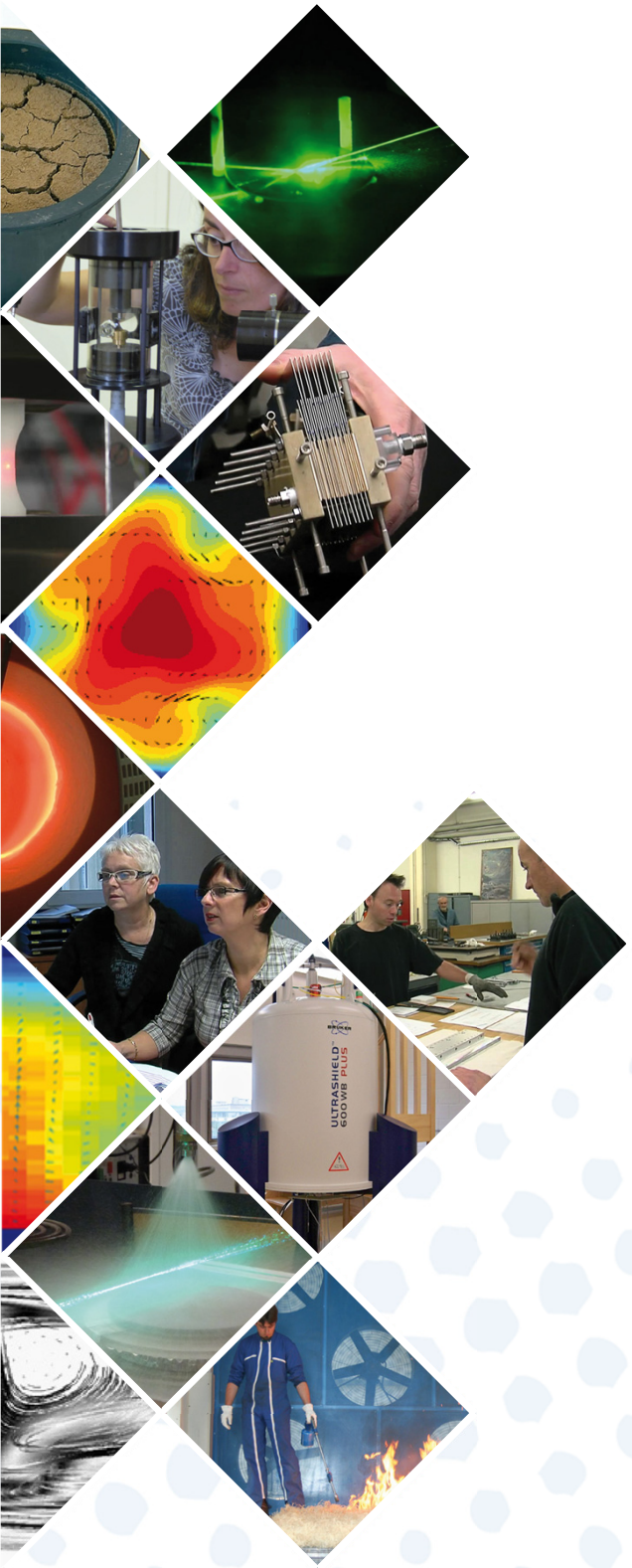


LABORATOIRE D' ÉNERGÉTIQUE ET DE MÉCANIQUE THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

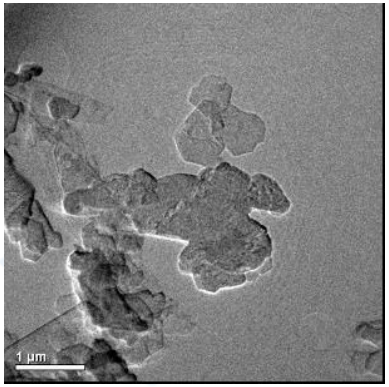
UMR 7563

Influence des conditions environnementales sur les propriétés multi-échelles d'argiles compactées

Olivier Cuisinier

L' étude du comportement THMC des sols, une problématique multi-échelles

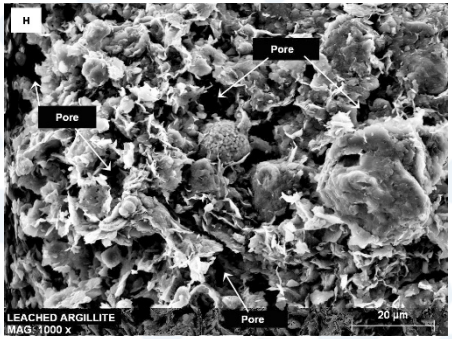
Minéraux du sol, eau



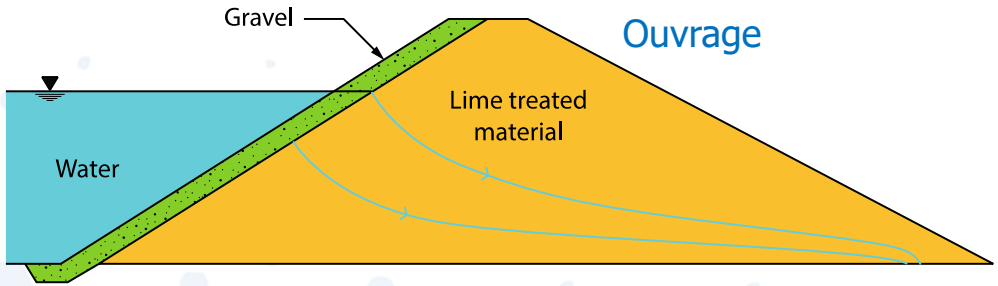
Laboratoire

nm	µm	mm	cm	m	dam
10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-3}	1	10

Assemblages de particules



Ouvrage



Démarche

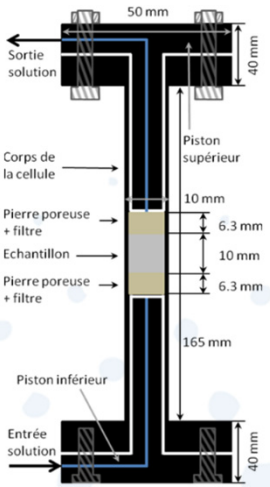
- **Constat :** des sollicitations externes, notamment liées à l'environnement, peuvent modifier les caractéristiques et le comportement d'un sol, à toutes les échelles

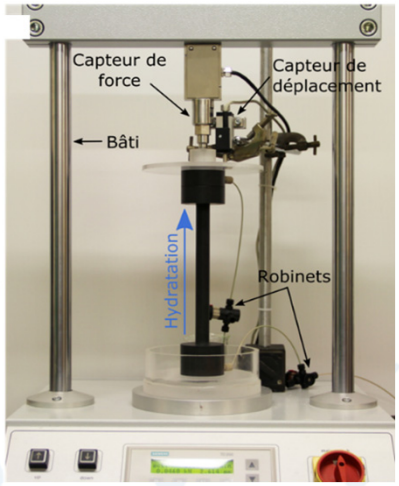
- **Problématique :** analyser, comprendre les processus couplés entre sollicitations externes et comportement THM du sol micro et macro

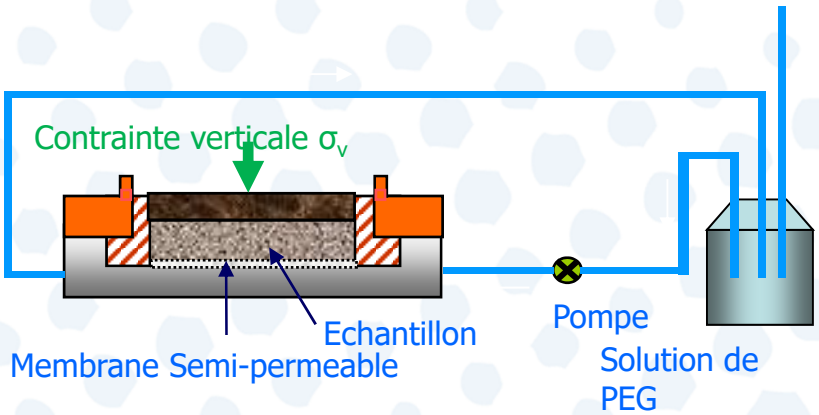
- **Objectifs**
  - Quantifier les relations, couplages entre les différents processus
  - Intégrer les différentes échelles dans l'analyse
  - Modéliser le comportement de ces matériaux
  - Prévoir le comportement des ouvrages

Approche mise en œuvre

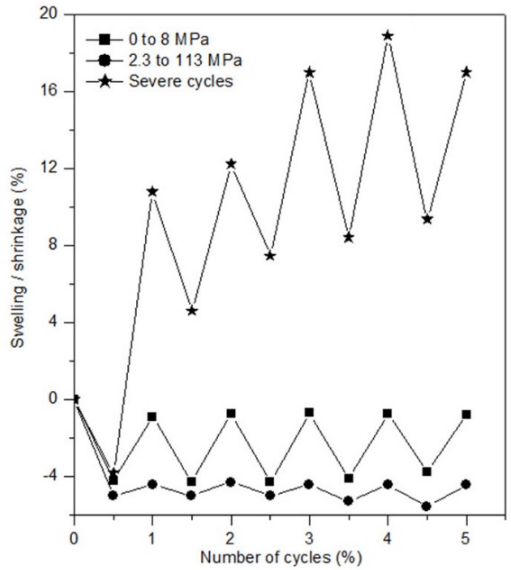
Reproduire les sollicitations

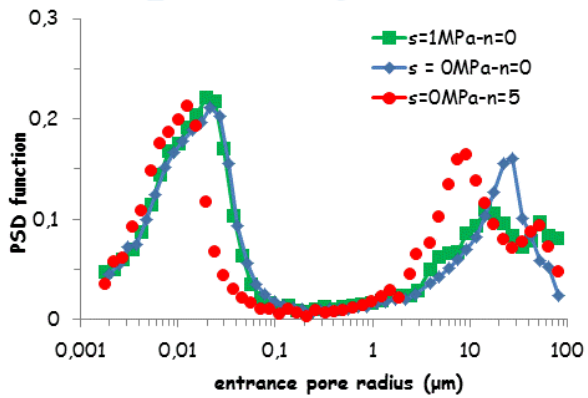




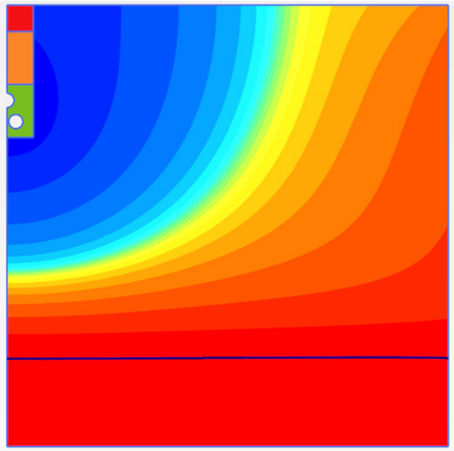


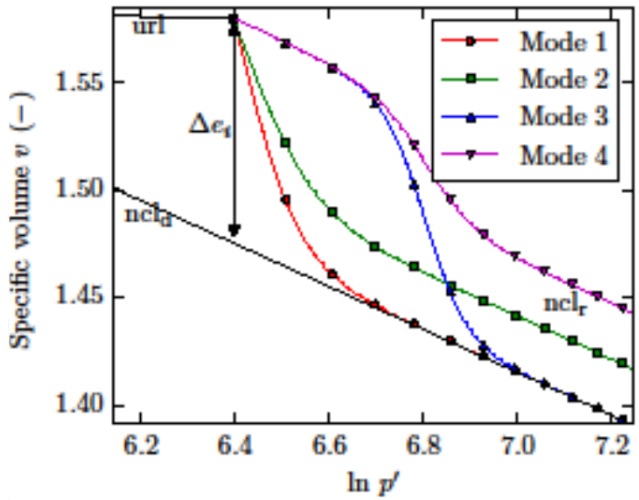
Quantifier micro/macro





Modéliser le comportement THM





Les argiles gonflantes

Elément constitutif de base → feuillet TOT avec différents charges

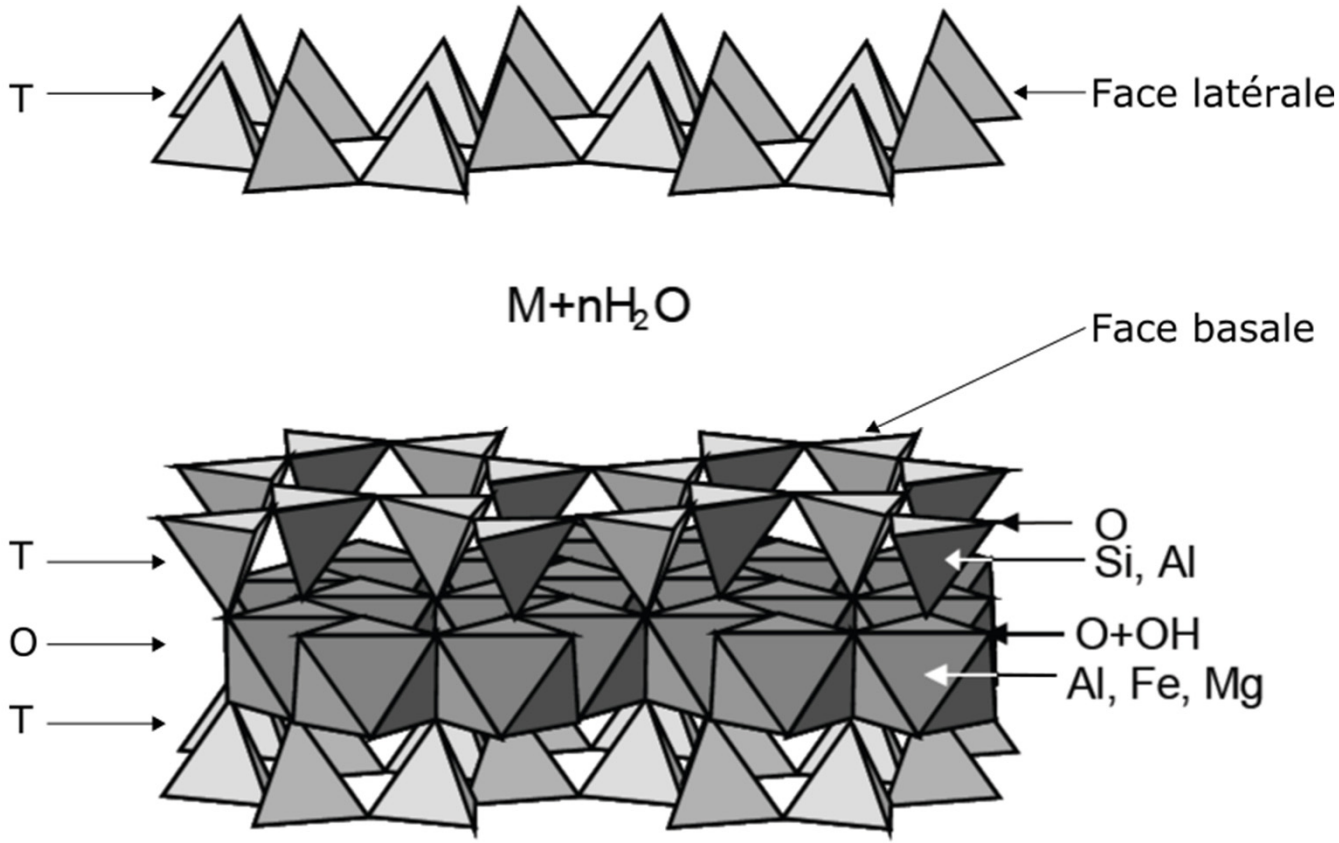
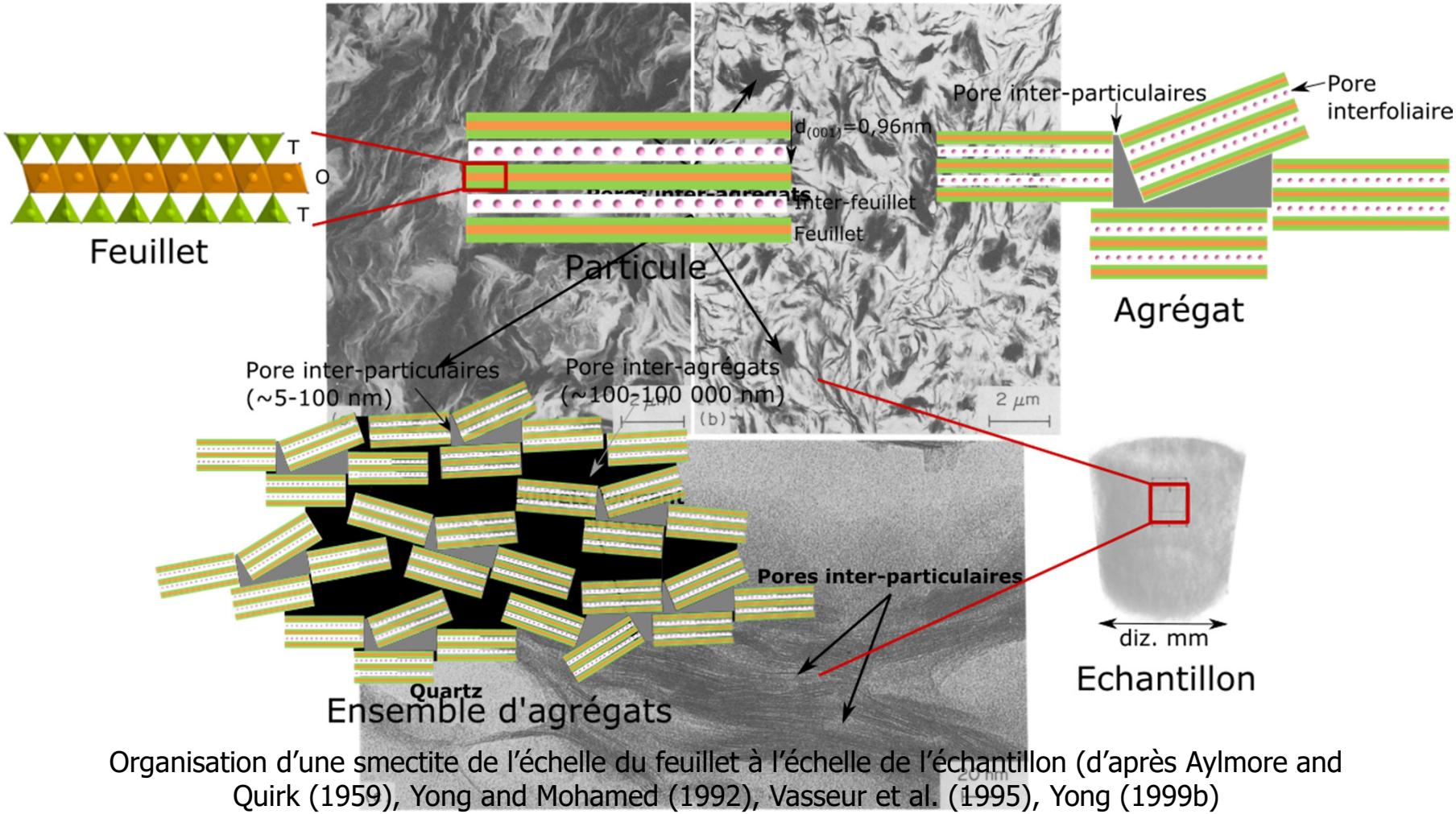


Schéma d'un feuillet de smectite (Ferrage, 2004)

Différentes échelles de porosité

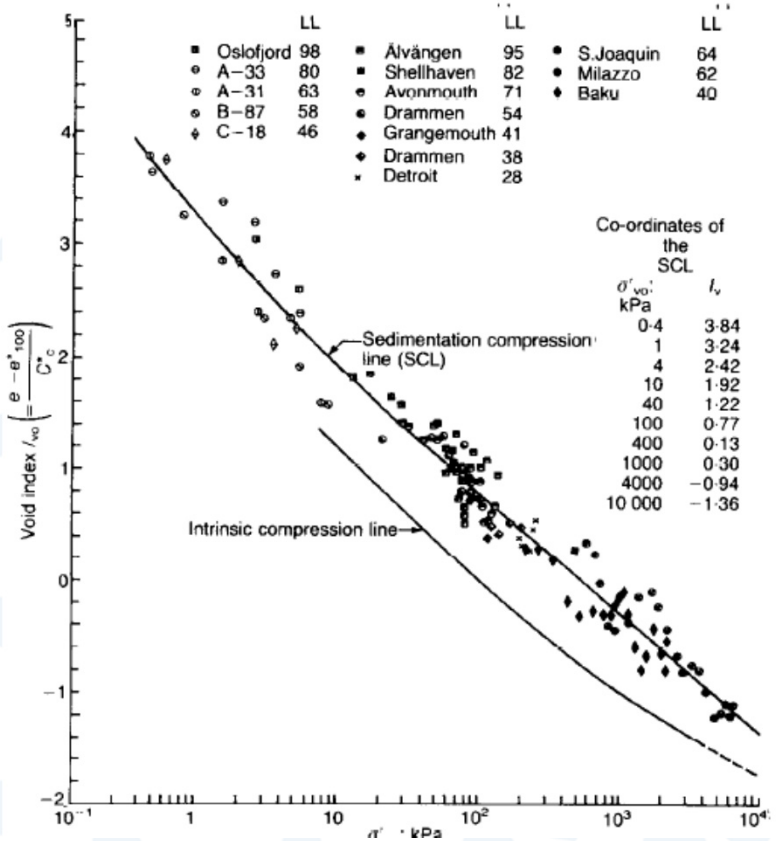


Organisation d'une smectite de l'échelle du feuillet à l'échelle de l'échantillon (d'après Aylmore and Quirk (1959), Yong and Mohamed (1992), Vasseur et al. (1995), Yong (1999b)

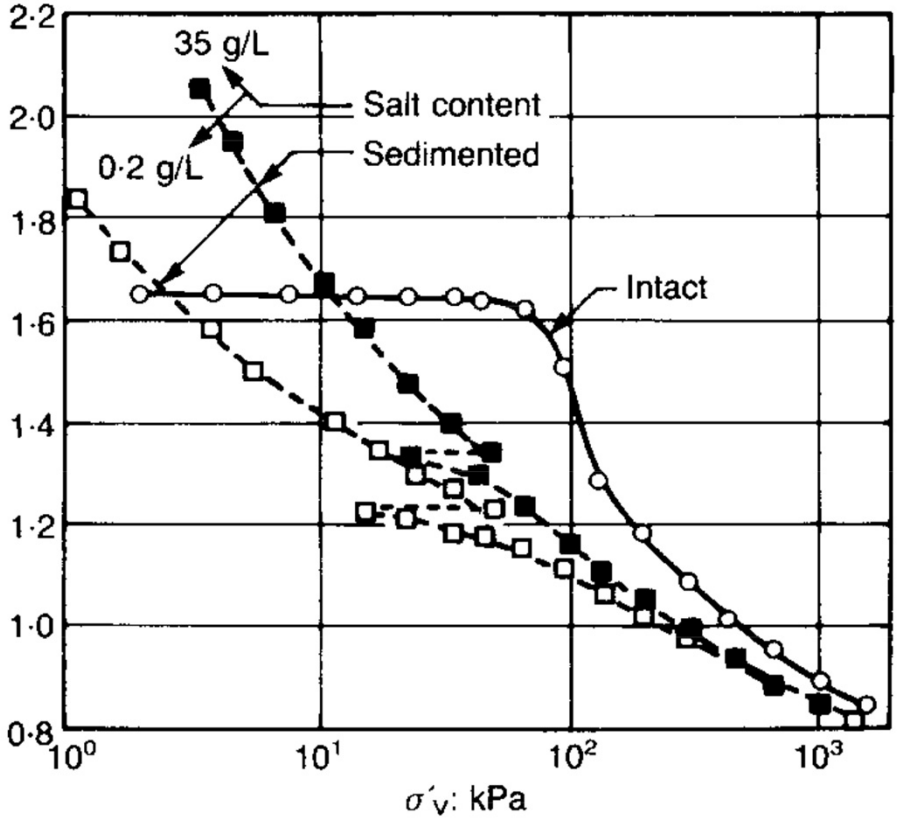
Observation microscopique de smectite Wyoming
(Tessier et al, 1992)

Définition de la structure des sols

- Deux composantes à la structure des sols (Burland 1990) :
  - l'arrangement géométrique des particules
  - les cimentations / liaisons entre les particules



Burland 1990



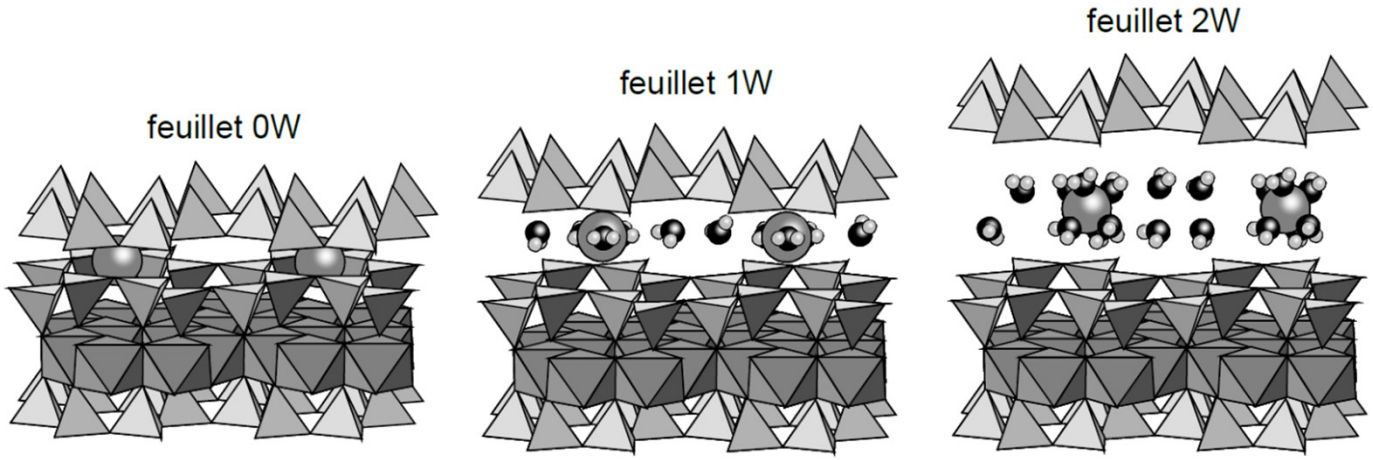
Leroueil et Vaughan, 1990

Comment les conditions environnementales peuvent-elles altérer le comportement des argiles gonflantes?

- **Deux exemples pour illustrer le lien entre microstructure et comportement des argiles gonflantes**
  - **Influence de la nature du fluide hydratant sur la pression de gonflement d'une argile**
  - Impact de cycles hydriques sur le comportement macroscopique d'une argile gonflante traitée à la chaux

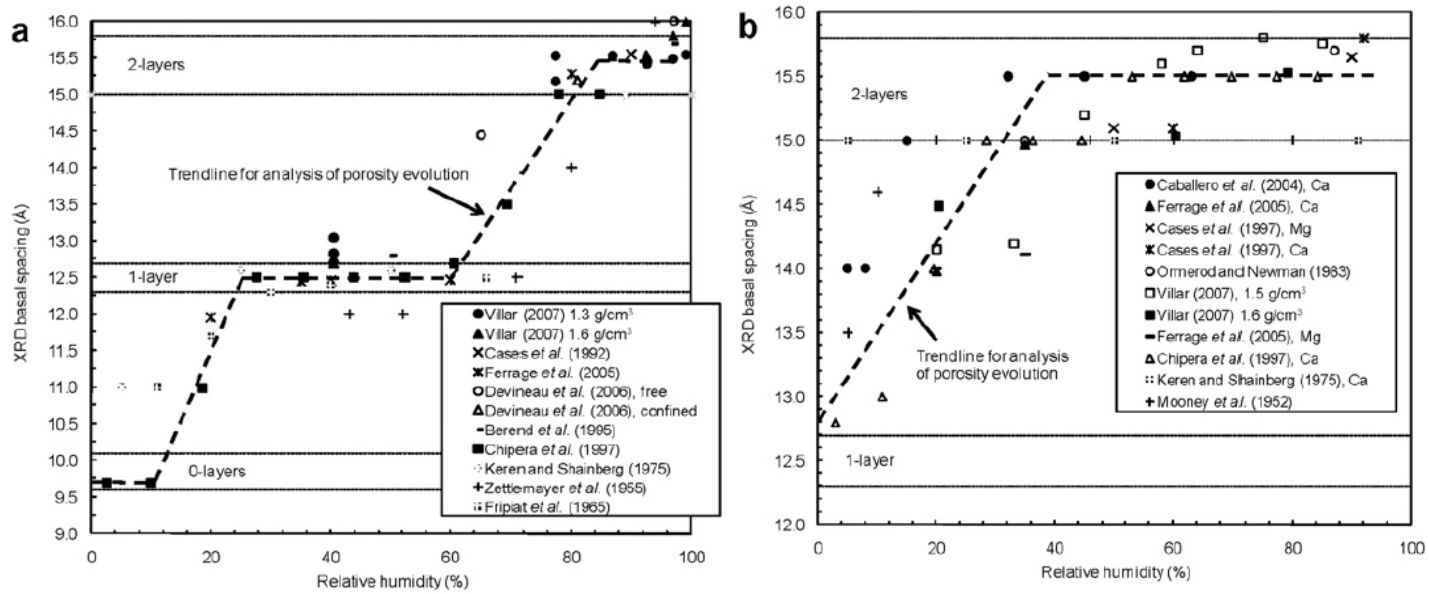
Le gonflement à l'échelle de la particule

Le gonflement cristallin



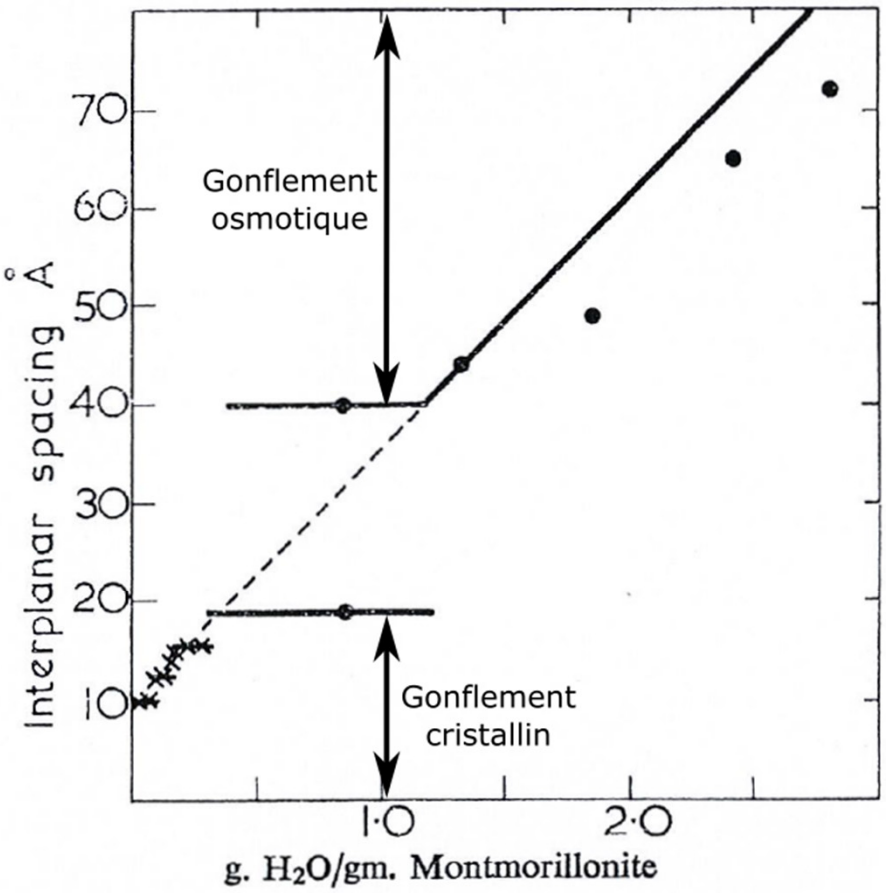
Evolution discrète de l'espacement interfoliaire (Ferrage, 2004)

Influence du cation interfoliaire : mesures DRX sur bentonites (a) sodiques et (b) calco-magnésiennes (Likos et Wayllace, 2010)

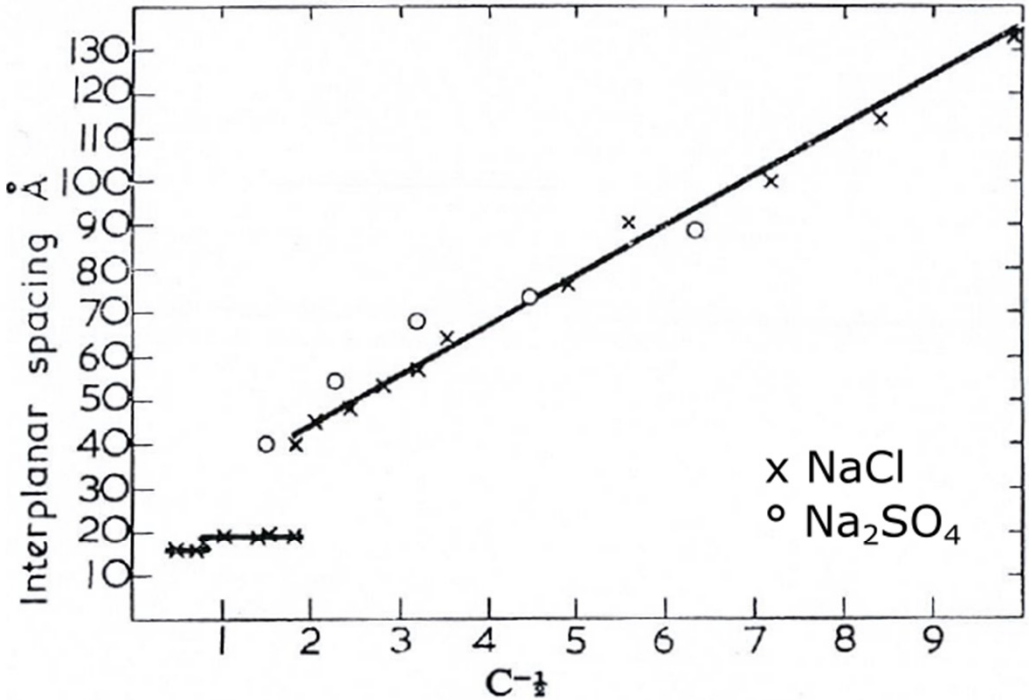


Le gonflement à l'échelle de la particule

Le gonflement osmotique en solution diluée au-delà de 20 Å (3-4W) avec influence du cation interfoliaire



Espacement interfoliaire d'une montmorillonite sodique au cours de l'hydratation (Norrish, 1954)

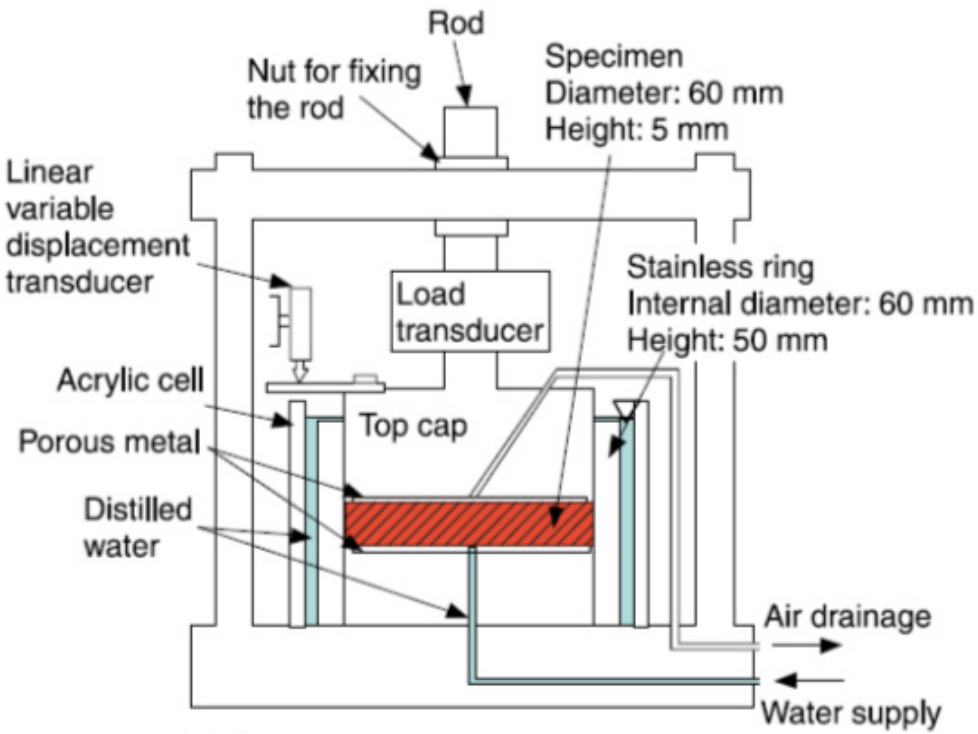


Espacement interfoliaire d'une montmorillonite sodique en fonction de la force ionique de la solution (Norrish, 1954)

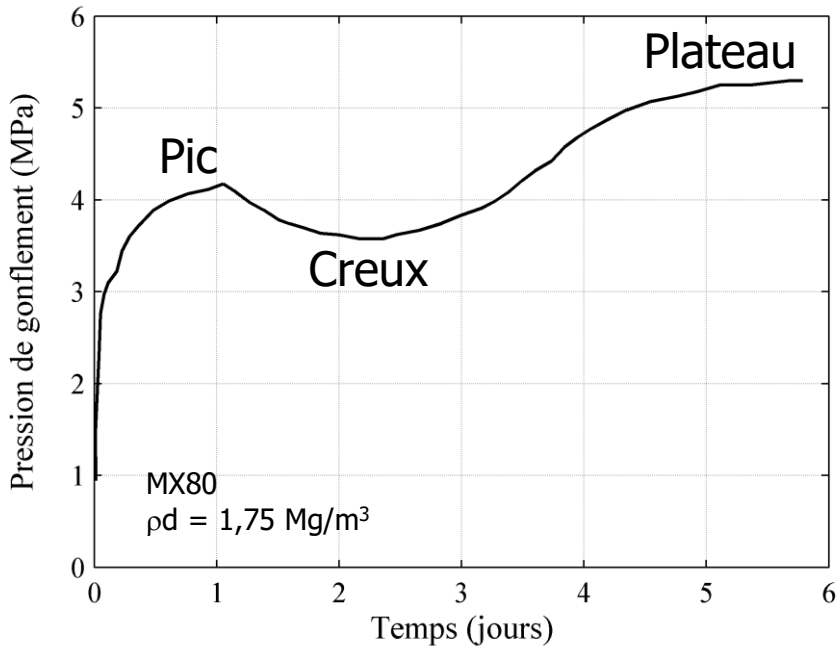
Le gonflement à l'échelle macroscopique

Dispositif assurant un volume constant des éprouvettes avec suivi de la pression de gonflement Pg

Evolution caractéristique de Pg à volume constant lors d'une hydratation par un fluide



(Komine et Ogata, 2003)



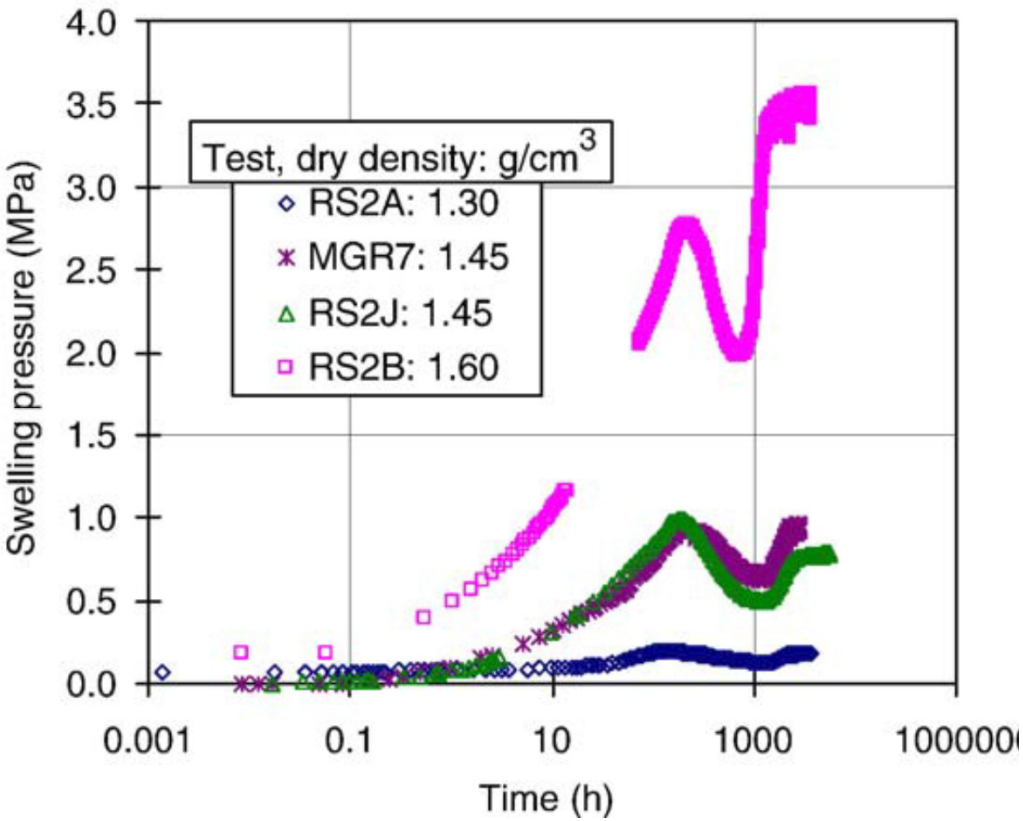
(Pusch, 1982)

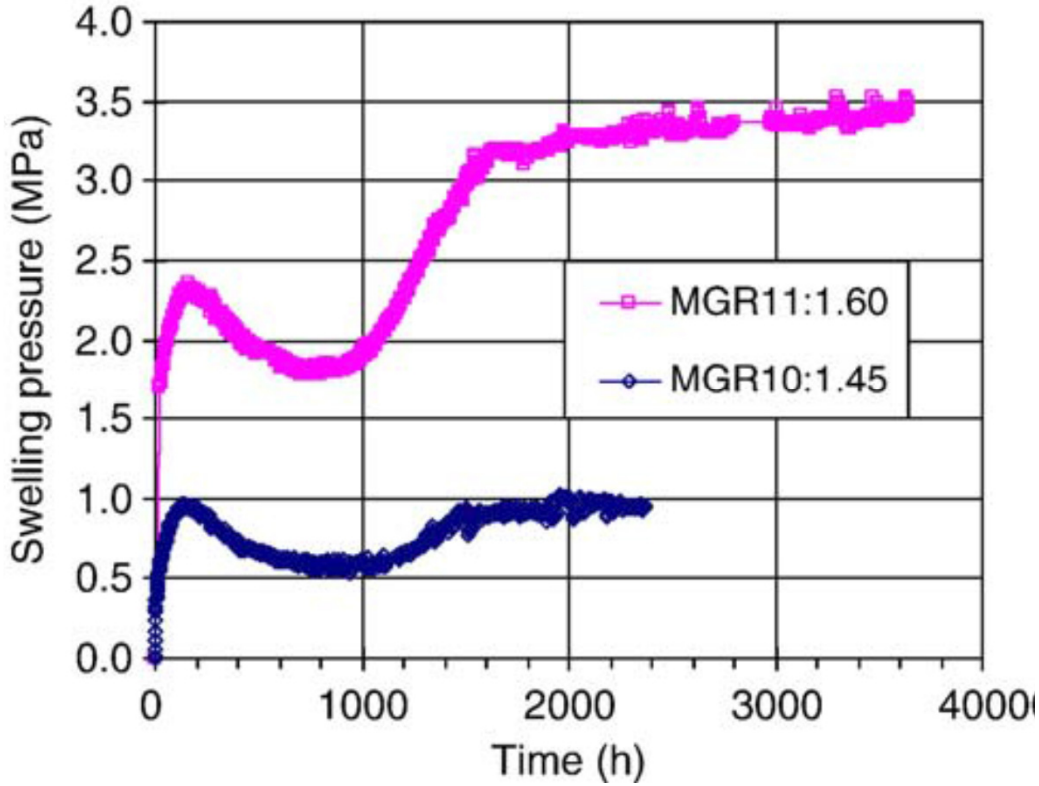
Le gonflement à l'échelle macroscopique

Influence de la masse volumique sèche sur le profil de gonflement

Augmentation de l'intensité du pic et du plateau lorsque la masse volumique sèche augmente

Augmentation du temps pour atteindre un valeur de Pg stabilisée lorsque la masse volumique sèche augmente



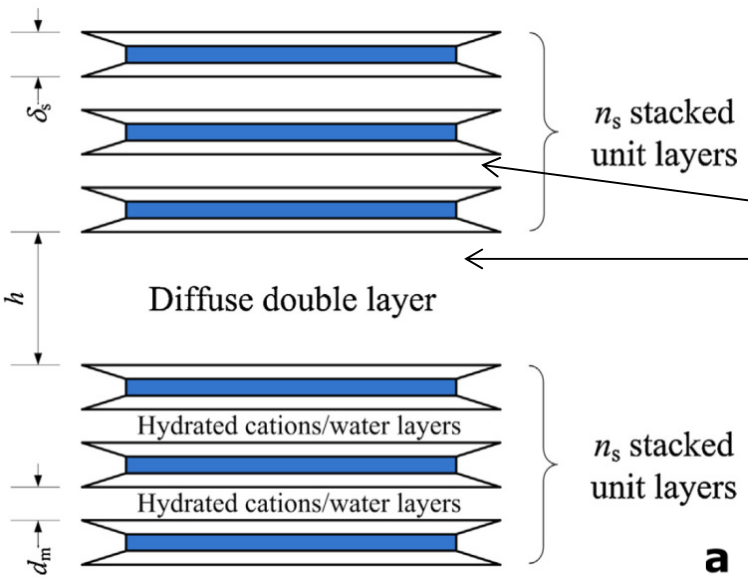


Profil de gonflement à différentes masses volumiques sèche d'éprouvettes d'argile FoCa (Imbert et Villar, 2006)

Modélisation du gonflement

Deux types d'approches :

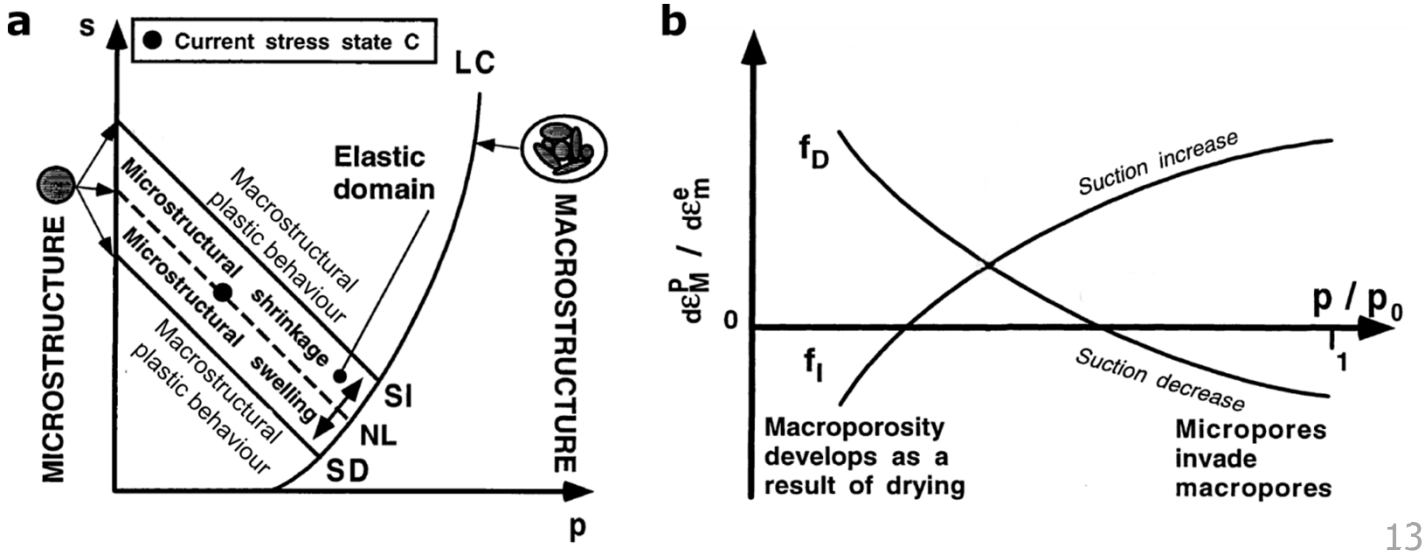
Pg à l'échelle macroscopique calculée à partir de la pression de gonflement entre 2 feuillets
Evolutions de Pg et de la microstructure évaluées à partir du comportement THM du matériau



Prise en compte des différentes forces d'interaction entre feuillets et particules permettant de discriminer (Liu , 2013) :

1. gonflement cristallin
2. gonflement osmotique

Modèle de Barcelone BExM : (a) surface de charges, (b) fonctions d'interactions(Ye et al, 2009)

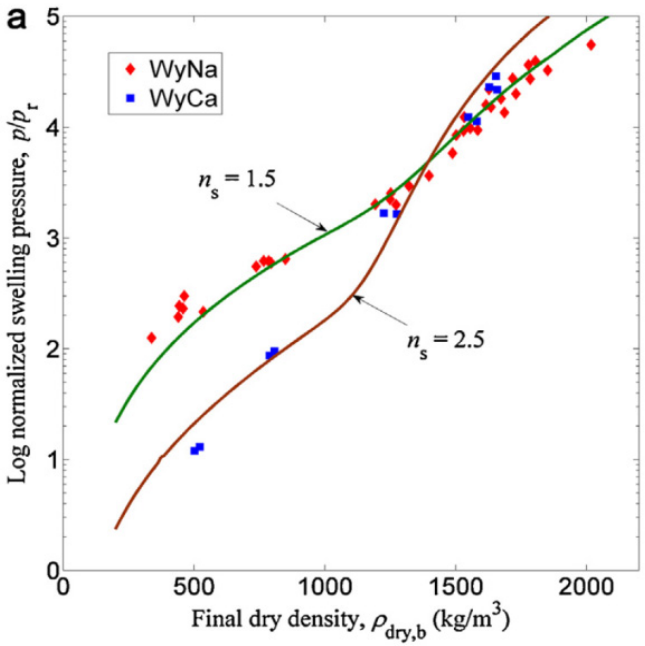


Modélisation du gonflement

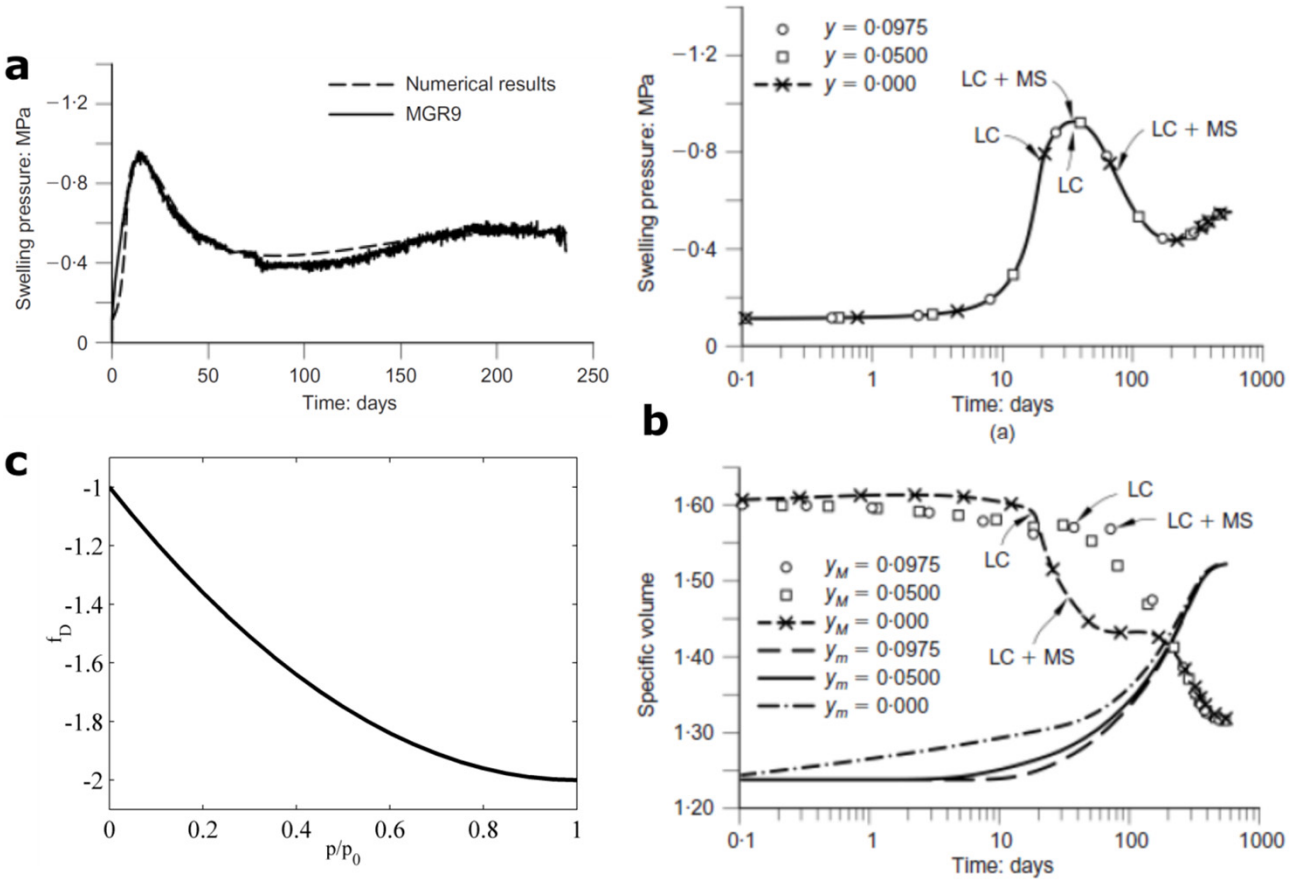
Exemples de résultats :

Modèle de Liu : bonne corrélation entre Pg calculée en fonction de la masse volumique sèche et résultats expérimentaux, forte dépendance du modèle avec le nombre de feuillets par particule

BExM : bonne corrélation entre résultats calculés et expérimentaux (Pg et évolution de la porosité inter-agrégats), forte dépendance du modèle avec la fonction d'interaction semi-empirique



Bentonites MX80 homoionisé Na ou Ca (Liu, 2013)



Modèle Barcelone BExM : (a) surface de charges, (b) fonctions d'interactions(Ye et al, 2009)

Approche

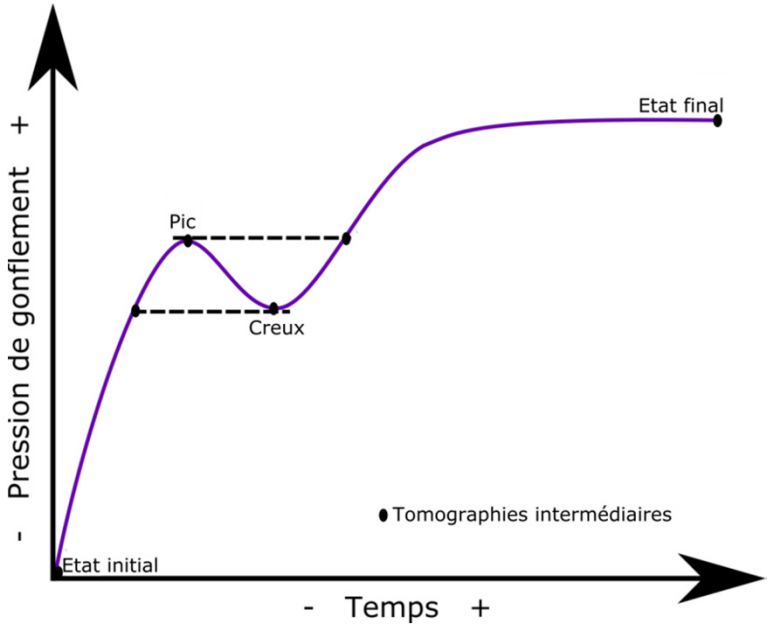
Problématiques

Gonflement d'éprouvette à volume constant : phénomène mutli-échelles
Études effectuées à différentes échelles et sur différents échantillons → artéfact
Observations qualitatives
Contribution relative osmotique / cristallin en lien avec la réorganisation structurale ?

Objectifs des travaux

Étude multi-échelle du gonflement à volume constant
Travailler sur un nombre limité d'éprouvettes pour limiter les artéfacts → développement d'un nouveau dispositif expérimental permettant :

- Suivi de Pg macroscopique
- Caractérisation porosité inter-agrégats par µCT et au MEB (post-mortem)
- Caractérisation porosité inter-particulaire au MET et par adsorption de gaz (post-mortem)



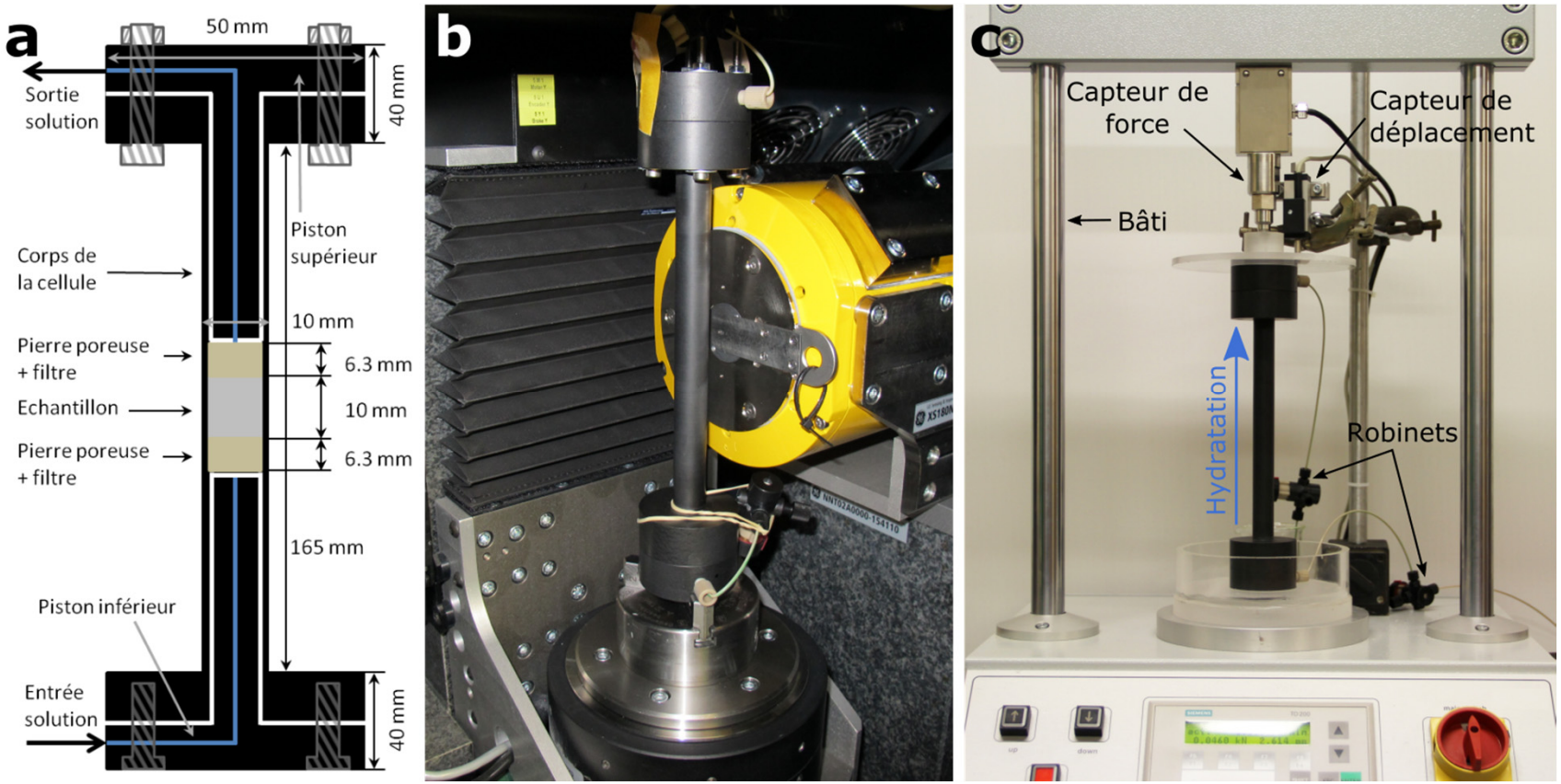
Dispositif de mesure, œdo-tomomètre

Cahier des charge de l' œdo-tomomètre

suivi de Pg → résistance mécanique

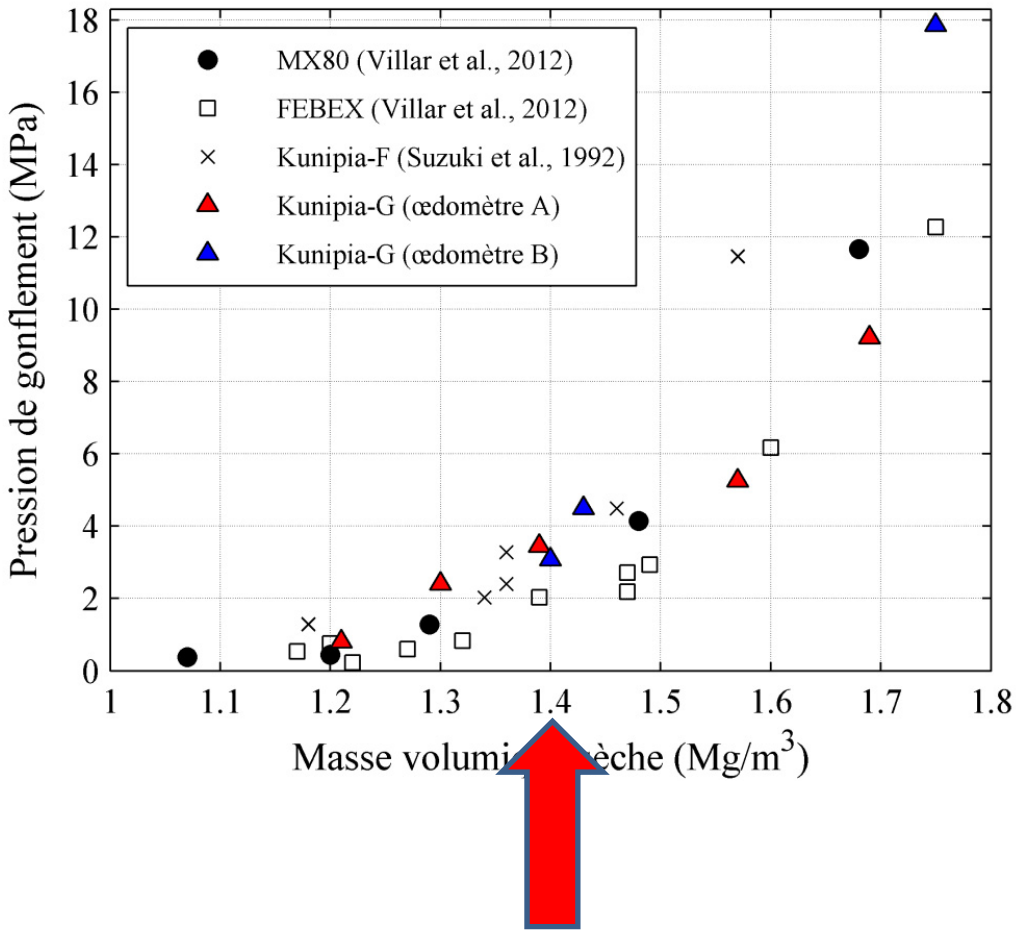
suivi de la porosité inter-agrégats par µCT → cellule adaptée aux conditions d'utilisation du tomographe + atteindre un résolution des images satisfaisante

compatibilité de la cellule avec différents fluides



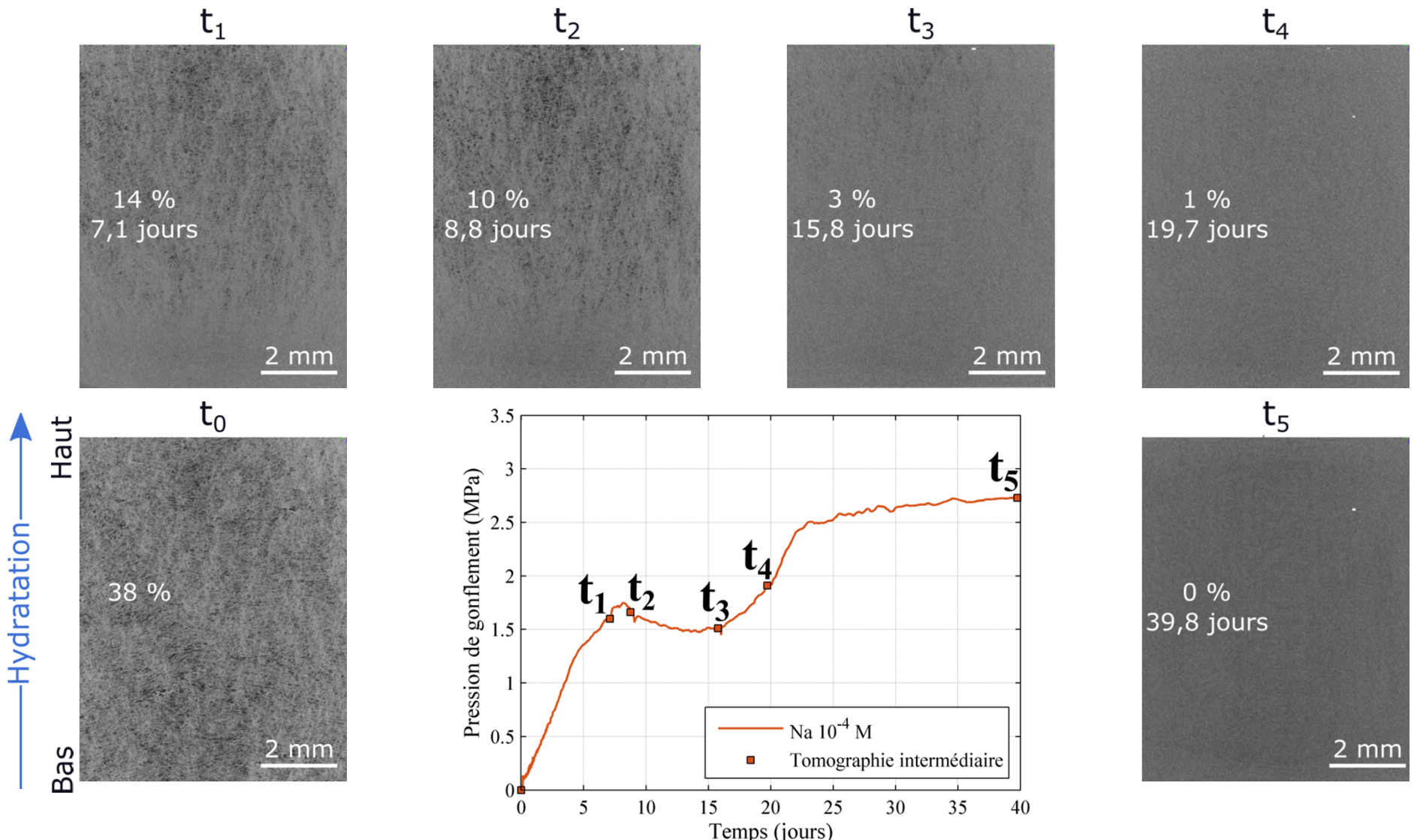
Matériau d'étude : Kunipia G

Type	Smectite sodique
Teneur en smectite	95%
Phases accessoires	1-2% carbonates 2-3% quartz
Masse volumique des particules (Mg/m³)	2,71
CEC (mequiv/100g)	115,0
Cations échangeables	91% Na, 8% Ca, 1% K
Potentiel de gonflement	590%



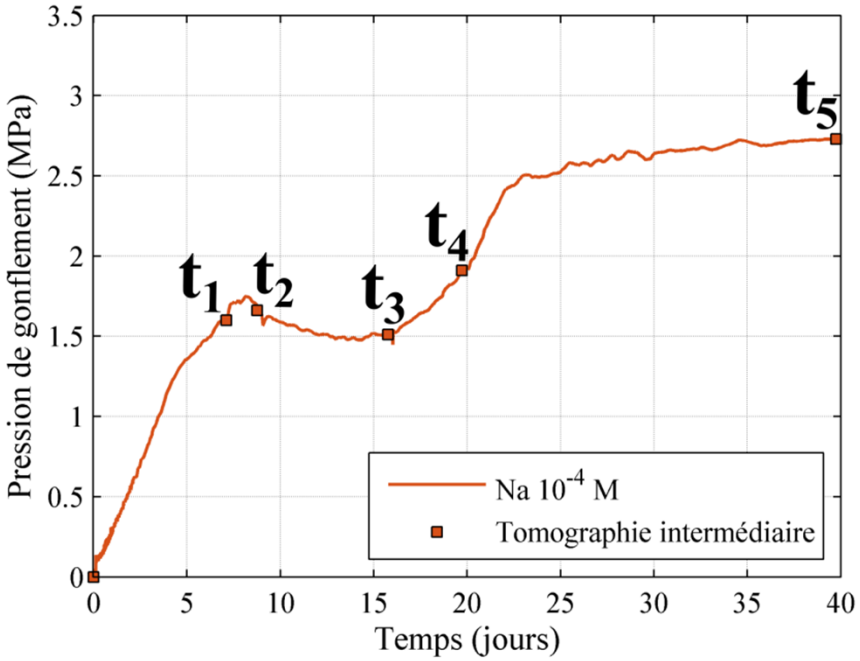
Couplage entre Pg et porosité inter-agrégats

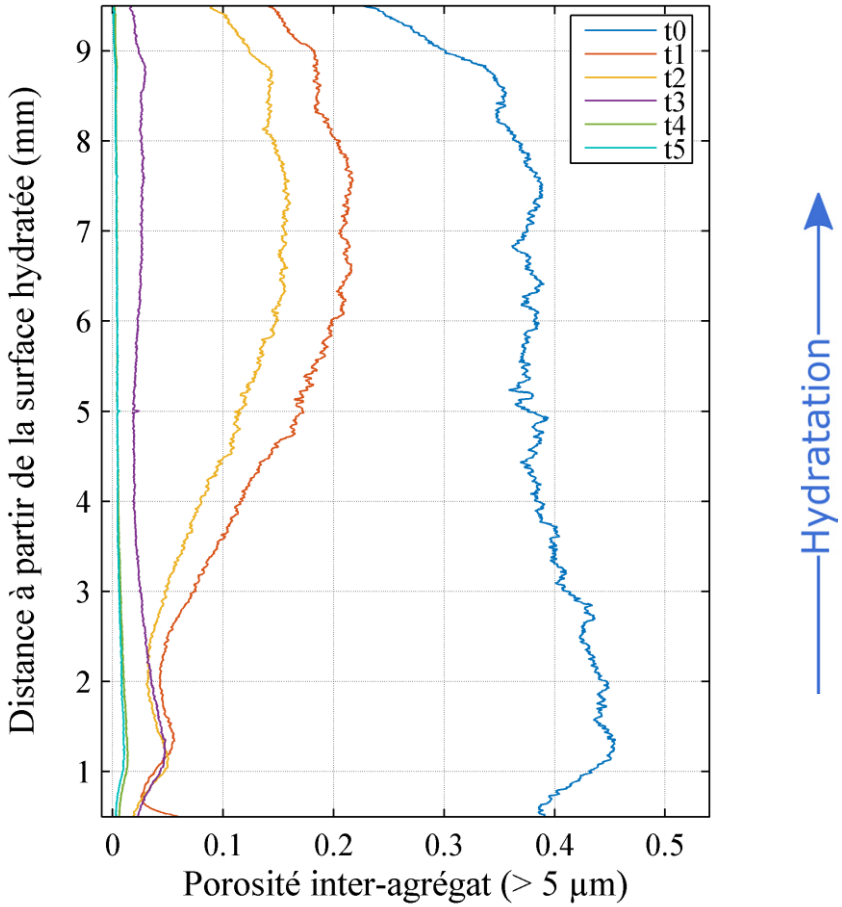
Pg vs. porosité inter-agrégats (>5µm) suivie par µCT (NaCl 10^{-4} M)



Couplage entre Pg et porosité inter-agrégats

Pg vs. porosité inter-agrégats suivie par µCT (NaCl 10^{-4} M)





Stratégie expérimentale

Différents fluides pour l'hydratation :

NaCl 10^{-4} M et NaCl 10^{-1} M agissent sur la composante osmotique du gonflement

Méthacrylate de méthyle (MMA) agît sur la composante cristalline uniquement , il est choisit pour ses propriétés proches de celles de l'eau (moment dipolaire, épaisseur notamment) qui engendre un gonflement de l'espace interfoliaire (Blumstein et al., 1970 ; Tabtiang et al., 2000)

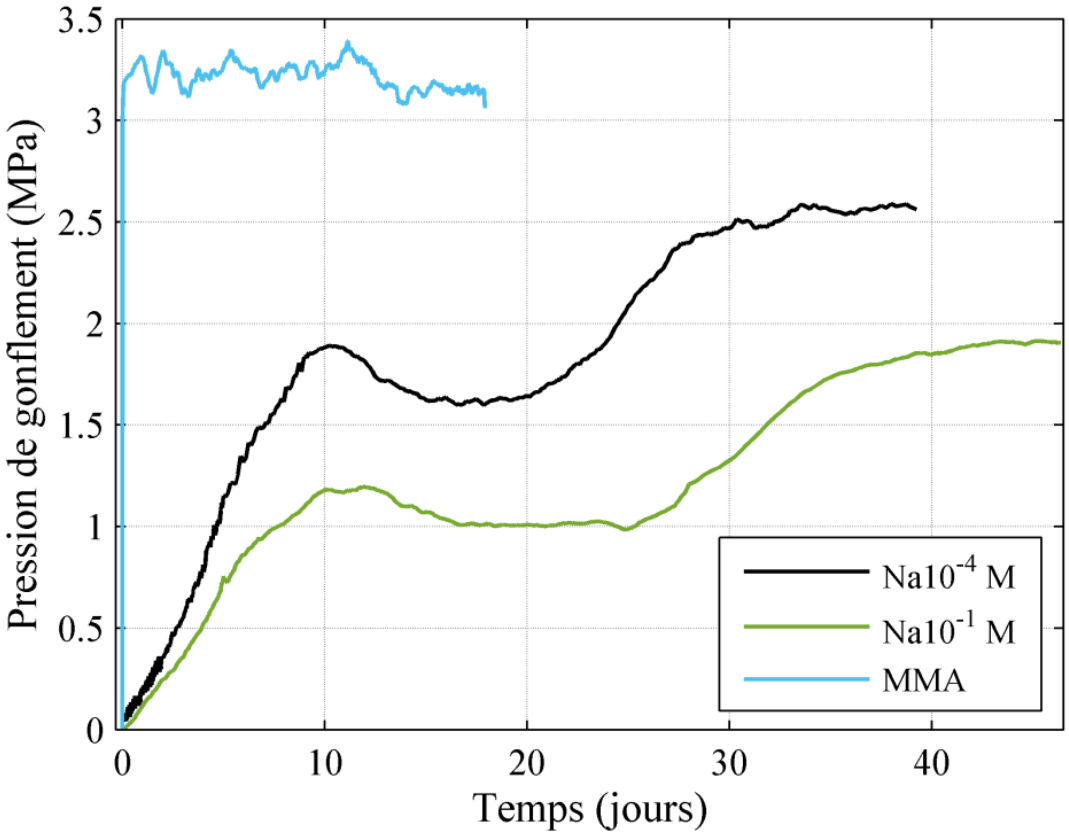
	Eau	**Méthacrylate de méthyle (MMA)**
Moment dipolaire (D)	1,85	1,7
Epaisseur (Å)	2,65	3,8
Viscosité (mPa.s)	1,002	0,584
Masse volumique (g/cm^3)	0,998	0,94
Constante diélectrique (F/m)	80	6,32
Tension de surface (N/m)	72.10^{-3}	28.10^{-3}

Couplage entre Pg et porosité inter-agrégats

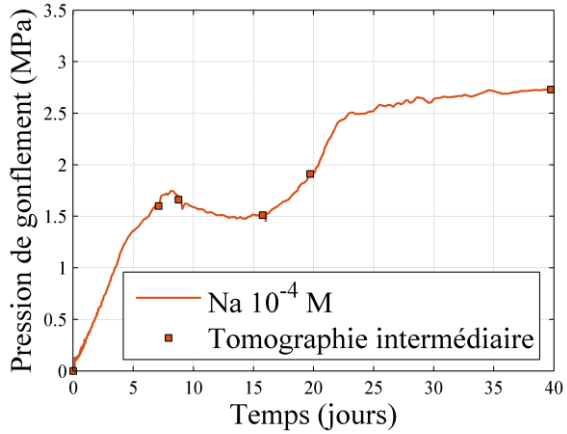
Evolution de Pg en fonction du fluide hydratant (NaCl 10^{-4} M, NaCl 10^{-1} M, MMA)

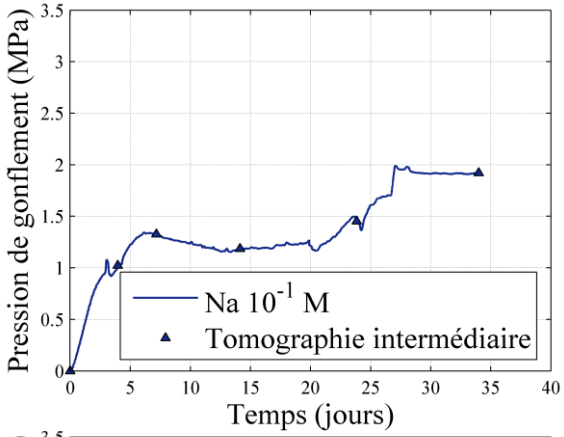
Plus la force ionique est faible et plus la pression de gonflement est faible, par contre pas d'influence sur l'amplitude pic/creux/plateau

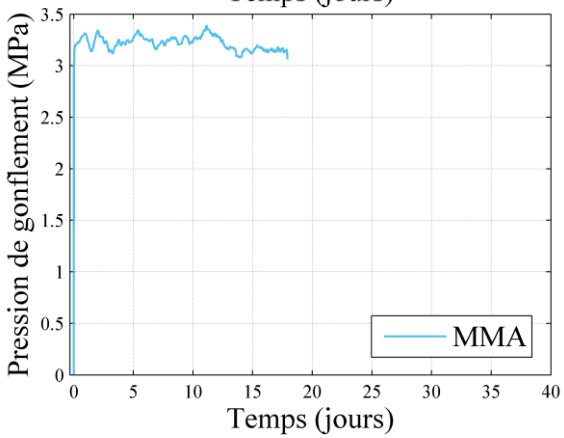
MMA (gonflement cristallin uniquement) : pression de gonflement supérieure aux solutions de NaCl



Impact du fluide hydratant

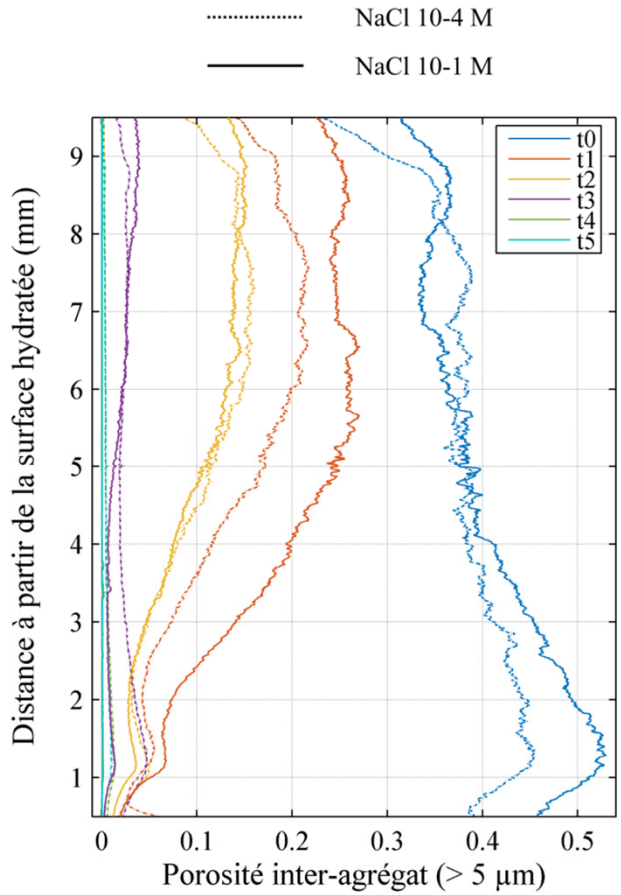






Comparaison NaCl
10^{-4} et 10^{-1} M

a



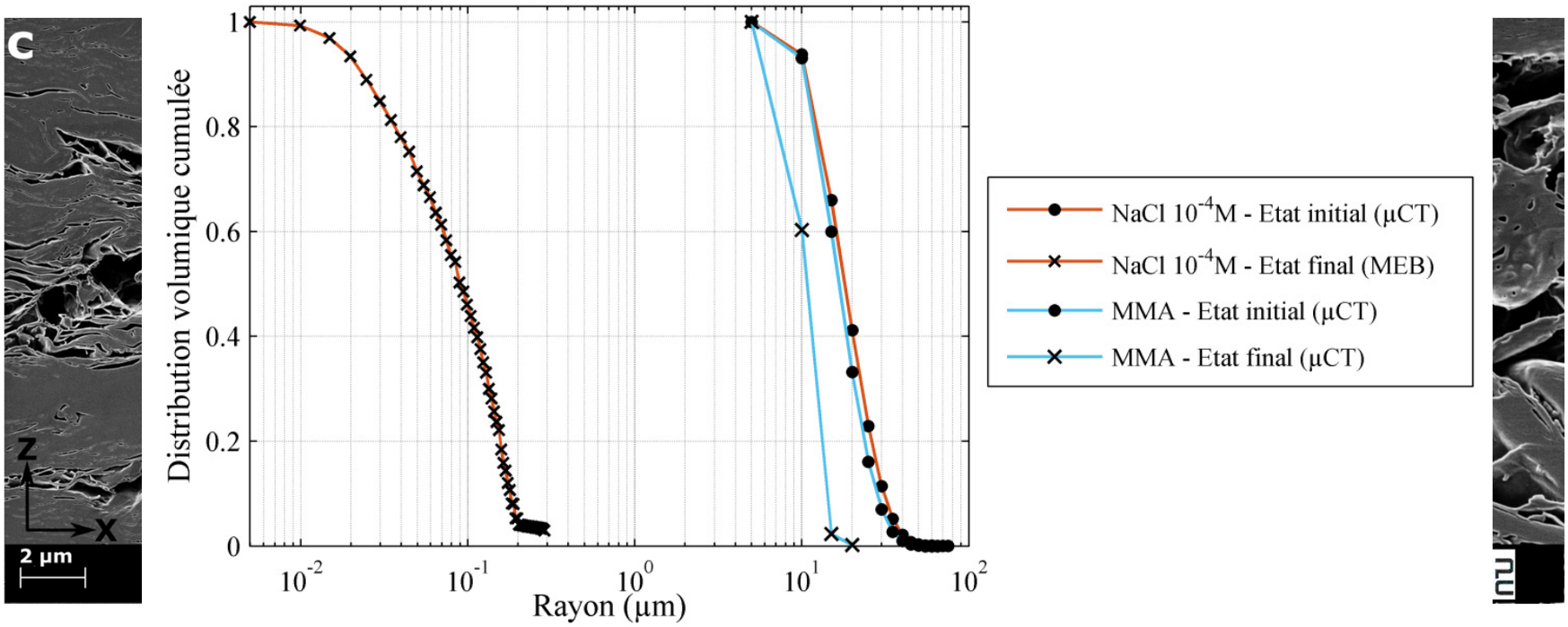
Analyse MEB

Porosité inter-agrégat à l'état final au MEB (NaCl 10^{-4} M)

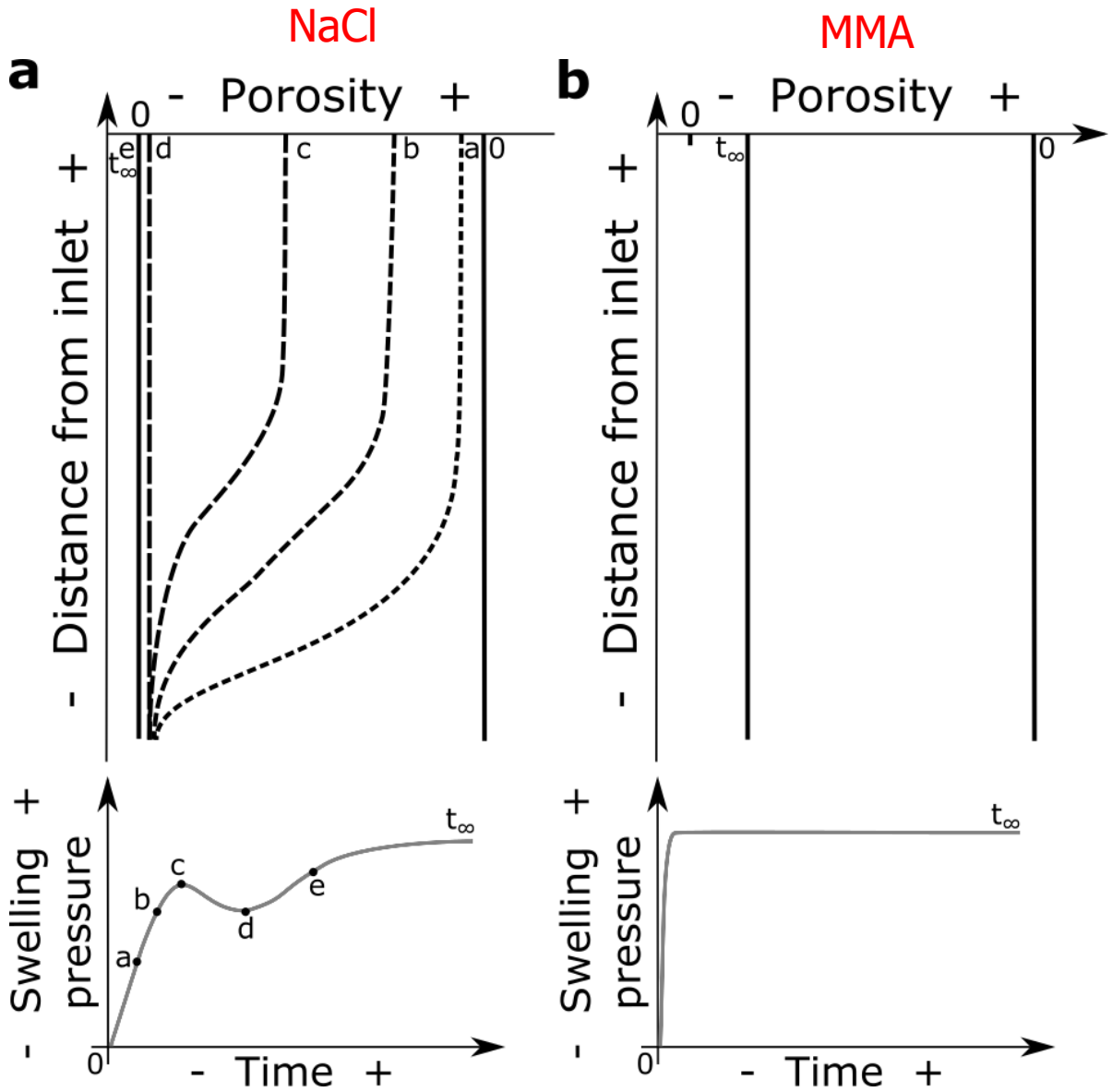
structure en nid d'abeille (amas d'agrégat) avec absence de gel au sein

rayon des pores de l'ordre de 0,2 µm

→ Limite de résolution en µCT



Synthèse (macroporosité)



Conclusion

- **Développement d'un oedo-tomomètre**
  - Suivi de la pression de gonflement au cours du temps
  - Analyse de la porosité inter agrégats (> 5 µm)
  - Compatible avec différents types de fluide

- **Analyse du lien entre pression de gonflement et mécanismes de gonflement**
  - Pic de pression = disparition pores interagrégats
  - Associé au gonflement osmotique

- **Perspectives**
  - Analyses à l'échelle de la particule (adsorption de gaz, MET)
  - Impact de variations de densité
  - Cas d'un fluide alcalin

Comment les conditions environnementales peuvent-elles altérer le comportement des argiles gonflantes?

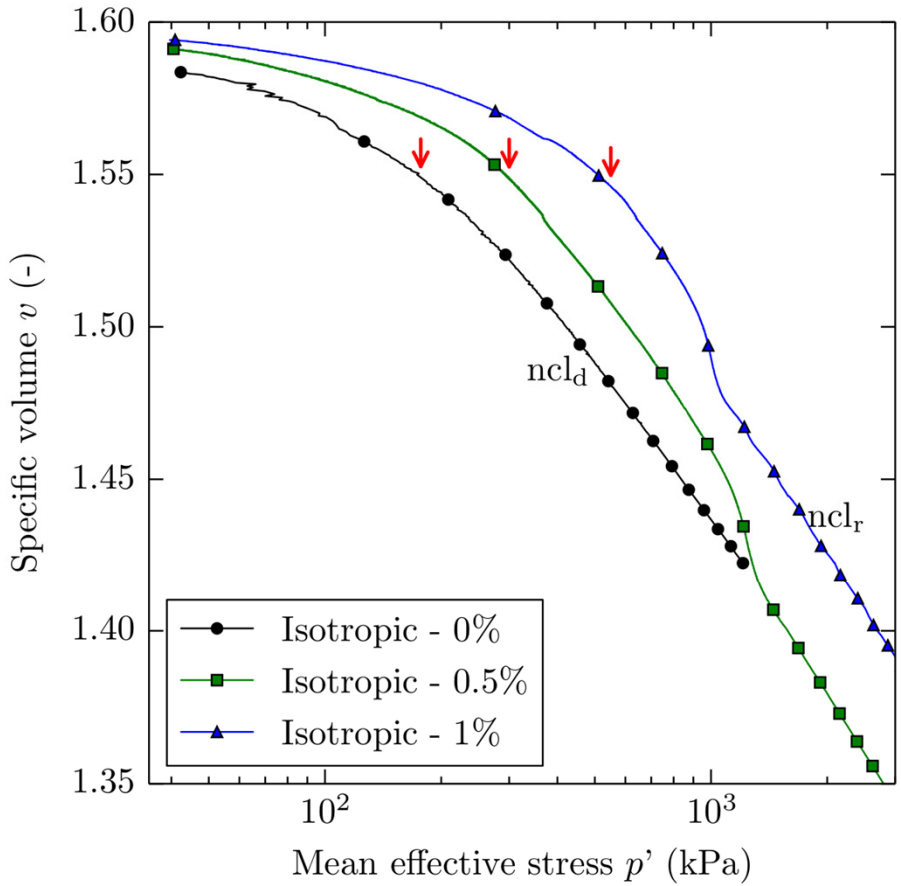
- **Deux exemples pour illustrer le lien entre microstructure et comportement des argiles gonflantes**
  - Influence de la nature du fluide hydratant sur la pression de gonflement d'une argile
  - **Impact de cycles hydriques sur le comportement macroscopique d'une argile gonflante traitée à la chaux**

Cas des sols traités à la chaux

Characteristics of the silt

Geotechnical properties	Value
Water content (%)	20.0
v_0 (-)	1.6
Liquid limit LL (%)	31.2
Plastic limit PL (%)	7.8
Plasticity index PI (%)	23.4
Particle density ρ_s (Mg.m^{-3})	2.66
USCS[a]	ML

[a]USCS: Unified Soil Classification System.

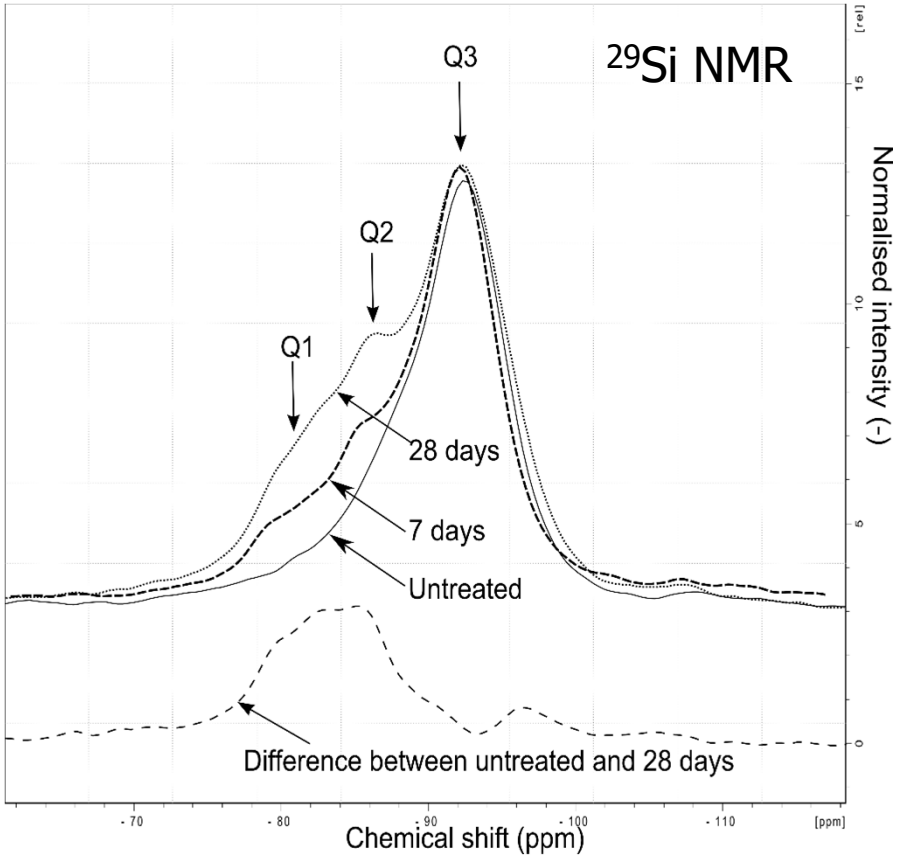


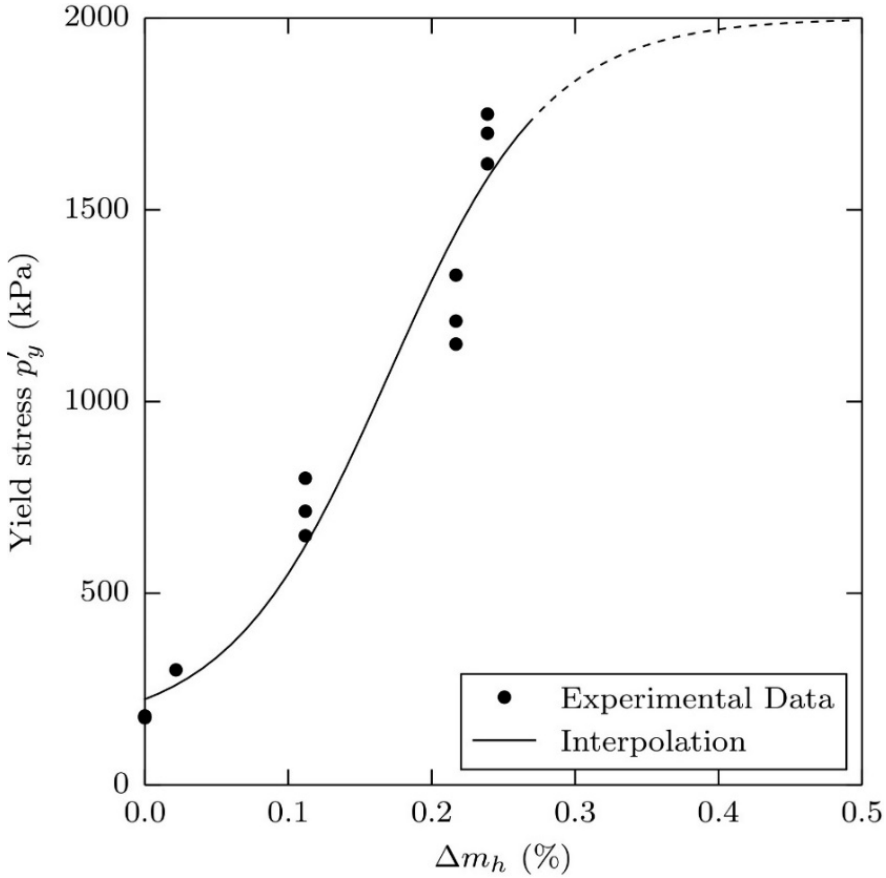
→ Ajout de chaux : ↑ [Ca2+] et ↑ pH (12,4)

→ La modification du comportement est due à des réactions pouzzolaniques qui conduisent à la formation de composés cimentaires

Comment quantifier le degré de cimentation ?

- Mesures directes pour quantifier les transformations minéralogiques





Approche de modélisation

Parameters:

Stress state

p_y^{I} : Primary yield stress

p_y^{II} : Degradation stress

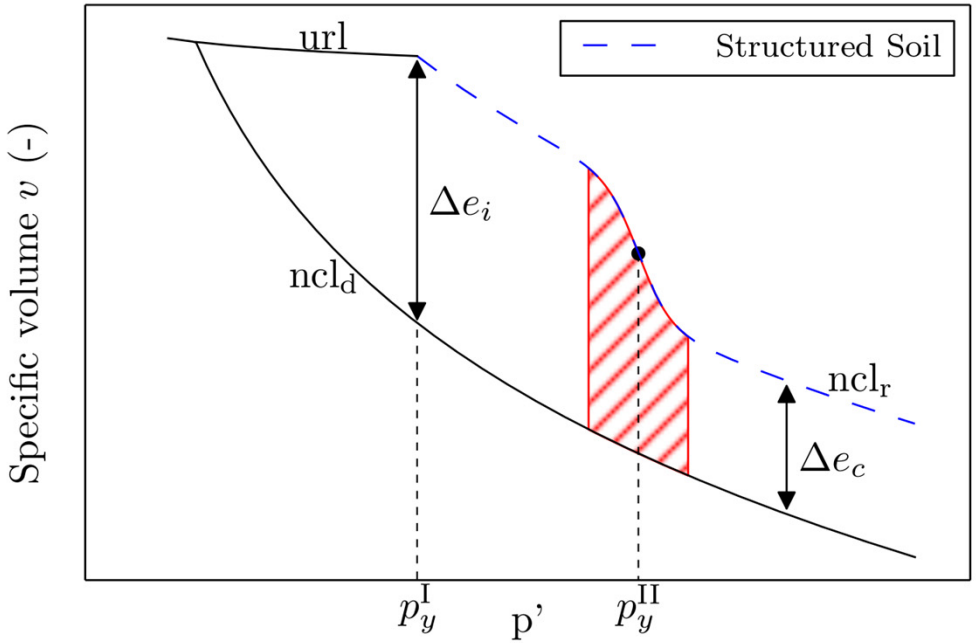
"Amount" of structure

Δe_i: Additional void ratio at p_y^{I}

Δe_c: Residual void ratio for $p' \to +\infty$

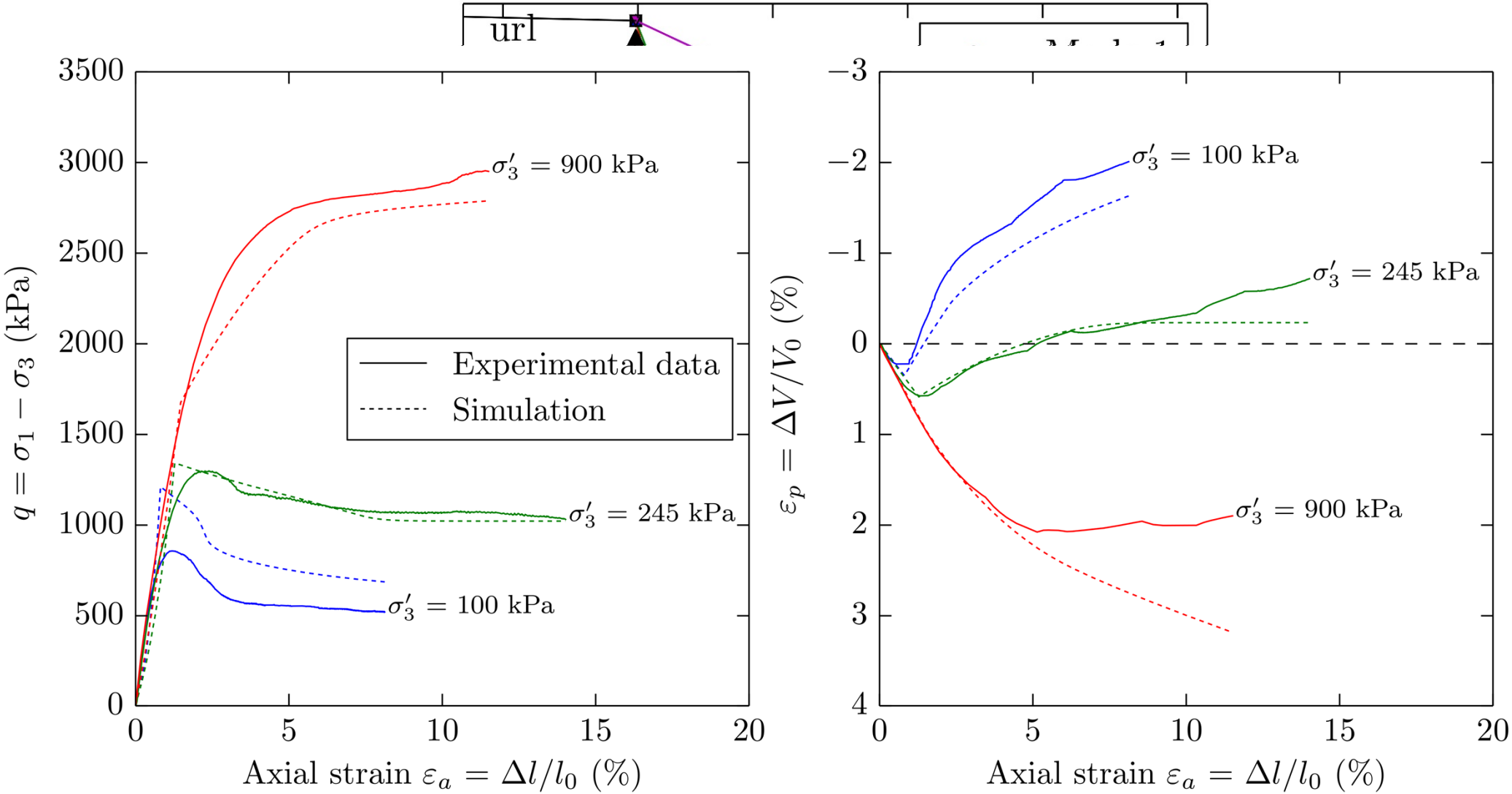
Control of the degradation

β: Rate of degradation



All these parameters have a **physical meaning** and can be determined from a **single isotropic test**

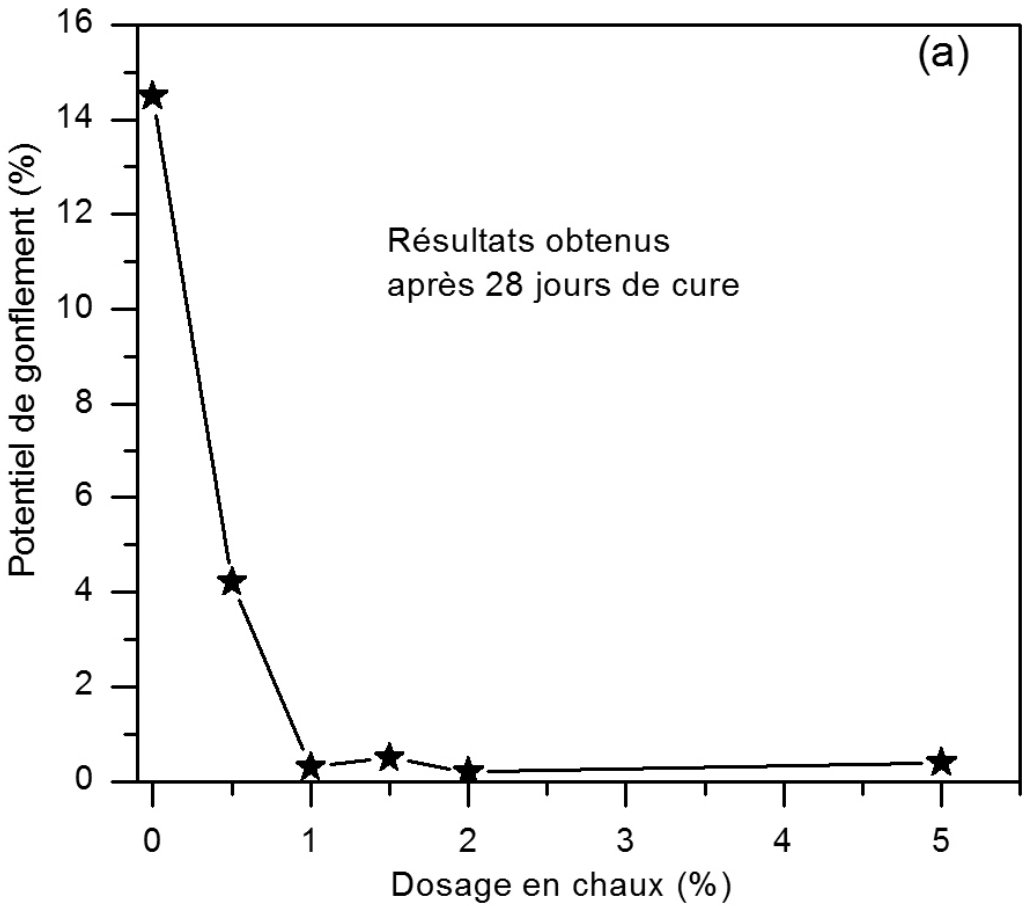
Loi de comportement

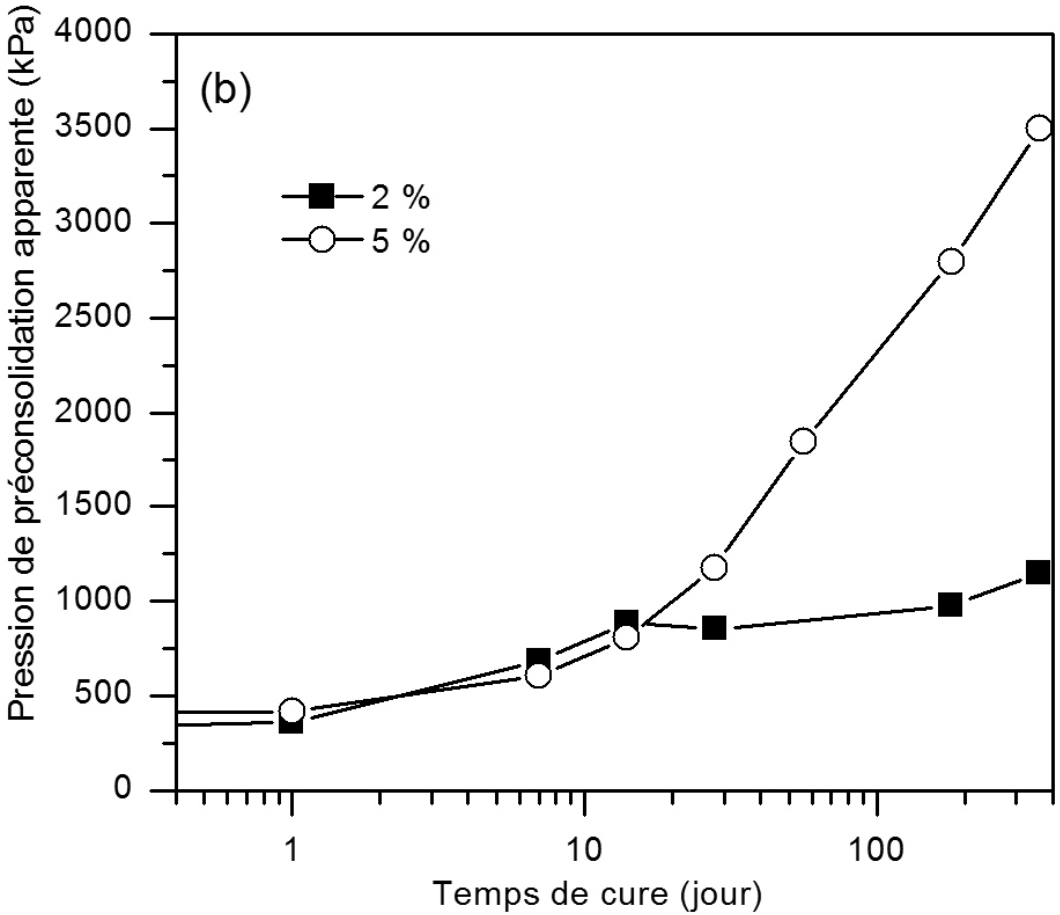


$\pi(p')$

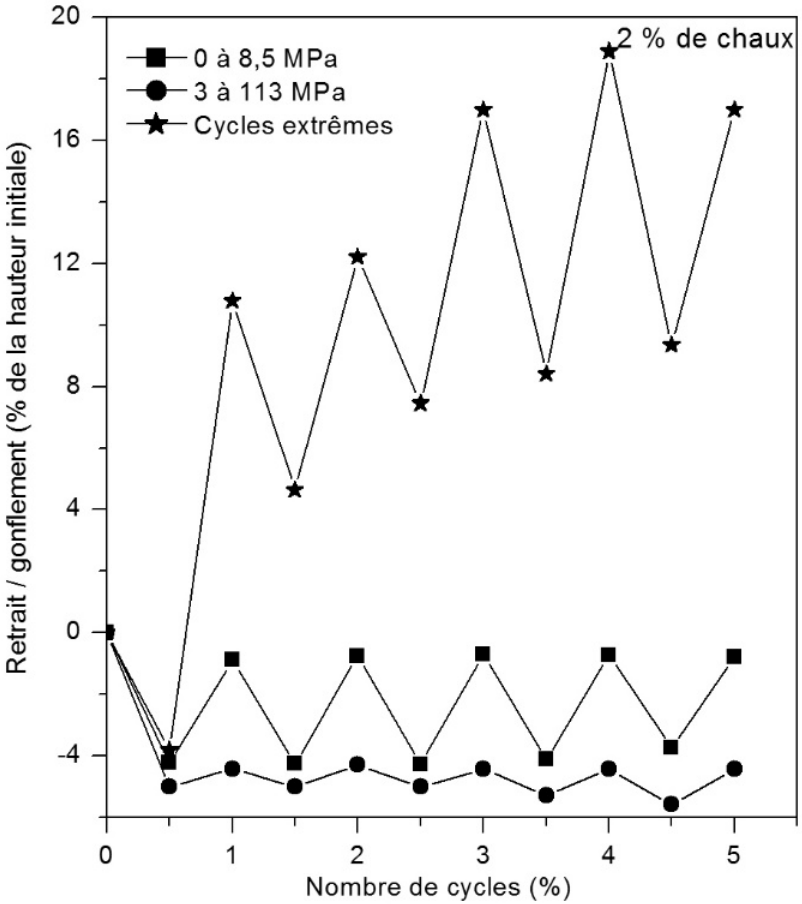
Traitement d'une argile gonflant

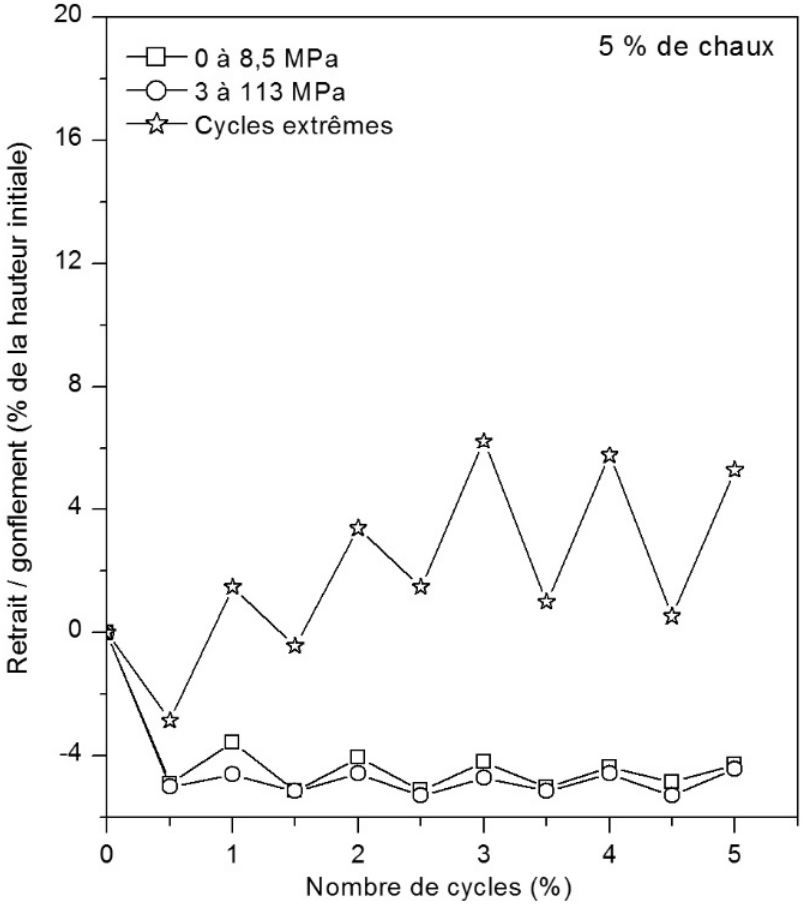
- Le traitement permet de réduire le gonflement d'une argile gonflante et de modifier la compressibilité





Durablité : impact de cycles hydriques

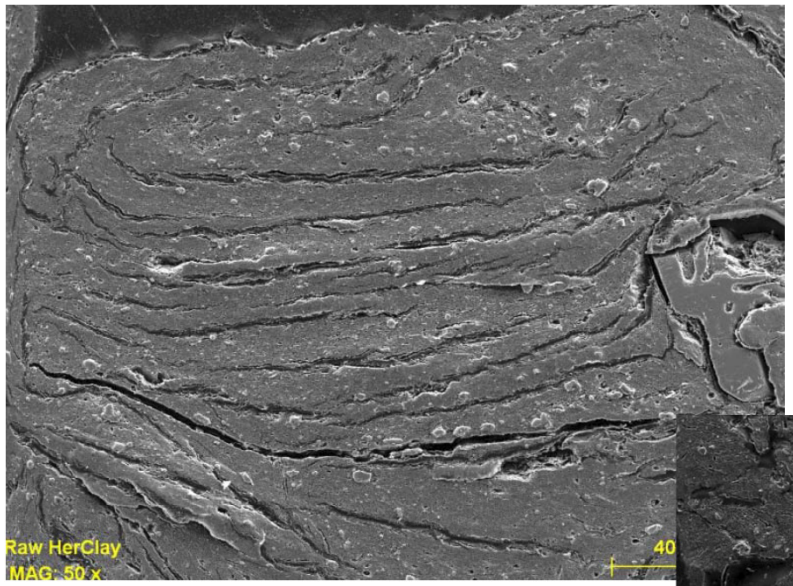


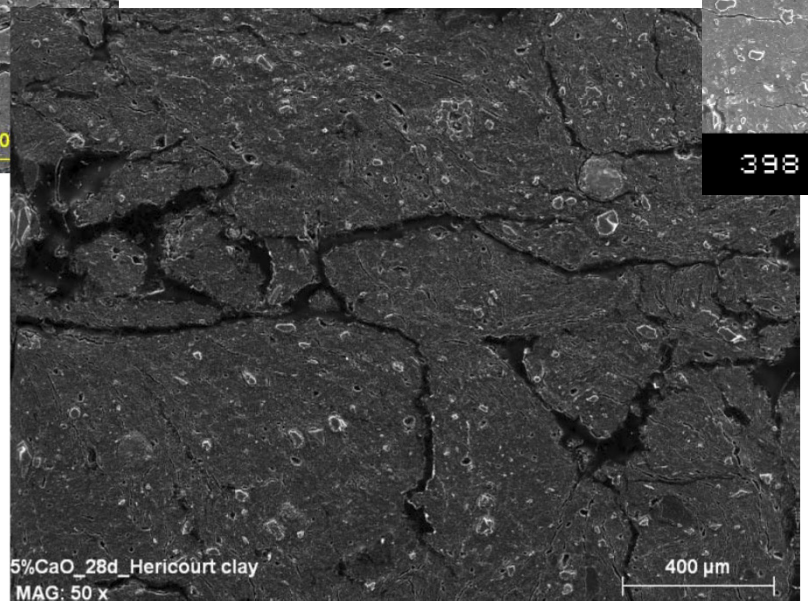


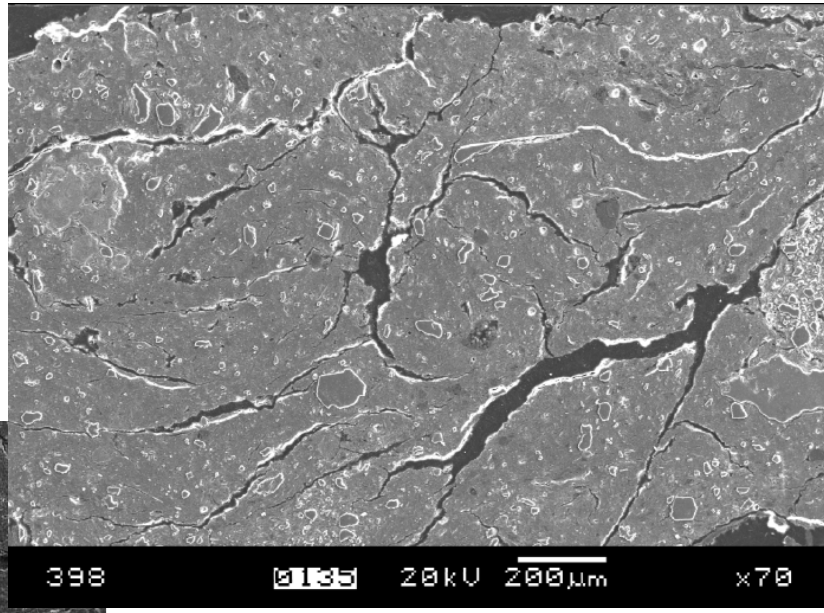
Comment caractériser la relation avec la microstructure du sol ?

Analyse de la microstructure

- Microscope électronique à balayage (géométrie + chimie)





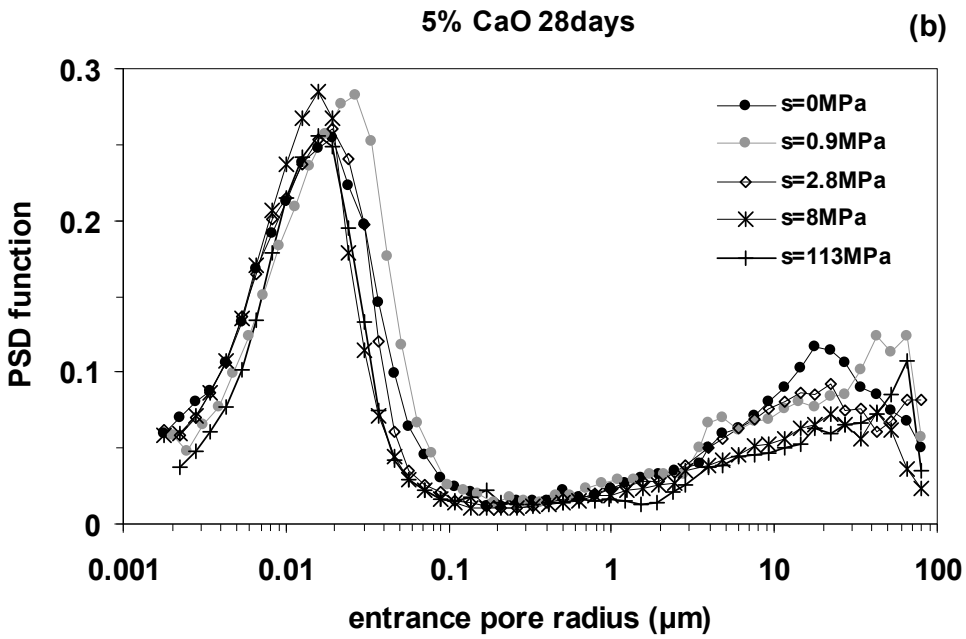


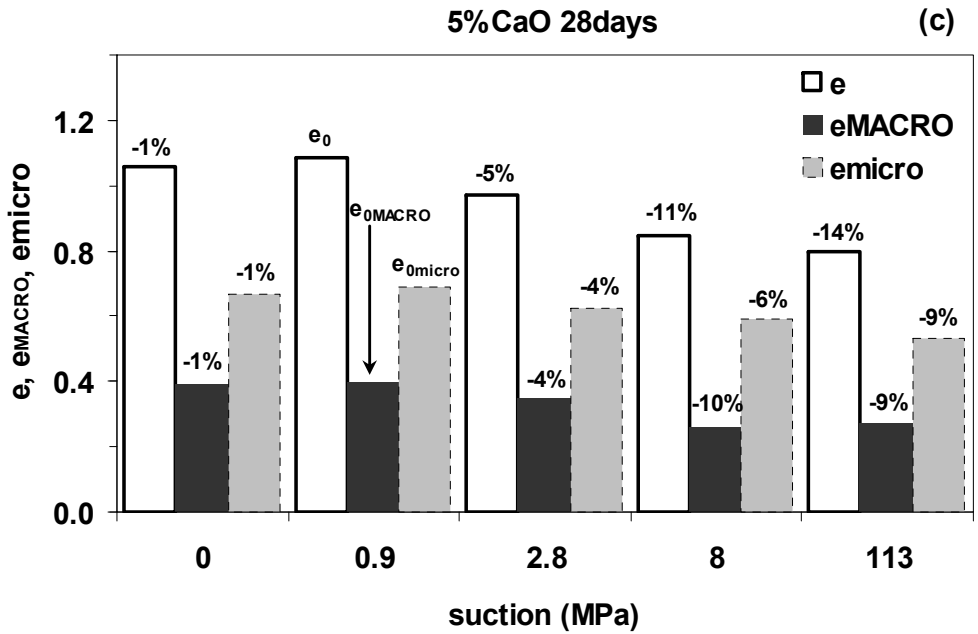
Traitement avec
5 % de chaux,
28 j de cure

5 cycles hydriques
(0-8,5 MPa)

Analyse de la microstructure

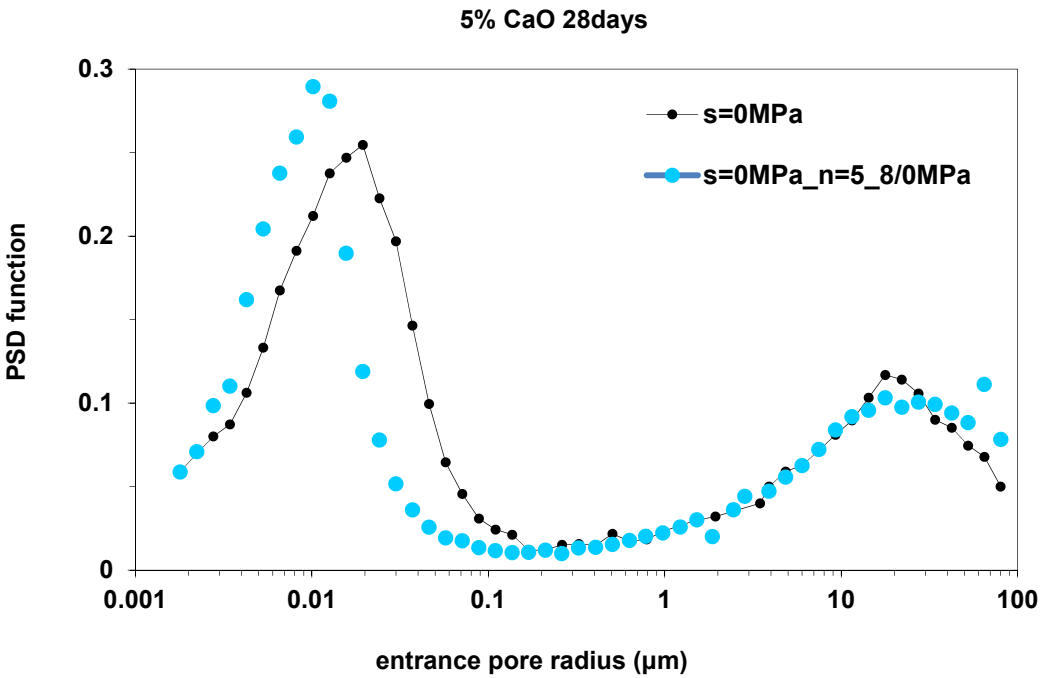
- Analyse de l'effet du séchage par porosimétrie au mercure : aspect quantitatif de la porosité

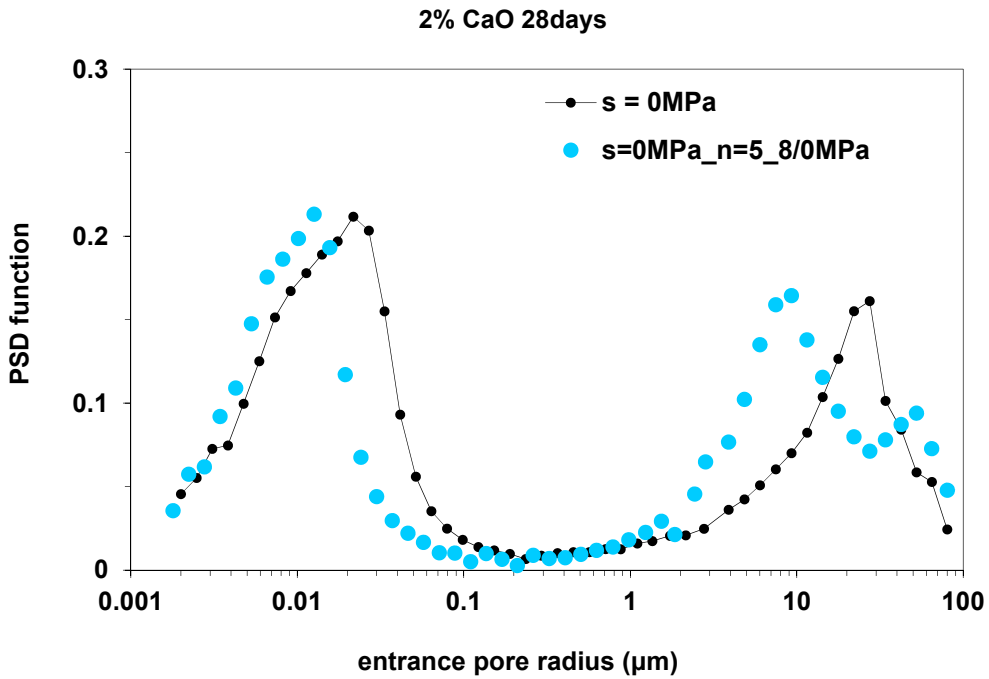




Analyse de la microstructure

- Analyse de l'effet des cycles par porosimétrie au mercure : aspect quantitatif de la porosité



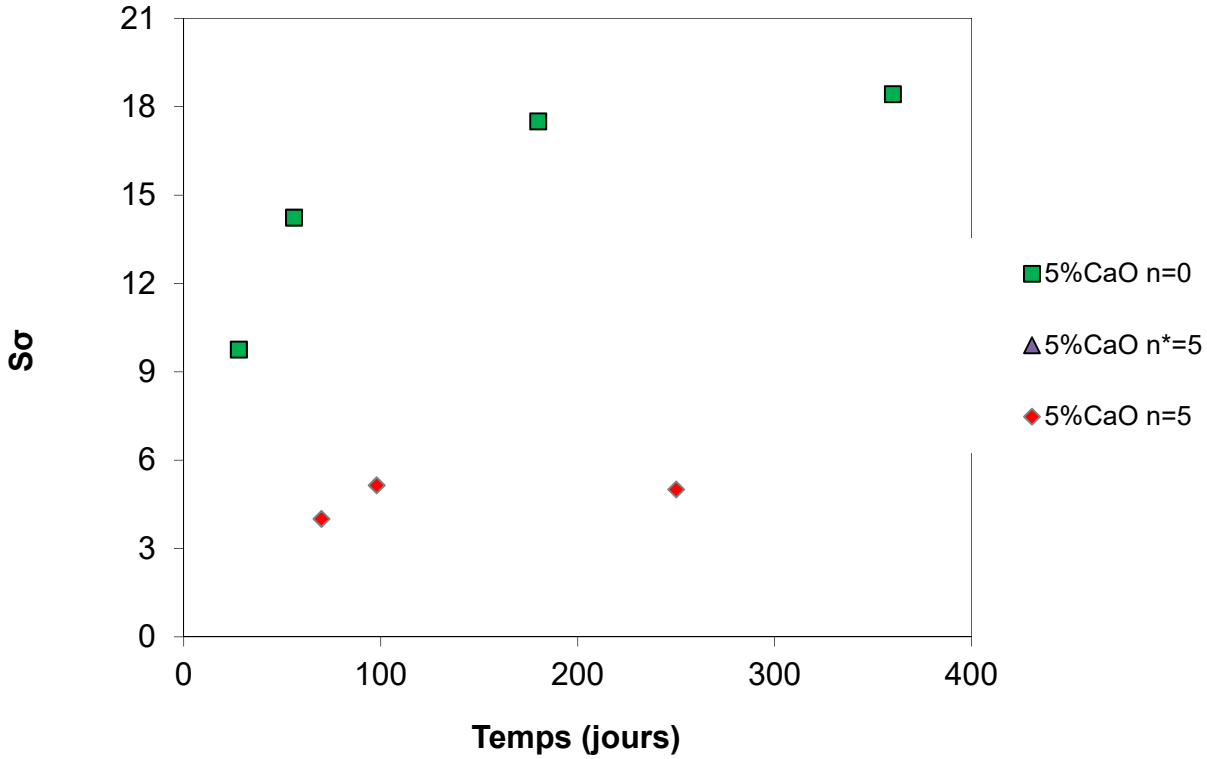


Limite : quel est le degré de cimentation ? Peut-on le quantifier ?

Comment quantifier le degré de cimentation ?

- Approche mécanique macroscopique avec pour référence = le comportement du matériau remanié (1,5 x wL)

5 % *CaO*



Remarques

- Les conditions environnementales peuvent
  - induire des modifications de la microstructure
    - porosité
    - évolution de la minéralogie
  - altérer profondément le comportement sans impact directement quantifiable

- L'analyse de la microstructure doit inclure une analyse
  - de la distribution de la porosité à plusieurs échelles
  - des transformations minéralogiques
  - des conséquences macroscopiques (gonflement / compressibilité, etc.)

Remerciements

F. Masrouri, G. Stoltz, L. Massat, V. Robin, M. Middelhoff, Z. Kaddouri, ...
G. Kervern, S. Gaboreau, M. Pelletier, D. Deneele, N. Consoli, G. Russo, A. Javadi, ...

Références

Massat, L., **Cuisinier, O.**, Bihannic, I., Claret, F., Pelletier, M., Masrouri, F., Gaboreau, S. 2016. Swelling pressure development and inter-aggregate porosity evolution upon hydration of a compacted swelling clay. Applied Clay Science, 124–125, 197–210.

Deneele, D., Le Runigo, B., Cui, Y.-J., **Cuisinier, O.** & Ferber, V. 2016. Experimental assessment regarding leaching of lime-treated silt. Construction and Building Materials, 112, 1032–1040.

Ygzaw, Z.G., **Cuisinier, O.**, Massat, L., Masrouri, F. 2016. Role of different suction components on swelling behavior of compacted bentonites. Applied Clay Science, 120, 81-90.

Robin, V., Javadi, A.A., **Cuisinier, O.** & Masrouri, F. 2015. An effective constitutive model for lime treated soils. Computers and Geotechnics, 66, 189-202.

Stoltz, G., **Cuisinier, O.** & Masrouri, F. 2014. Weathering of lime-treated clayey soil by successive wetting and drying cycles. Engineering Geology, 181, 281-289.

Robin, V., **Cuisinier, O.**, Javadi, A.A. & Masrouri, F. 2014. Chemo-mechanical modelling of lime treated soils. Applied Clay Science, 95, 211-219.

Cuisinier, O., Deneele, D & Masrouri, F., Abdallah, A. & Conil, N. 2014. Impact of high pH fluid circulation on long term hydromechanical behaviour and microstructure of compacted clay from the laboratory of Meuse-Haute Marne (France). Applied Clay Science, 88, 1-9.

Blanck, G., **Cuisinier, O.** & Masrouri, F. 2014. Soil stabilisation with organic non-traditional additives for the improvement of earthworks. Acta Geotechnica, 9, 1111-1122.

Blanck, G., **Cuisinier, O.** & Masrouri, F. 2013. Soil Treatment with Organic Non-traditional Additives for the Reduction of Environmental Impact of Earthworks. Waste and Biomass valorization, 4, 703-708.

Cuisinier, O., Javadi, A.A., Ahangarasr, A. & Masrouri, F. 2013. Identification of coupling parameters between shear strength behavior and chemical's effects with an evolutionary-based data mining technique. Computers and Geotechnics. 48, 107-116.

Stoltz,G., **Cuisinier, O,** & Masrouri, F. 2012. Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage on a lime-treated expansive soil. Applied Clay Science, 61, 44-51.