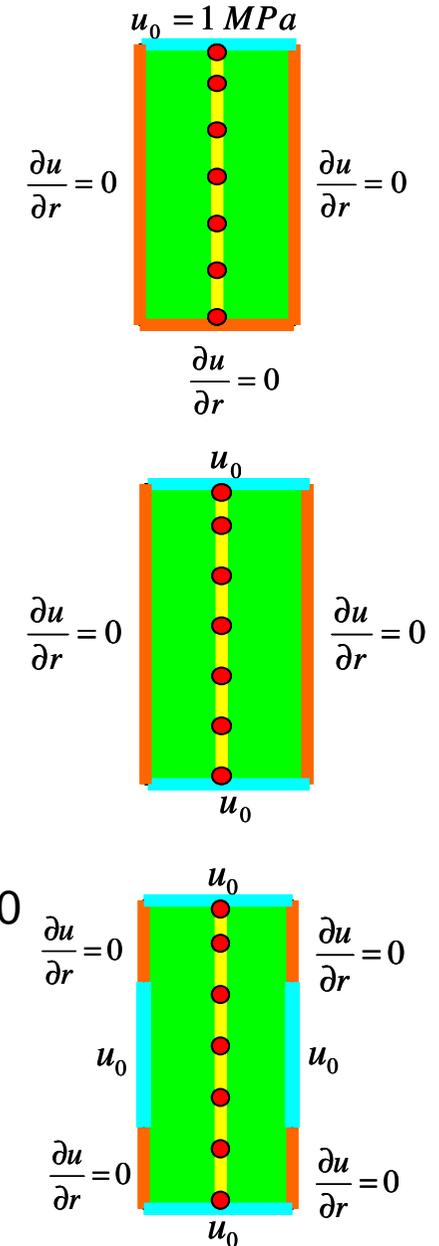


# Vitesse des essais drainées- Chargement mécanique

$$\frac{du}{dt} = B \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{k}{\mu_f S} \nabla^2 u \quad \Delta \sigma = 500 \text{ kPa}$$

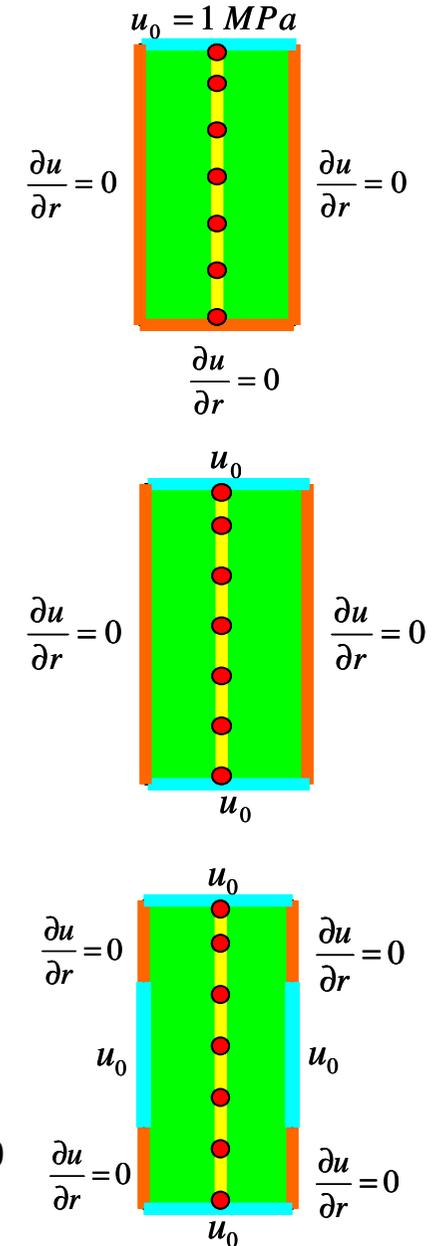
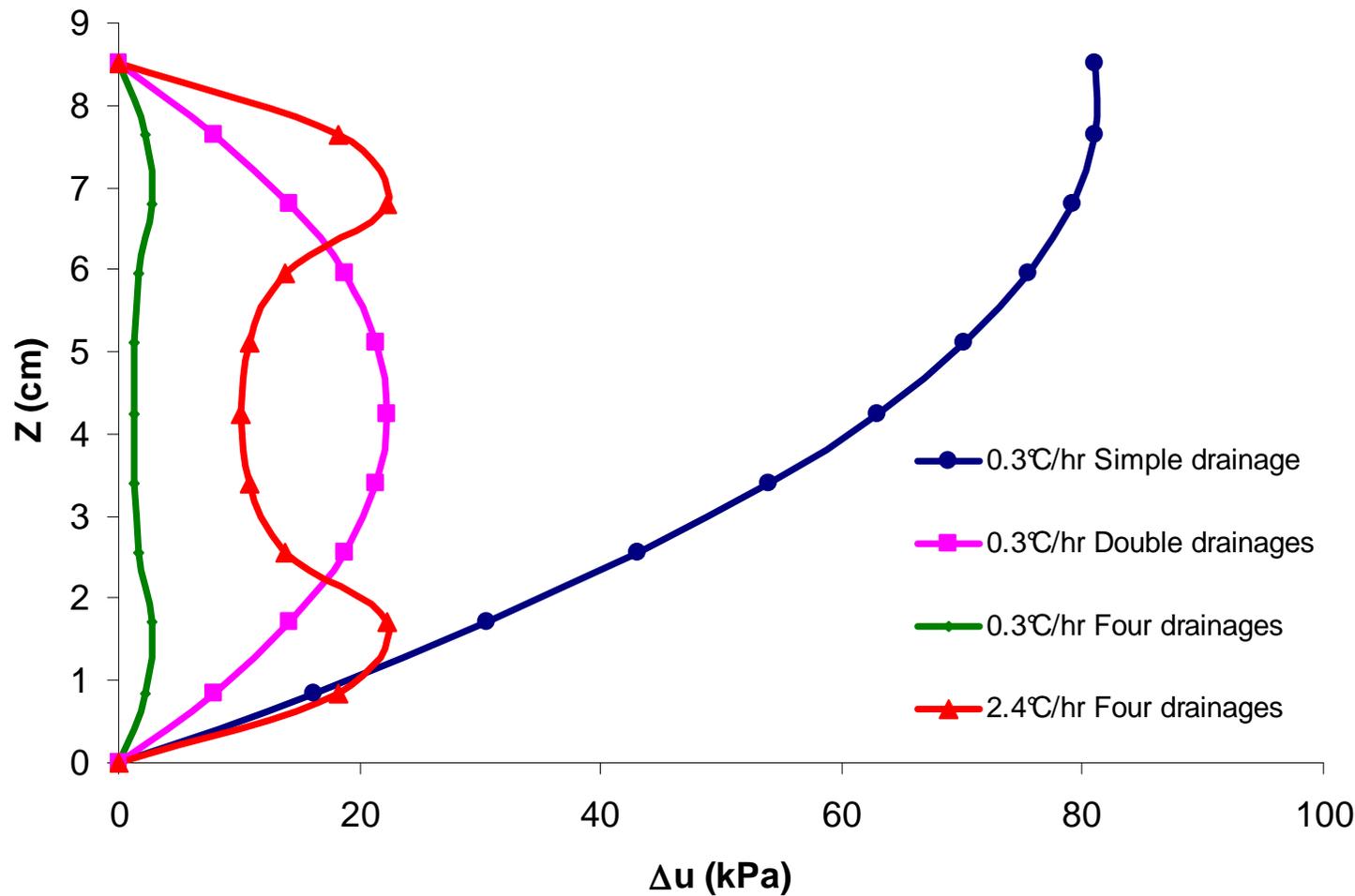


- Simple drainage 0.5 kPa/min
- ▲ Four drainages 0.5 kPa/min
- Double drainages 0.5 kPa/min
- × Four drainages 0.1 kPa/min

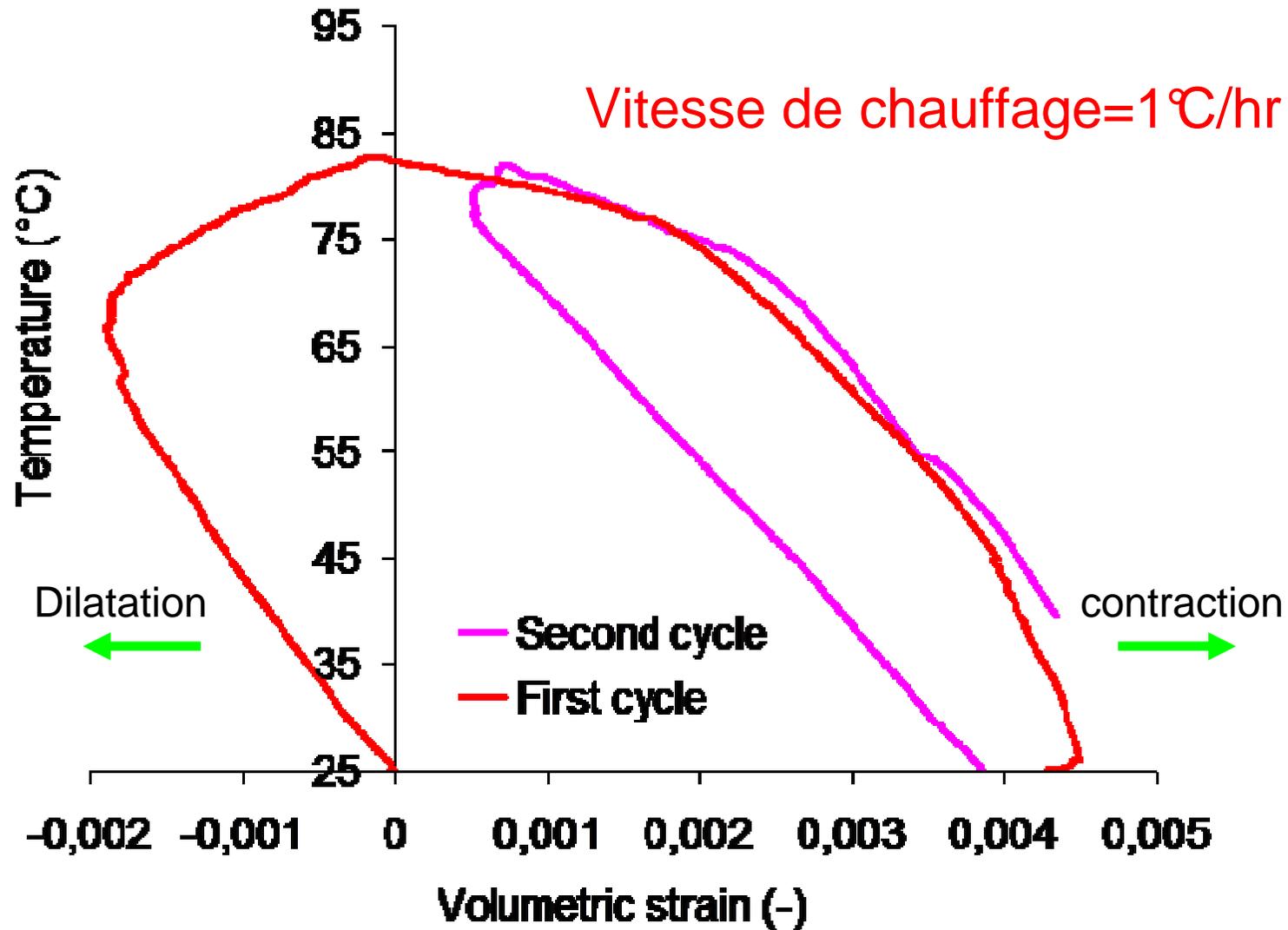


# Vitesse des essais drainées- Chargement thermique

$$\frac{du}{dt} = \Lambda \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{k}{\mu_f S} \nabla^2 u \quad \Delta T = 55^\circ\text{C}$$



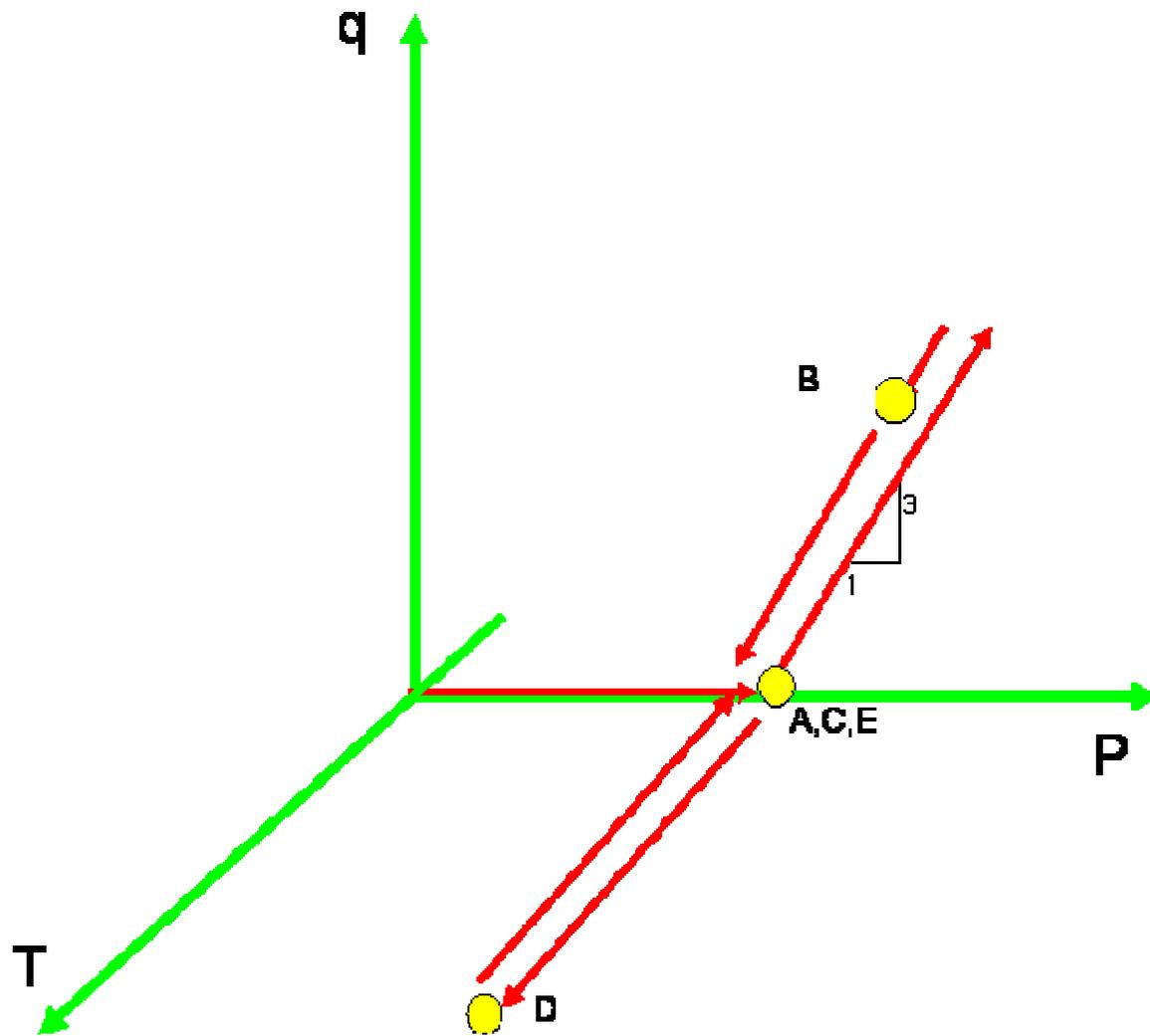
# Essai de chauffage drainé-Argile à Opalinus



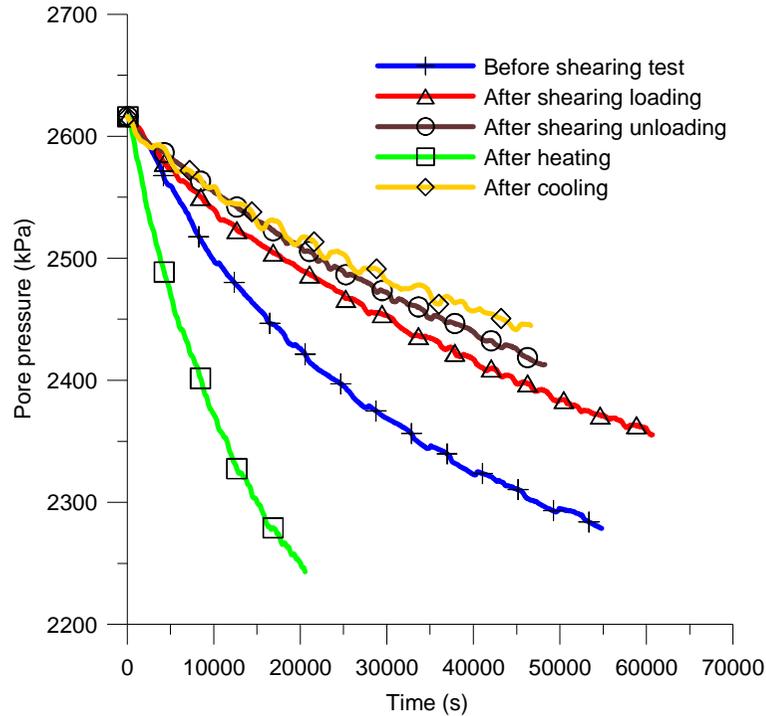
$$\alpha_V = -6.4 \times 10^{-5} / ^\circ C$$



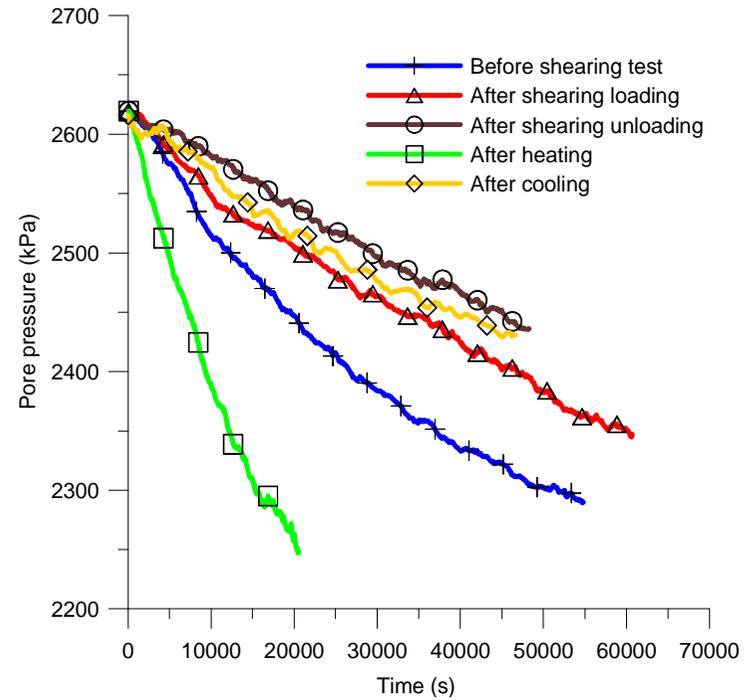
# Chemin de chargement



# Synthèse



Capteur de pression axial

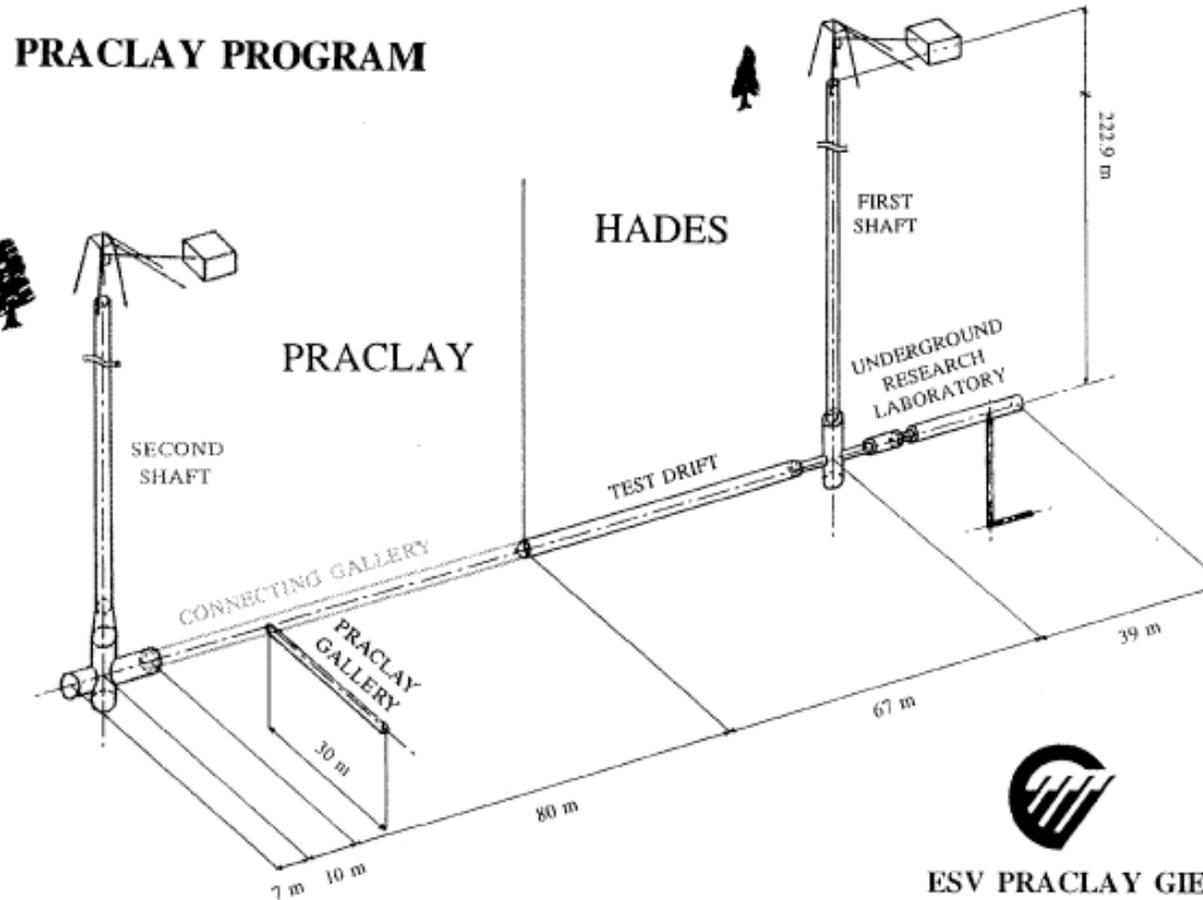


Capteur de pression Radial

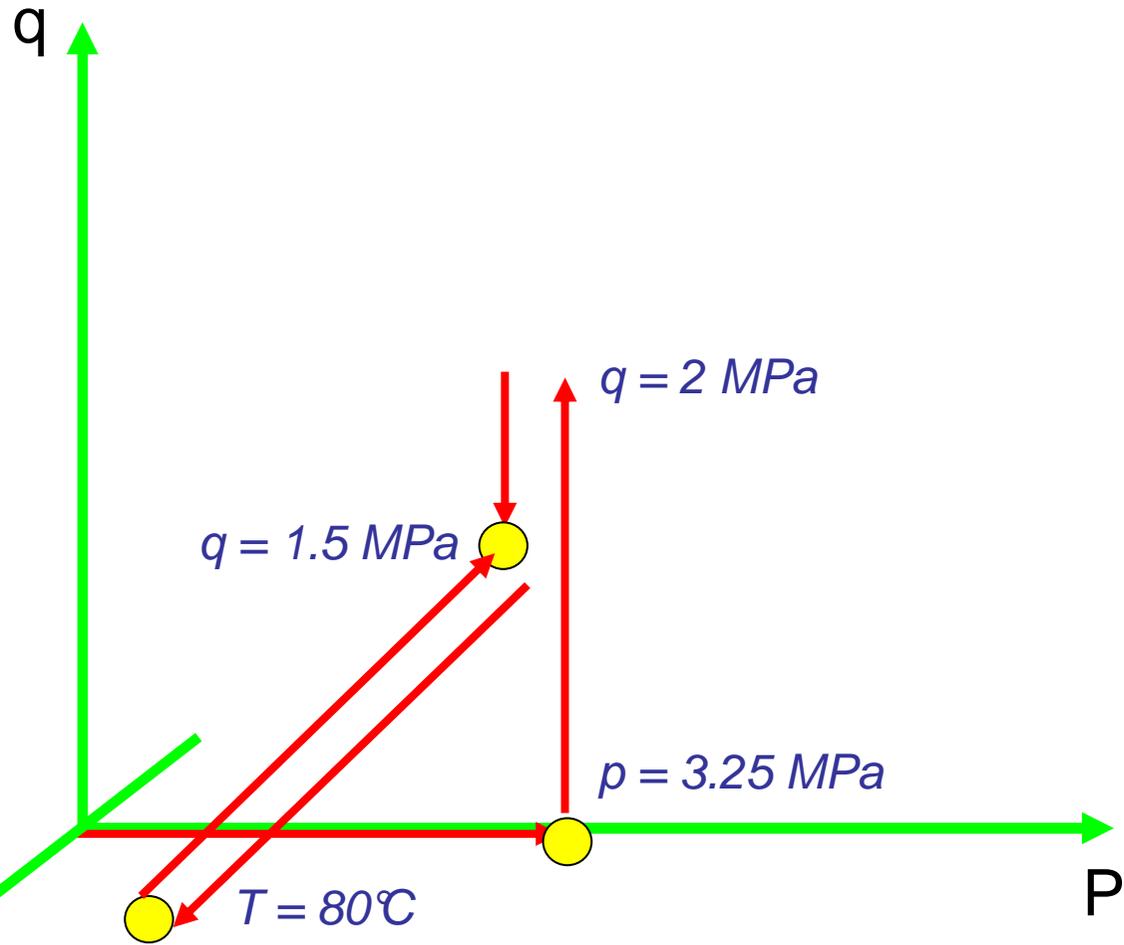
Perméabilité	$k_r (m^2)$	$k_z (m^2)$	$k_z/k_r$
Avant cisaillement (A)	$3.1 \times 10^{-20}$	$3.6 \times 10^{-19}$	11.6
Après cisaillement (B)	$1.8 \times 10^{-20}$	$1.8 \times 10^{-19}$	10
Retour à déviateur nul (C)	$1.3 \times 10^{-20}$	$1.8 \times 10^{-19}$	13.8
A 80°C (D)	$3.9 \times 10^{-20}$	$7.1 \times 10^{-19}$	18.2
Retour à 25°C (E)	$1.5 \times 10^{-20}$	$2.0 \times 10^{-19}$	13.3



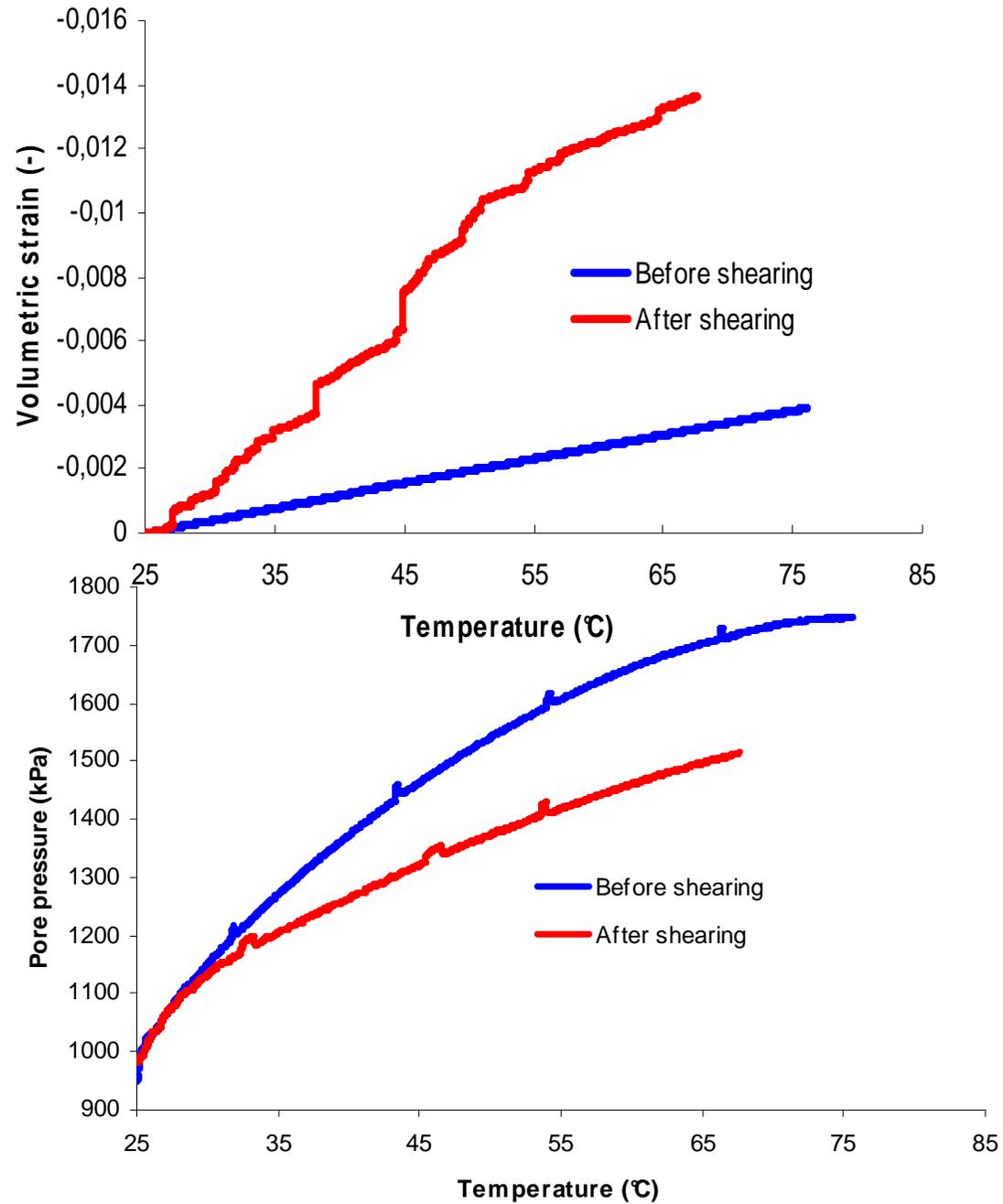
# Application du nouveau dispositif à l'étude du comportement de l'argile de Boom



# Chemin de chargement



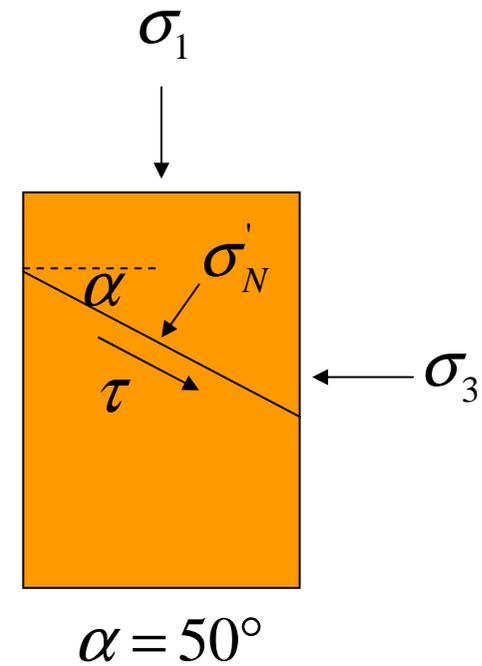
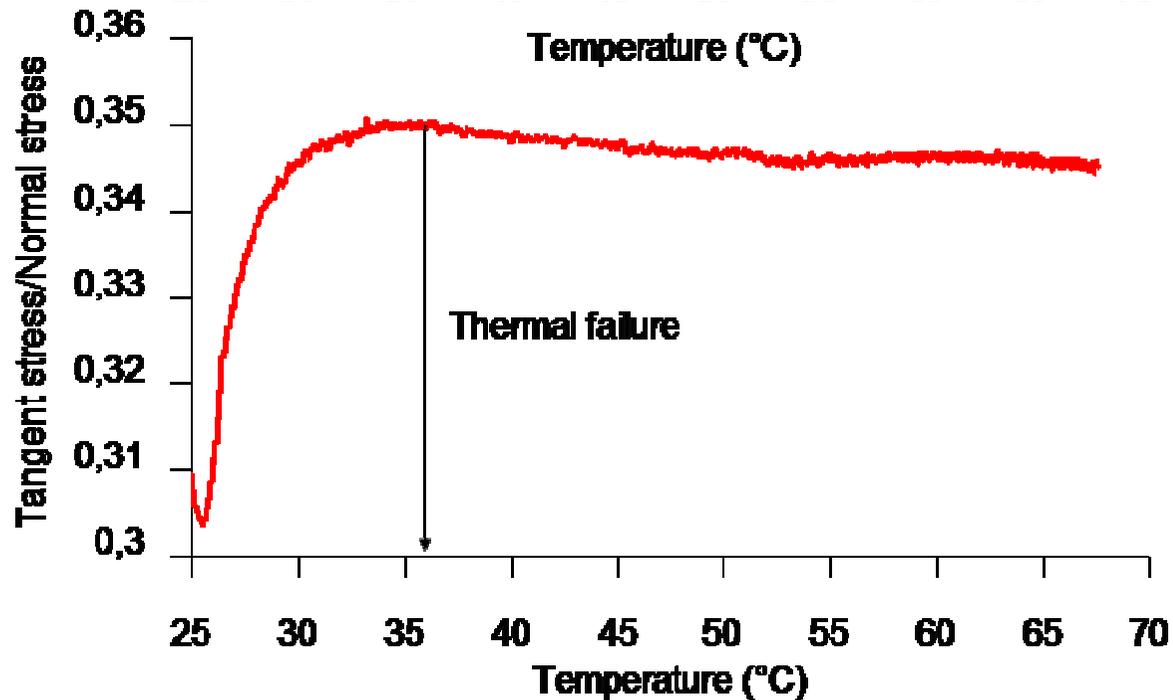
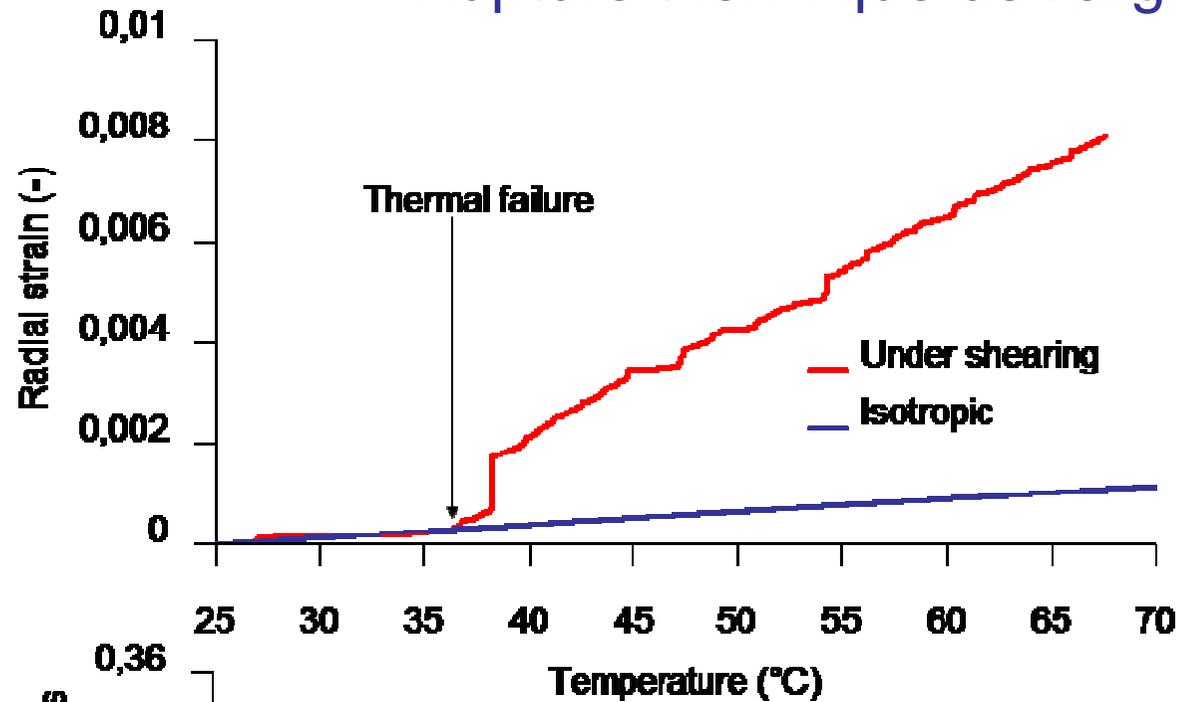
# Pressurisation thermique en conditions non drainées



# L'échantillon cisailé



# Rupture thermique de l'argile de Boom



## Conclusion

- Mise au point d'un nouveau dispositif triaxial à faible longueur de drainage pour l'étude du comportement des matériaux de très faible perméabilité
- Efficacité et contrôle de la saturation des échantillons
- Efficacité et contrôle du drainage des échantillons
- Résultats d'études expérimentales sur deux argiles (Opalinus & Boom)

Comportement volumique thermique

Effet de scellement des fissures

Rupture thermique en condition non drainée

- Autres études en cours : Argilite du Callovo-Oxfordien, Thèse de M. Mohajerani (ANDRA)