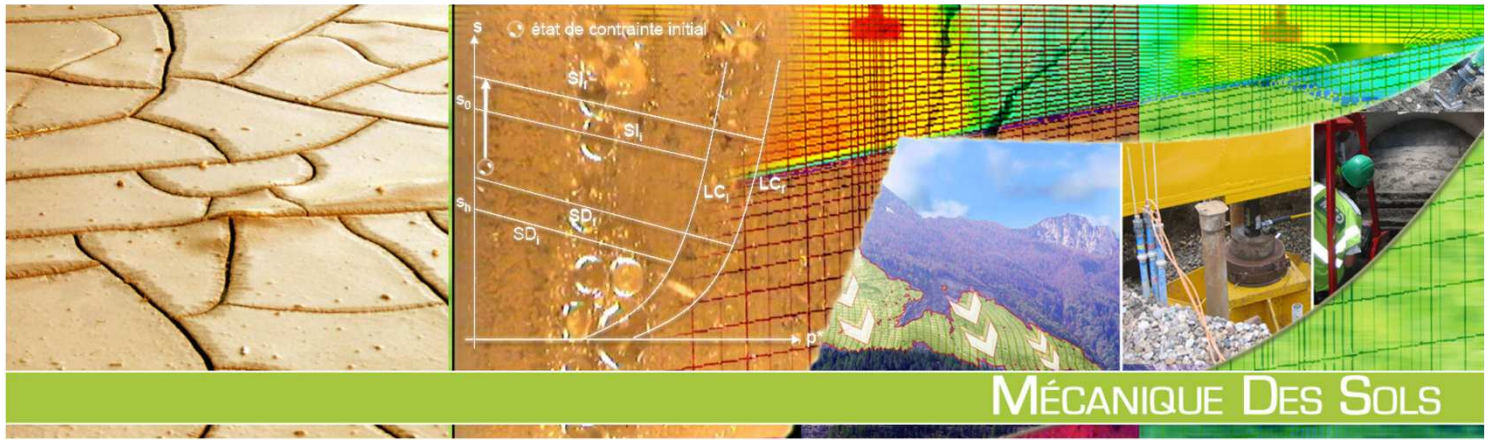
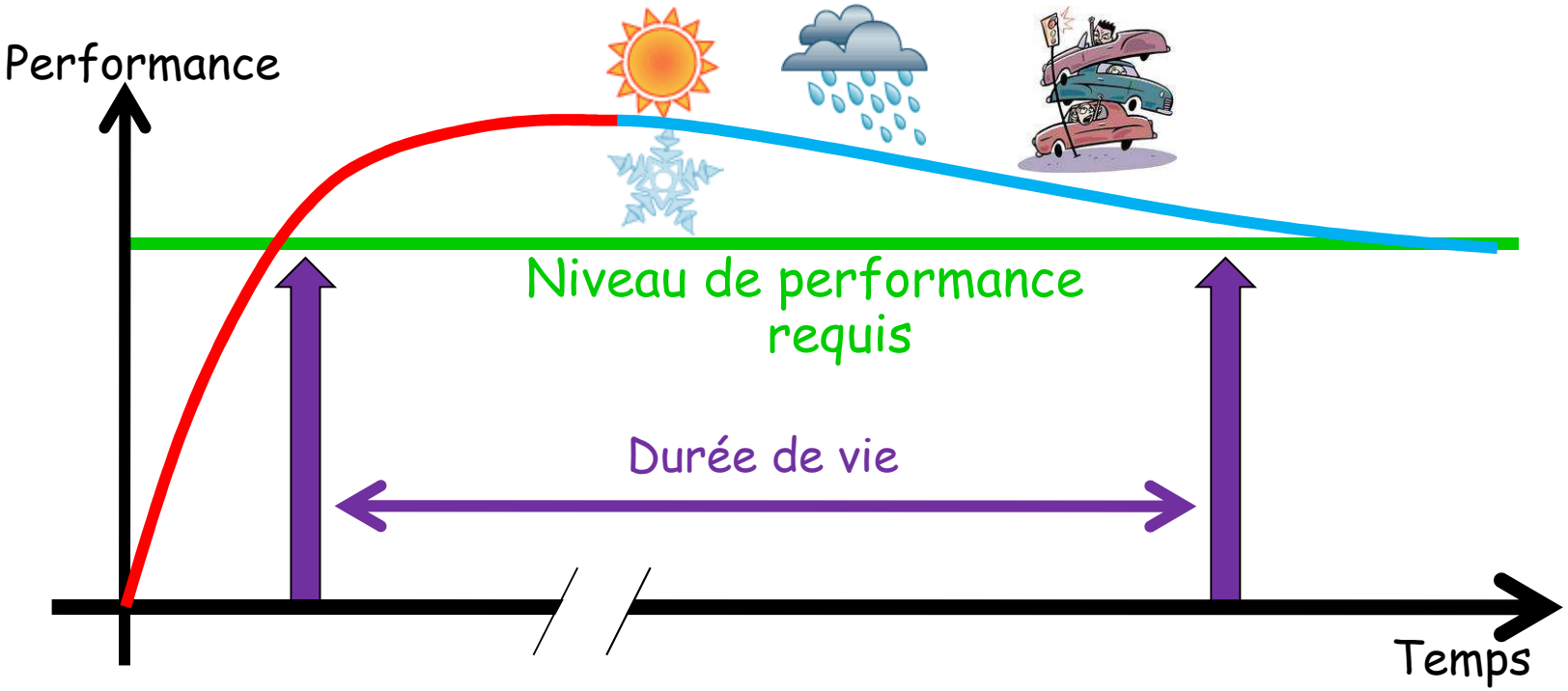


Durabilité des caractéristiques géotechniques des sols traités

Olivier Cuisinier

Comité français de mécanique des sols
Journée technique du 8 avril 2013
« Traitement et amélioration des sols aux liants ou additifs »
FNTP - 3 rue de Berri - 75008 Paris

Une définition de la durabilité

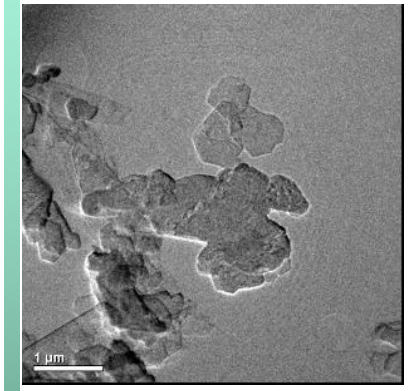


- Phase 1 : le traitement conduit à une augmentation de la performance
- Phase 2 : vie de l'ouvrage avec l'action des agents extérieurs (trafic, gel/dégel, pluie, etc.) qui peuvent altérer progressivement la performance

Pourquoi aborder cette problématique ?

Un problème multi-échelles

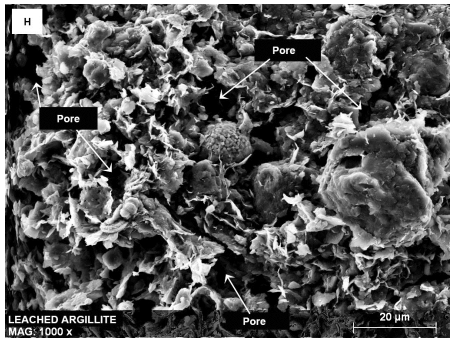
Particules individuelles

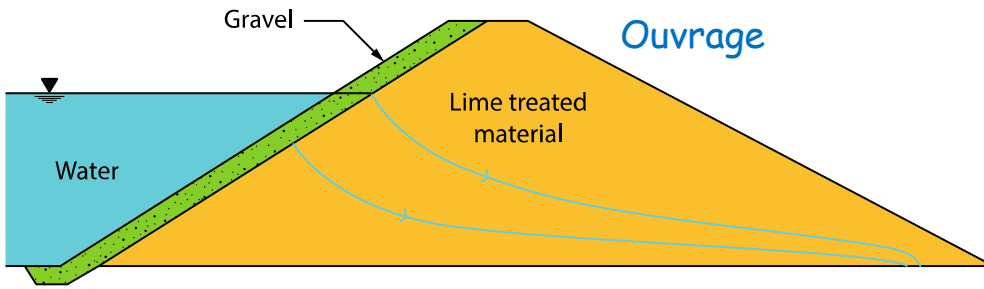


Laboratoire

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

Agrégats





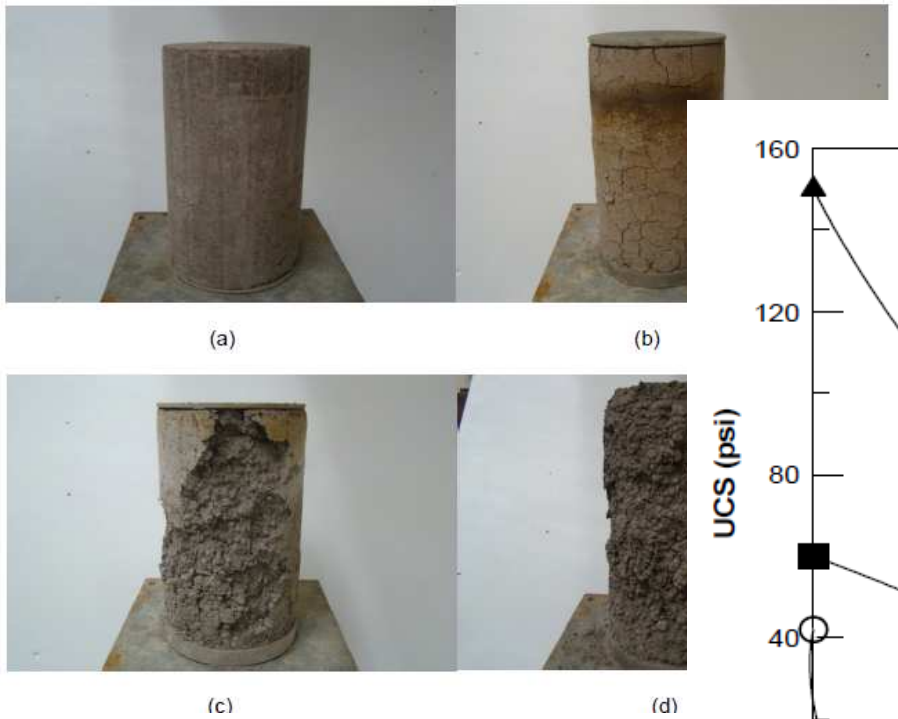
À l'échelle de la particule

- Processus d'amélioration du comportement suite au traitement à la chaux
  - Immédiat (dès la phase de malaxage) :
    - Flocculation : $[Ca^{2+}]$↗, pH ↗
    - …
  - Long terme (quelques heures à plusieurs années après le traitement :
    - Réactions pouzzolaniques = formation de composés cimentaires (CSH, CASH, etc.)

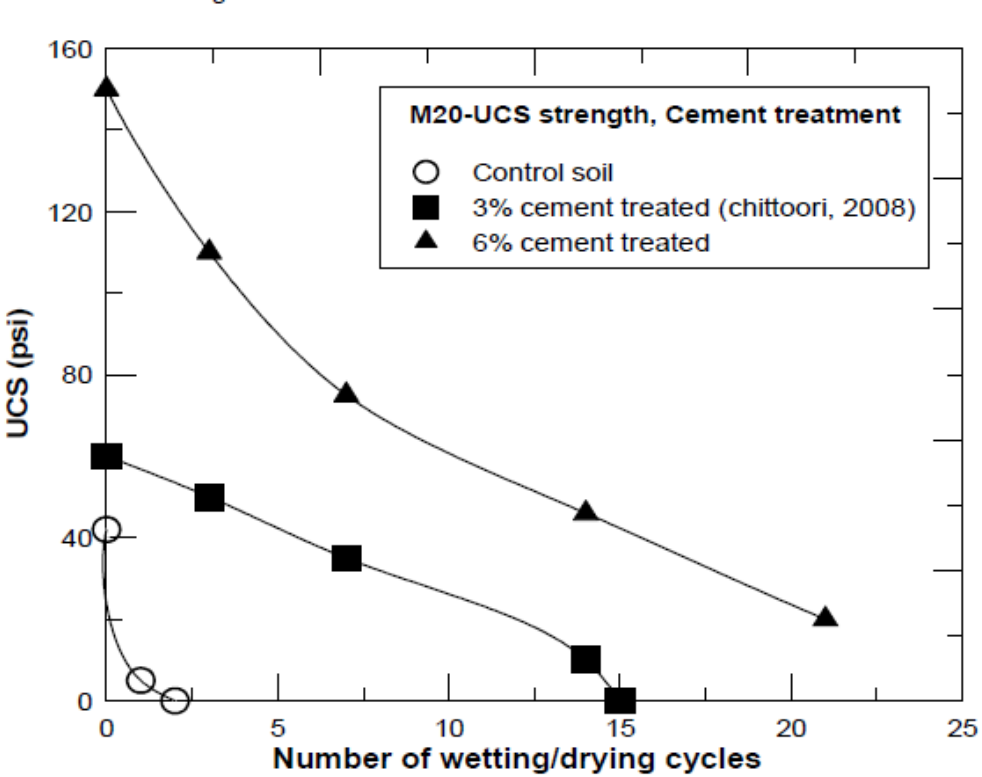
- Que se passe-t-il si les conditions du milieu évoluent (baisse pH, $[Ca^{2+}]$) ?
  - Processus de flocculation = réversible si départ de Calcium
  - Réactions pouzzolaniques : déstabilisation des phases cimentaires dans le temps, dégradation ?

À l'échelle du laboratoire

- Impact de cycles hydriques successifs sur la performance



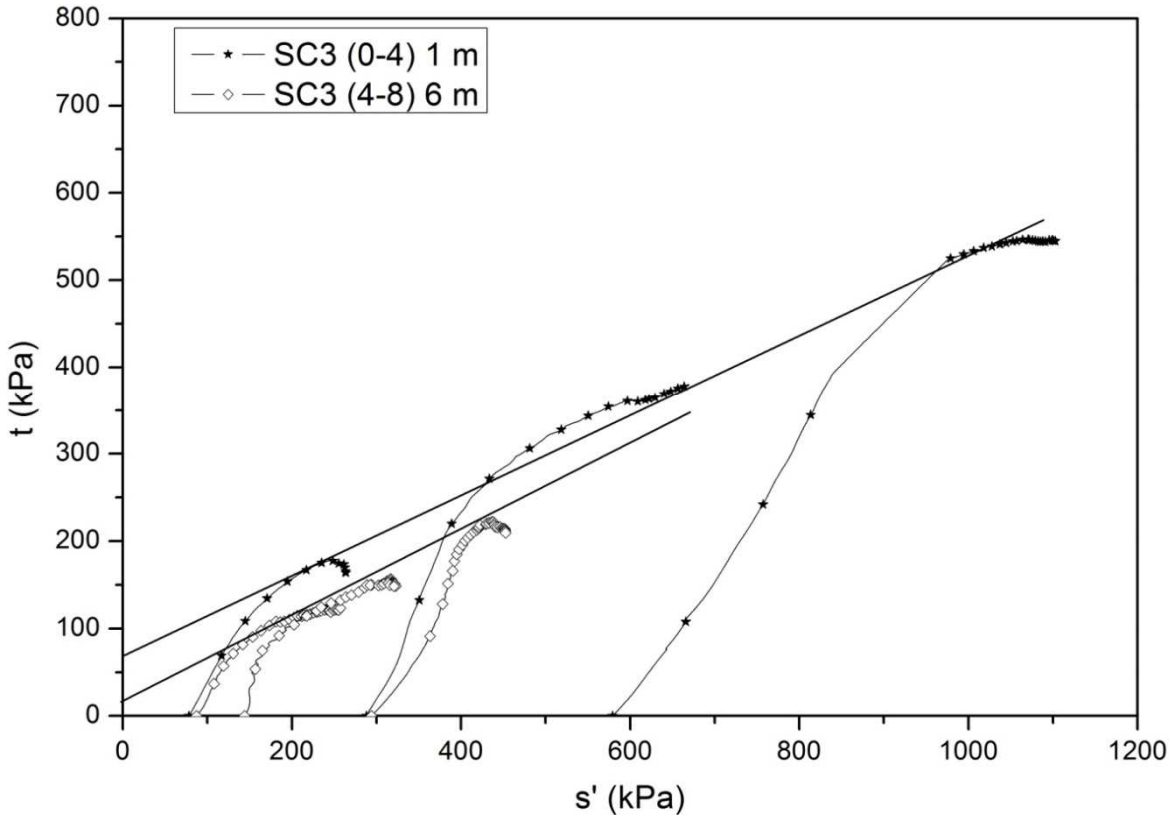
d'après Pedarla 2009



Dégradation progressive des caractéristiques

À l'échelle de l'ouvrage

- Cas d'un matériau traité issu d'un ouvrage réel



Altération possible des caractéristiques, mais qui n'est pas généralisée…

Bilan : comment aborder l'étude de la durabilité

- **Constat** : des sollicitations externes, notamment liées à l'environnement, peuvent altérer les effets du traitement à toutes les échelles
- **Problématique** : assurer un niveau de performance à court et à long termes
- **Moyens d'étude** en laboratoire :
  - Reproduire les sollicitations
  - Quantifier leur impact sur le comportement
- **Paramètres d'étude**
  - Dosage en produit de traitement
  - Caractéristiques de la sollicitation
  - Etc.

Un exemple : argiles traitées à la chaux

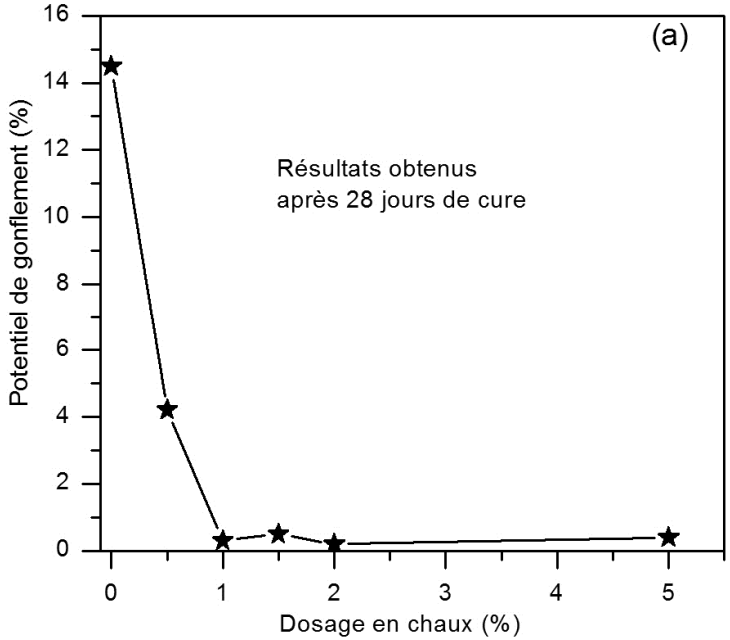
- Le traitement des argiles gonflantes à la chaux permet généralement :
  - de supprimer leur potentiel de gonflement
  - d'améliorer leur comportement mécanique
- Exemple :
  - Cas d'un sol argileux A4 compacté

Caractéristiques	Valeurs
Passant à 80 µm (%)	90
Teneur en argile (2 µm) (%)	70
Densité des grains Gs (-)	2.67
Limite de liquidité (%)	71
Limite de Plasticité (%)	29
Indice de plasticité (%)	42

Dosage en chaux (% CaO)	0%	2%	5%
Masse vol. sèche maxi. ρdi (Mg.m-3)	1.45	1.34	**1.20**
Teneur en eau optimale wi (%)	**26.5**	**32.0**	**37.0**

Impact du traitement à court terme

- Effet de la chaux sur le comportement hydromécanique



- L'ajout de chaux permet à court terme (quelques semaines) :
  - ➔ de supprimer le potentiel de gonflement
  - ➔ d'augmenter les performances mécaniques

Comment évoluent ces performances si le sol traité est soumis à des cycles hydriques?

Impact de cycles hydriques

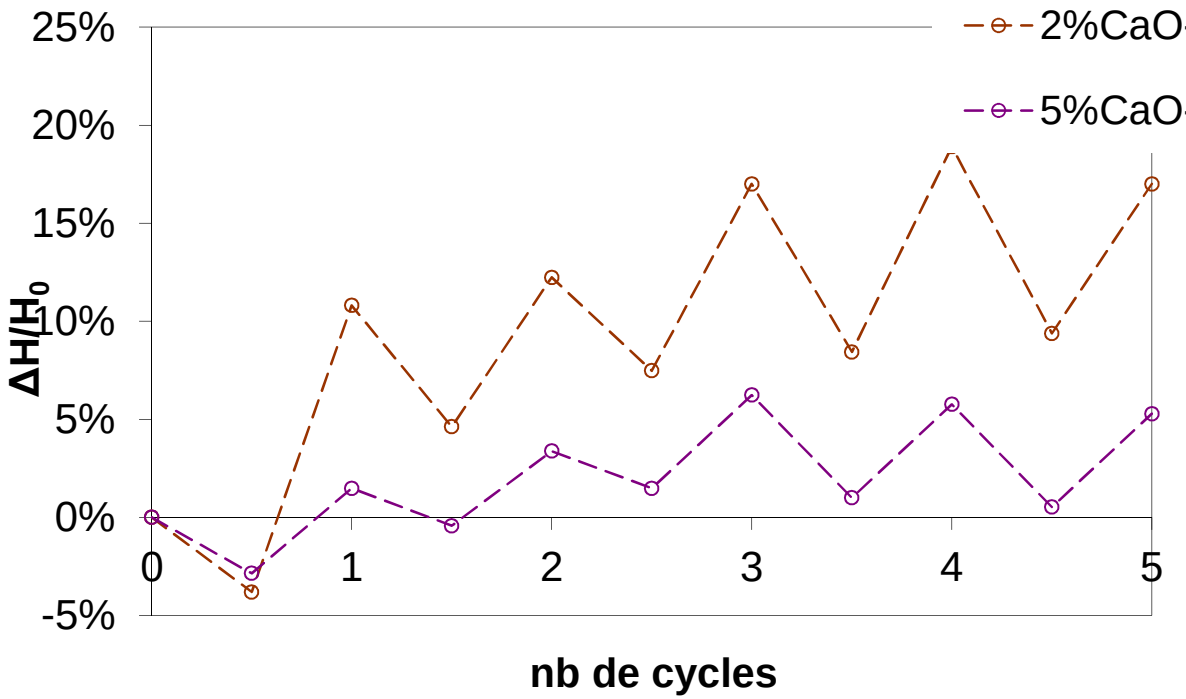
Comment reproduire un cycle hydrique ?

- Étuve, immersion totale (ASTM)

➔ Disparition rapide des effets du traitement

- R

- Techniques de mécanique des sols non saturés
  - Maîtrise des conditions



he des

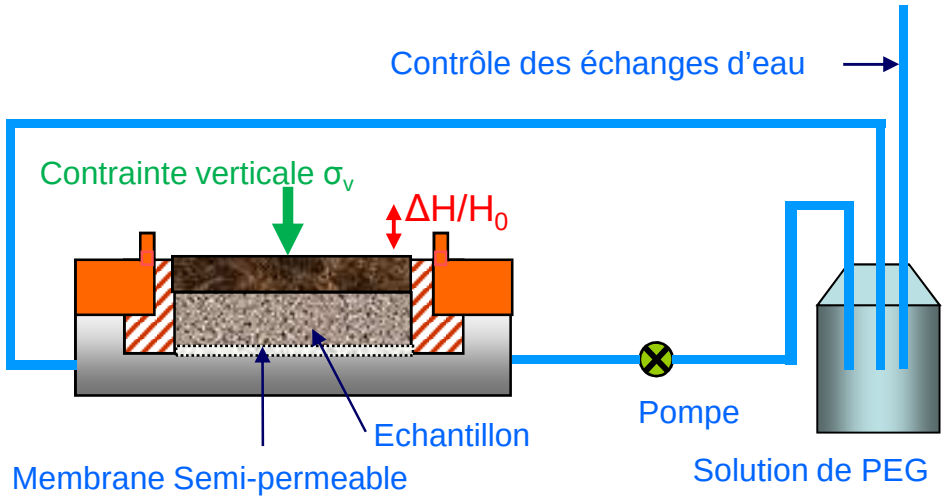
lité

turés

\Pa)

Méthode osmotique

- Oedomètres osmotiques :
  - Permet de mesurer les variations volumiques d'un échantillon de sol dans une cellule et soumis à une succion

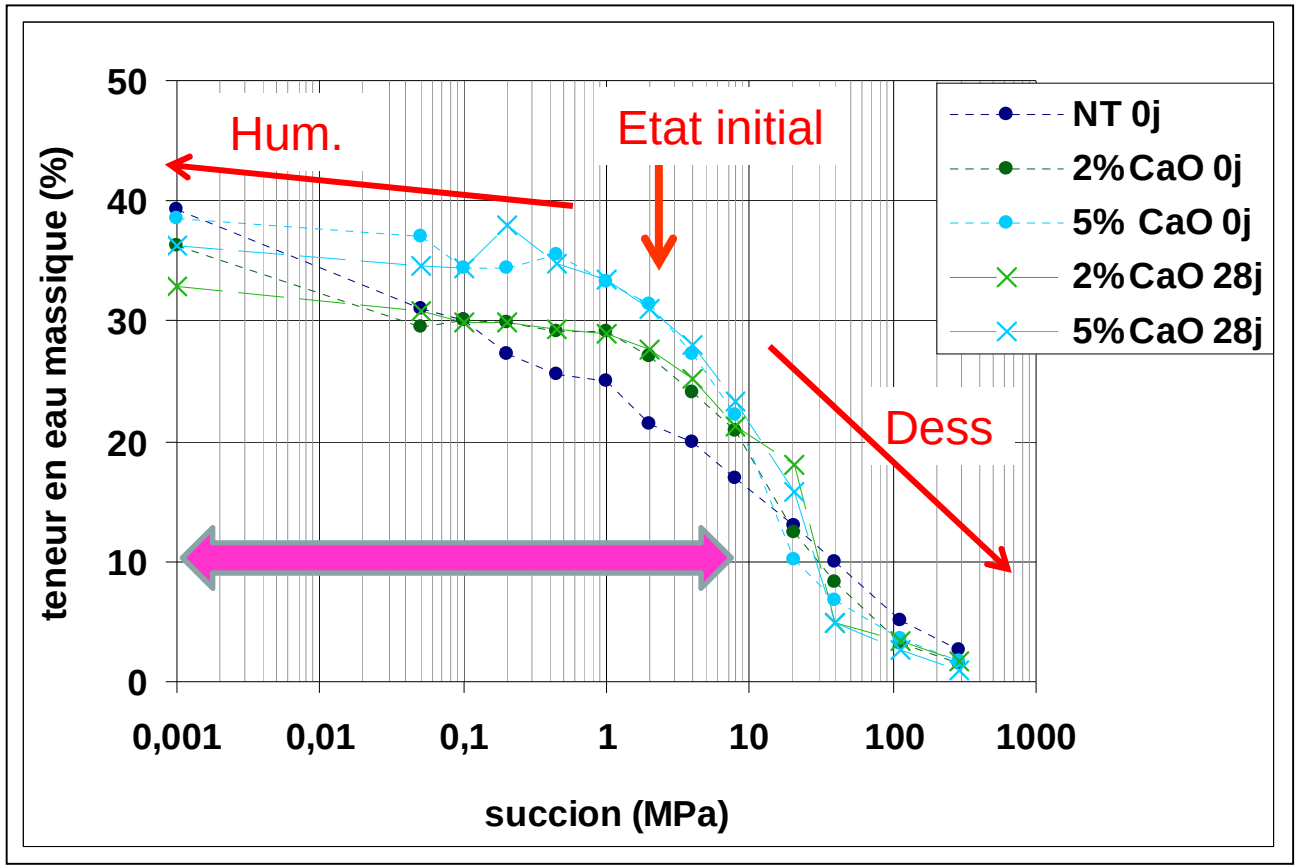


  - Permet d'appliquer un chargement mécanique ⇒ détermination de la contrainte apparente de préconsolidation du sol (accès à une caractéristique mécanique)

Les cycles ont été réalisés entre 0 et 8 MPa de succion

Intensité de la sollicitation - osmotique

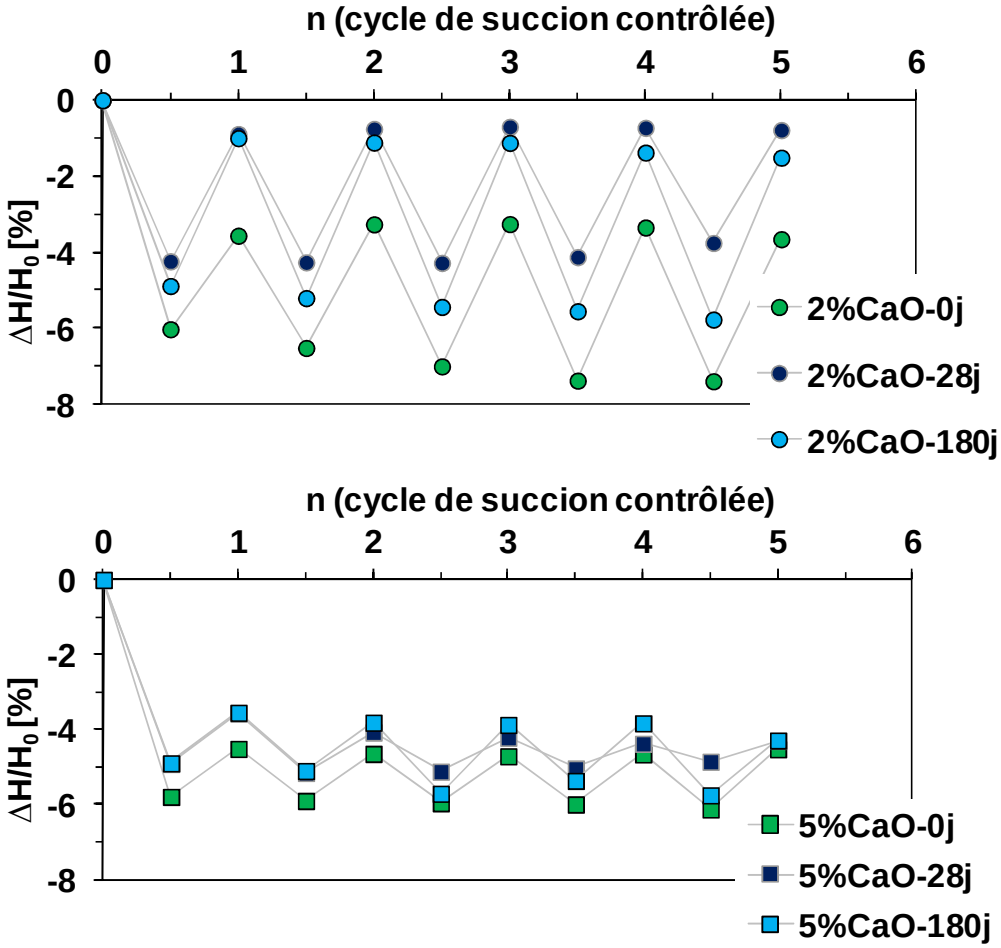
- Utilisation de la courbe de rétention



- À un cycle hydrique entre 0 et 8,5 MPa correspond une variation de teneur en eau massique de l'ordre de
  - 15 % pour un dosage de 2 %
  - 12 % pour un dosage de 5 %

Comportement volumique

- Comportement volumique entre la saturation et s = 8,5 MPa



Stoltz et al. ACS 2012

Bilan :

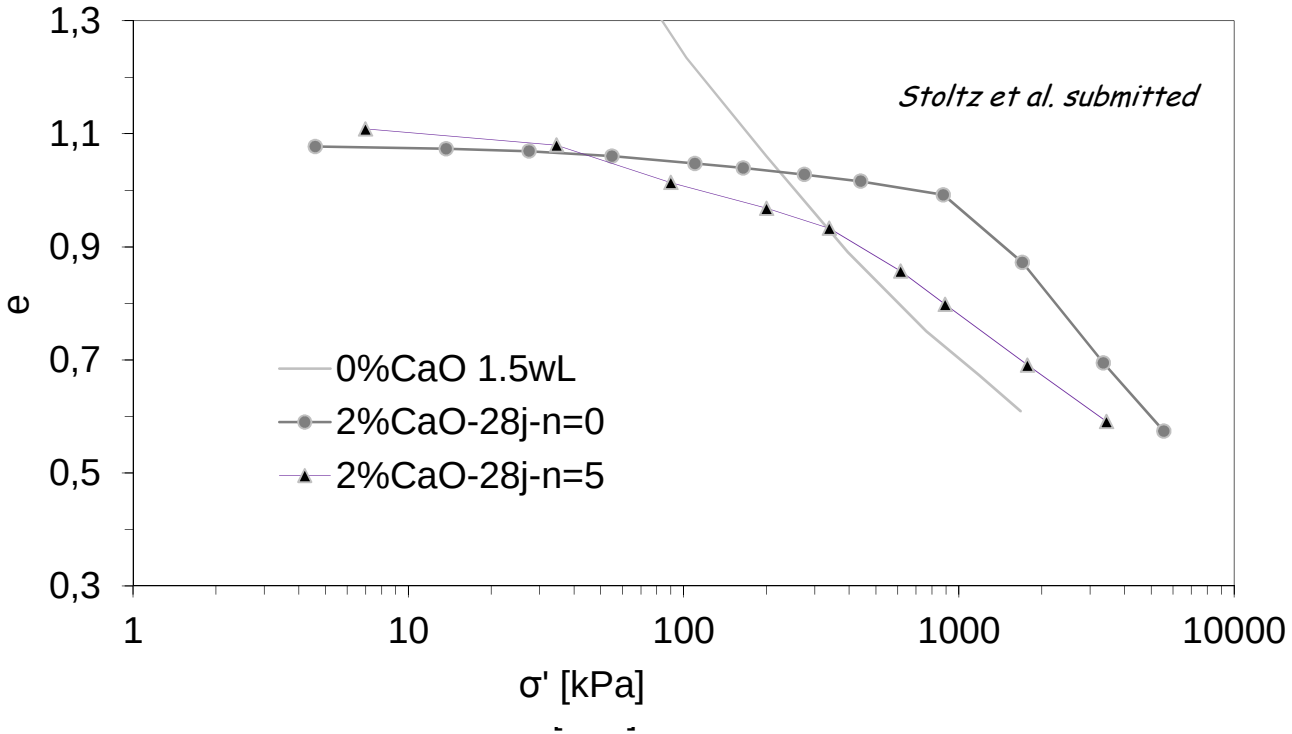
- Stabilité du comportement volumique sur 5 cycles
- Impact très limité du temps de cure préalable

Compressibilité

- Comment évolue le comportement mécanique suite à la sollicitation hydrique cyclique ?

  ➔ chargement mécanique œdométrique après les cycles, état saturé

5 % CaO

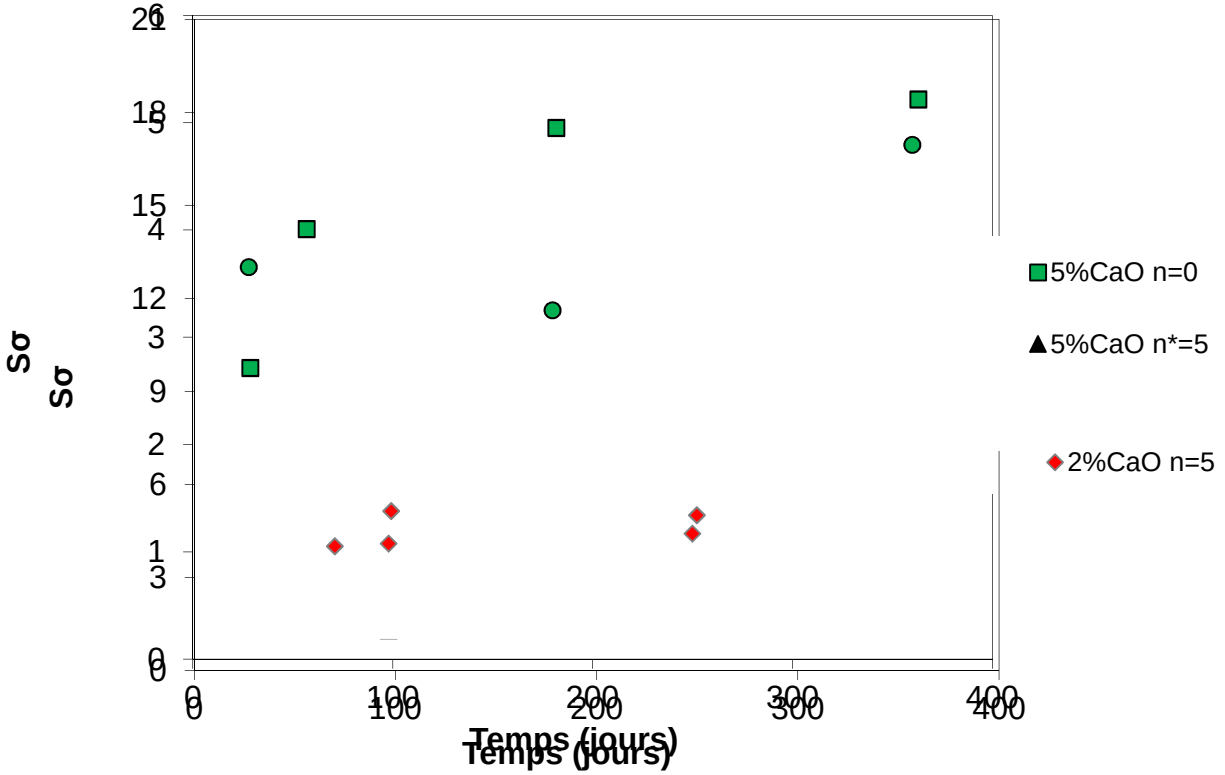


- Altération de la performance mécanique suite aux cycles hydriques
  - Disparition des effets du traitement pour un dosage de 2 %
  - Altération partielle pour un dosage de 5 %

Compressibilité

- Comment évolue le comportement mécanique suite à la sollicitation hydrique cyclique ?
  - Quantification de la structure selon la méthode proposée par Gasparre et Coop (2007)

5 % CaO

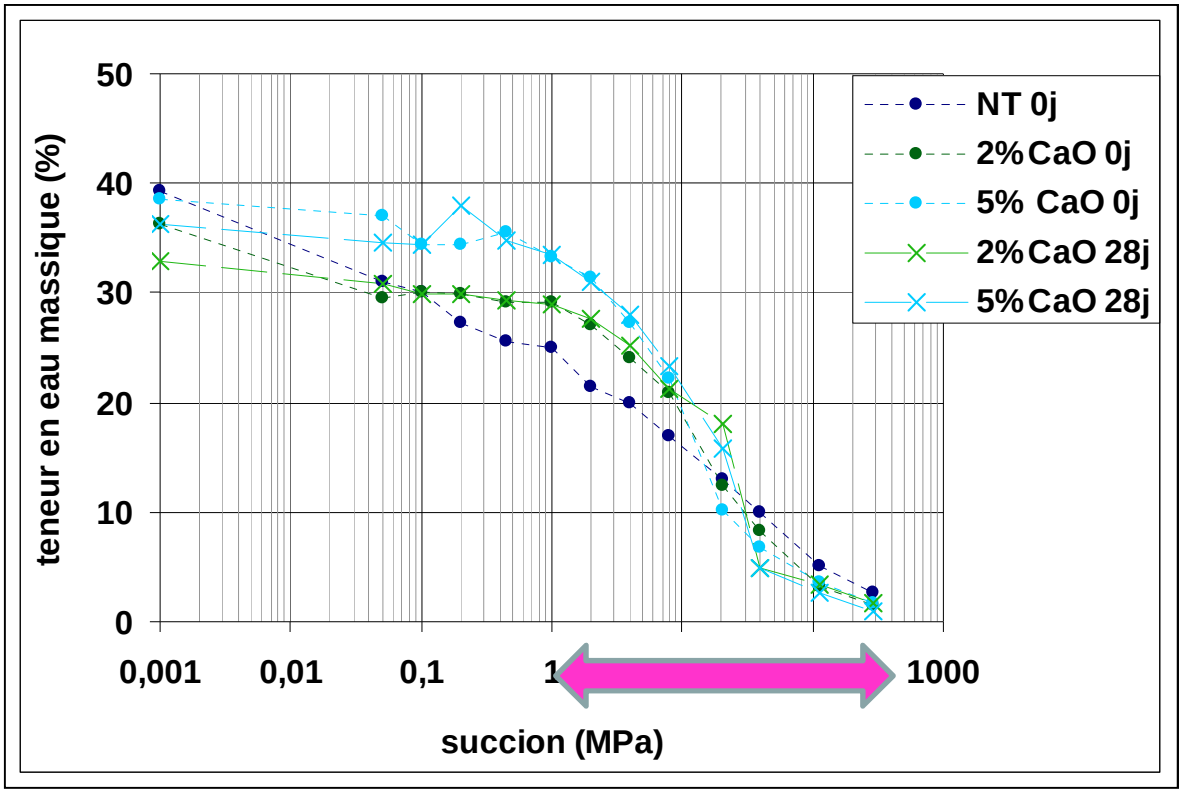


- Le dosage de 5 % limite l'impact des cycles hydriques sur la performance

Impact de l'amplitude des cycles hydriques

➔ Utilisation de la méthode des solutions salines saturées

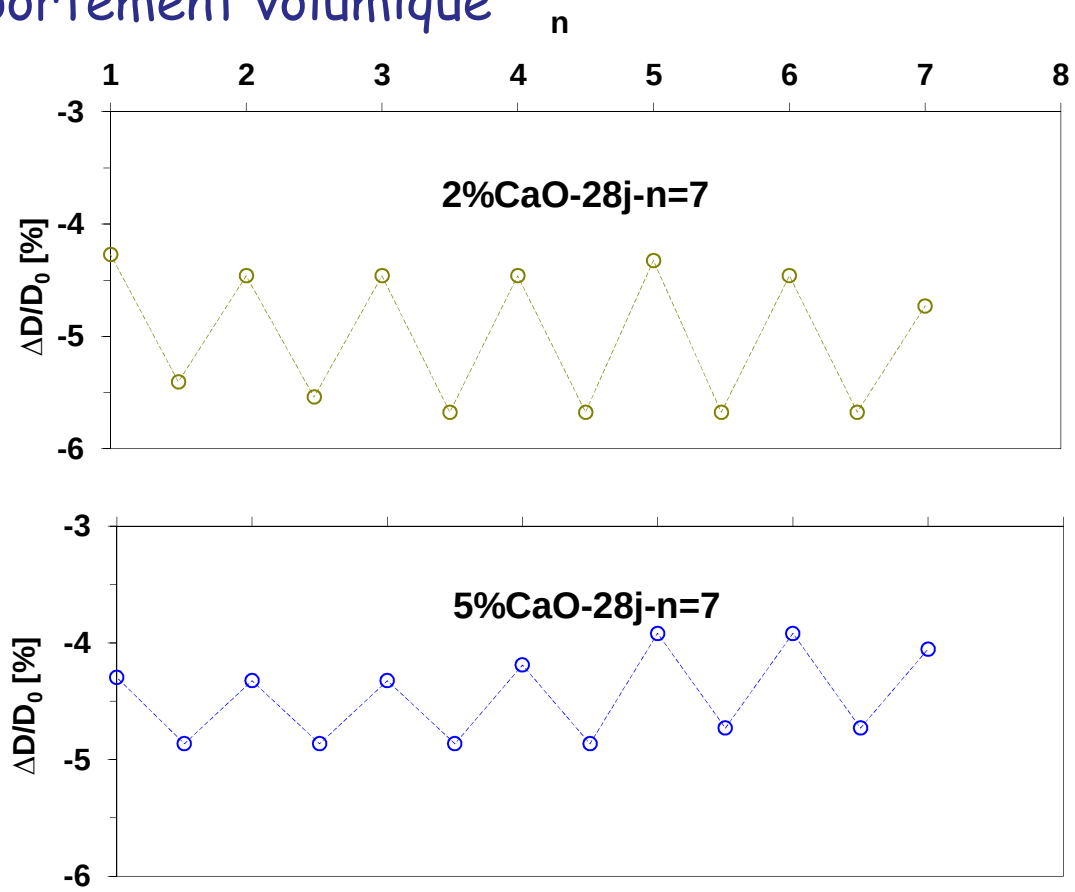
➔ Cycles entre 2,3 MPa (HR = 95 %) et 113 MPa (HR = 40 %)



- Un cycle hydrique entre 2,3 et 113 MPa correspond variation de teneur en eau massique de l'ordre de 25 % pour les deux dosages

Impact de cycles hydriques

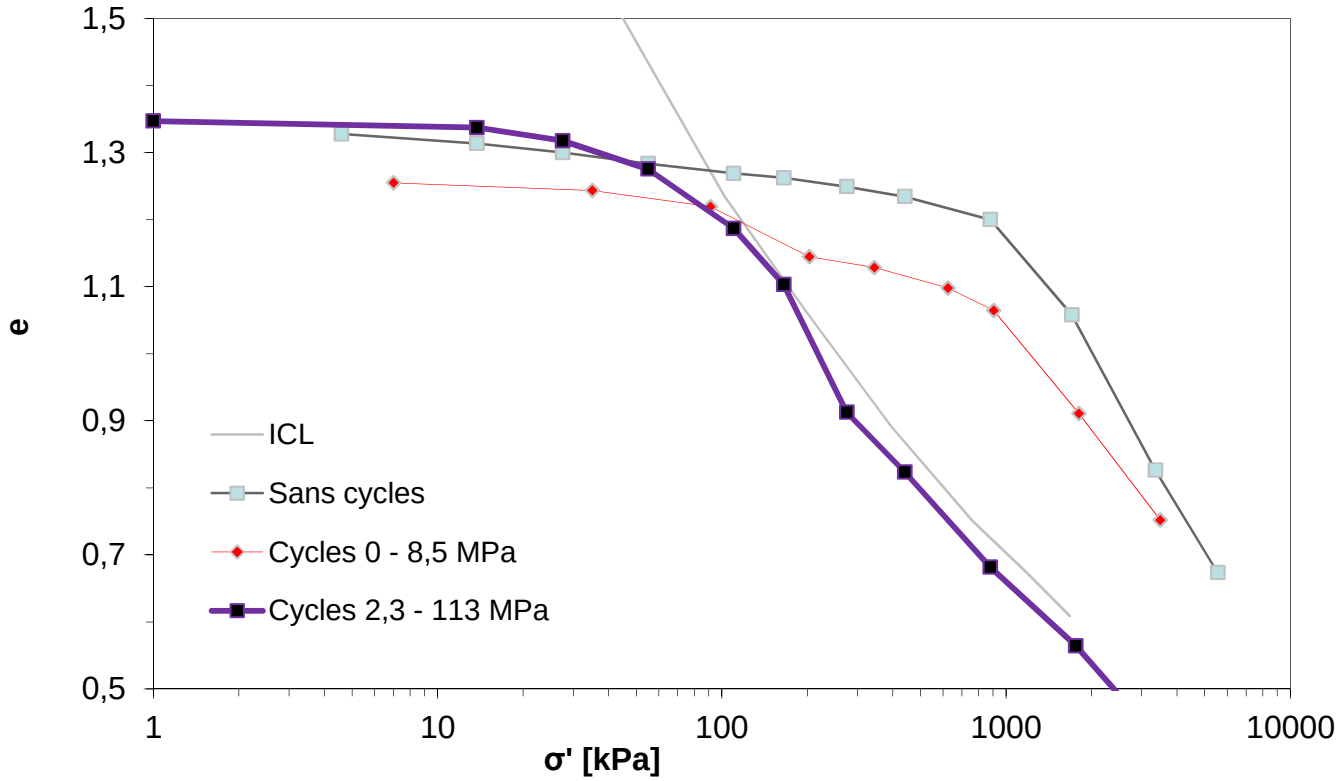
- Impact de l'amplitude de la sollicitation
  - Comportement volumique



- Légère augmentation de l'amplitude de gonflement / retrait au cours des cycles

Impact des cycles hydriques

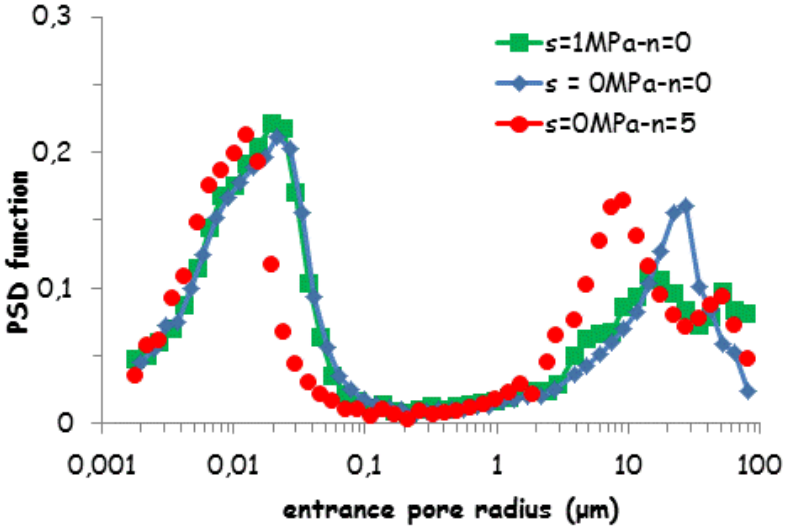
- Impact de l'amplitude de la sollicitation
  - Comportement mécanique (exemple avec 5 % de chaux)



- L'effet de la cimentation a totalement disparu pour le sol traité à 5 %

Mécanismes en jeu

- Altération mécanique
  - Déstructuration ➔ rupture des « points » de cimentation entre agrégats (analyse physico-chimique / texturale)
  - Échelle des agrégats



- Comportement volumique
  - Effet immédiat de la chaux lié au pH et à l'augmentation de [Ca]
  - Système ouvert (ASTM) avec immersion, départ de calcium, « retour » du gonflement
  - Système où l'échange de calcium est limité (osmotique, solution saline), la quantité de calcium évolue peu, maintient de l'effet sur le gonflement

Conclusions

- Les deux dosages en chaux appliqués permettent à court terme:
  - De supprimer le gonflement
  - D'augmenter les performances mécaniques
- Les cycles hydriques peuvent conduire à une altération du comportement mécanique d'une argile traitée à la chaux
- Un plus fort dosage en chaux permet une meilleure tenue des performances mécaniques quand le sol argileux est soumis à une accumulation de cycles hydriques
- L'intensité de la sollicitation ainsi que le dosage sont déterminants pour l'intensité de l'altération

Pour appréhender la durabilité

- L'évolution de la performance d'un sol traité dans le temps dépendra des conditions auxquelles il est soumis
  - Cycles hydriques : échange d'eau liquide ou vapeur, système ouvert ou fermé, amplitude, etc.
  - Circulation d'eau : quelle eau ? Quelles conditions ?...
  - Thermiques
  - etc.
- En laboratoire, les essais doivent chercher à s'approcher des conditions réalistes
  - Les essais accélérés peuvent s'avérer extrêmement pénalisants
  - Prendre en compte le couplage entre les processus physico-chimiques et le comportement géotechnique
  - Passage du laboratoire à la réalité du terrain

Lemta

Merci pour votre attention

TerDOUEST 2013

18-19 juin / *June 18-19th* 2013

Marne La Vallée, France

Colloque

« Le traitement des sols pour un terrassement durable »

Seminar

« Treated soils for sustainable earthwork »