

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Microstructure d'une argile gonflante traitée à la chaux

## Microstructure of a swelling clay treated with lime

S.Khattab<sup>1</sup>, M.Al-Mukhtar<sup>1</sup>, J.-M.Fleureau<sup>2</sup>, J.F.Alcover<sup>1</sup> & F.Bergaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre de Recherche sur la Matière Divisée (CRMD - CNRS), rue de la Férollerie, 45071 Orléans Cedex 2

<sup>2</sup>Ecole Centrale Paris (labo MSS-MAT), Grande Voie des Vignes, 92295 Chatenay-Malabry Cedex

**RESUME :** La chaux est utilisée avec succès pour améliorer les propriétés mécaniques des argiles. Dans cette étude, la chaux hydratée est choisie pour contrôler le gonflement d'une argile plastique de type Ca-montmorillonite. Les effets de la densité initiale, de la teneur en eau initiale et de la quantité de chaux ajoutée sur la pression de gonflement ont été analysés. Les modifications texturales, de quelques nm à  $\mu\text{m}$  et structurales ont été étudiées par différentes techniques. La diffraction des rayons X montre le changement de la texture à l'échelle des feuillets et la transformation minéralogique dans l'argile traitée. Les essais de porosimétrie au mercure permettent de suivre l'évolution de la distribution porale et du volume poral. Les résultats obtenus montrent l'effet bénéfique des faibles pourcentages de chaux ajoutée sur la pression de gonflement (réductions allant jusqu'à 95 %). L'analyse de l'effet des paramètres étudiés montre des changements importants au niveau de la microstructure et permet d'expliquer les modifications dans le comportement macroscopique de l'argile testée.

**ABSTRACT:** Lime is used successfully to improve the mechanical properties of clays. In this study, hydrated lime was chosen to limit the swelling of a highly plastic Ca-montmorillonitic clay. This paper is aimed to obtain a coupled micro-macroscopic data on the behaviors of lime-stabilised swelling materials. The constant volume swelling pressure measurements were carried out using a new developed apparatus. Tests using compacted lime-treated and untreated samples with different initial moisture contents, dry densities, percentages of lime were carried out to evaluate these effects on swelling capacity. Then, textural and structural changes (particles organization, pore spaces from nm to  $\mu\text{m}$ ) were studied using X-ray diffraction and mercury porosity intrusion tests. The results obtained demonstrate the positive effect of lime on the swelling pressure (up to 95% reduction). Changes induced at the microscopic level were detected and analysed. They provide a clear explanation of the differences in macroscopic behavior induced by the studied variables.

## 1. INTRODUCTION

Les variations volumiques (gonflement et tassement) des sols argileux provoquent de graves et coûteux dommages aux constructions du génie civil. Plusieurs méthodes ont déjà été proposées afin d'améliorer les propriétés des sols parmi lesquelles l'utilisation des produits chimiques.

L'étude réalisée s'intéresse à l'effet de la chaux (produit largement utilisé car très répandu et bon marché) sur le gonflement de l'argile. L'action de la chaux est d'améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques des sols par des réactions consécutives : l'hydratation de la chaux vive (CaO), floculation, échange ionique, carbonatation, et réaction pouzzolanique (cimentation). Ces réactions peuvent durer quelques années et modifient de façon irréversible le matériau traité (Ingles et Metcalf 1972, Little 1995, Bell 1996).

Cet article présente, une étude couplée entre le comportement macroscopique, notamment le gonflement, et les propriétés microscopiques des argiles. En effet, peu d'études se sont intéressées aux modifications induites par les contraintes hydromécaniques au niveau microscopique, textural et microstructural (Gedney et al. 1987, Arabi and Wild 1989, Al-Mukhtar 1995, Al-Mukhtar et al. 1996,).

La compréhension des mécanismes d'interaction chaux – argile, avant et après gonflement, et ceci à toutes les échelles, permet d'expliquer et d'analyser le comportement macroscopique en vue d'améliorer l'efficacité du traitement des argiles par la chaux à court terme et à long terme.

## 2. MATERIAU ET MOYENS EXPERIMENTAUX

Le matériau étudié est une argile très plastique; smectite calcique (limite de liquidité 95-120% et indice de plasticité 65-85%) dont la capacité d'échange est de 50-60 meq/100 g. Son poids volumique sec maximal à l'essai Proctor est de 13,2 kN/m<sup>3</sup> pour une teneur en eau optimale de 32%. Pour le traitement de cette argile, une chaux hydratée très fine et pure a été utilisée.

Un dispositif spécifique de mesure de la pression de gonflement à déformations pratiquement nulles a été développé (Khattab et al. 2000). Les dimensions des échantillons testés dans l'appareil sont de 10 mm de hauteur et 65 mm de diamètre. Des anneaux dynamométriques sont employés pour la mesure de la pression de gonflement.

Les mesures de porosité au mercure ont été effectuées grâce à un appareil « Poresizer 9320 » qui peut théoriquement, explorer des espaces poreux de dimensions 350  $\mu\text{m}$ - 3,6 nm. Les enregistrements de DRX ont été réalisés à l'aide d'un diffractomètre Siemens avec une radiation de Cu-K $\alpha$  filtrée.

## 3. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

### 3.1 Pression de gonflement ( $P_g$ )

Les figures 1, 2 et 3 représentent l'évolution de  $P_g$  selon l'état initial de compactage et le dosage en chaux. La  $P_g$  des trois échantillons qui figurent sur la courbe de compactage (28,8% –

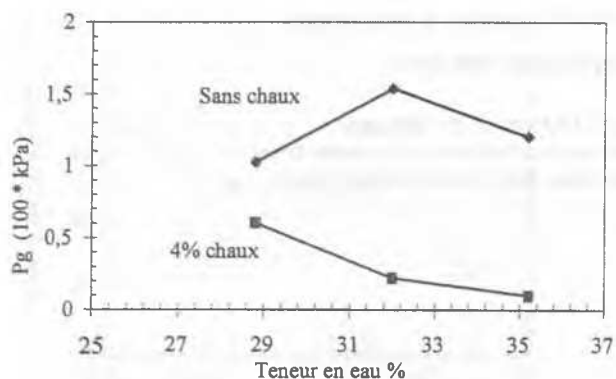


Figure 1 Pression de gonflement (Pg) des échantillons traités et non traités sur la courbe Proctor

12,7 kN/m<sup>3</sup>; 32% - 13,2 kN/m<sup>3</sup>; 35,5% - 12,6 kN/m<sup>3</sup>: teneur en eau initiale  $w_{init}$  et poids volumique sec  $\gamma_d$  respectivement) montre que, sans traitement, la Pg la plus élevée se situe pour l'échantillon ayant le  $\gamma_d$  le plus important. Cette pression est plus faible dans les deux autres échantillons, compactés du côté humide ou du côté sec. Avec un traitement de 4% de chaux, la Pg diminue considérablement dans tous les échantillons. Cette réduction de la Pg (40 – 90 %) est plus forte du côté humide que du côté sec. La conjugaison de faibles  $w_{init}$  et  $\gamma_d$  expliquerait la faible réduction de la Pg du côté sec.

La figure 2 montre la Pg de cinq échantillons compactés à un  $\gamma_d$  initial identique de 13,2 kN/m<sup>3</sup>. On constate que la Pg diminue avec l'augmentation de la teneur en eau dans les échantillons traités et non traités. La forte succion qui induit une adsorption plus importante dans les échantillons compactés à faible teneur en eau initiale semble être à l'origine de la forte Pg dans ces échantillons. L'adjonction de la chaux dans l'argile testée réduit la Pg d'autant plus que la  $w_{init}$  est importante (réduction de 10 à 95%). Ce comportement est interprété par une efficacité accrue du traitement à la chaux en présence d'eau.

L'effet des différents pourcentages de chaux ajoutée à des échantillons compactés à l'OPN est présenté sur la figure 3. On constate que la chaux diminue la Pg régulièrement jusqu'à 4%; au-delà de ce pourcentage la Pg se stabilise. Ceci indique qu'il existe une quantité optimale et suffisante de chaux requise pour obtenir une réaction avec cette argile. Des mesures du pH de la solution chaux-argile (Eades et Grim 1966) ont montré qu'effectivement au-delà de 4%, de chaux le pH mesuré (qui est de 12,4), reste inchangé lors de l'addition de chaux. Cette quantité de chaux supplémentaire est inutile car elle reste libre et ne participe pas à la réaction chimique avec l'argile.

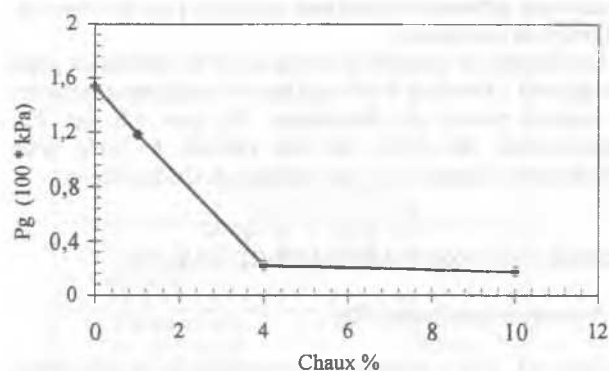


Figure 3 Effet de la chaux sur la pression de gonflement (Pg) des échantillons compactés à l'OPN

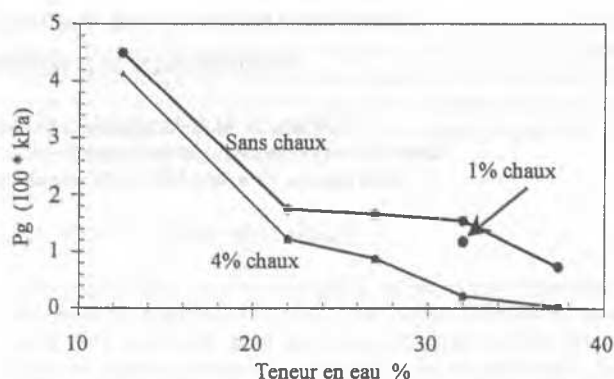


Figure 2 Pression de gonflement (Pg) des échantillons traités et non traités à  $\gamma_d$  identique = 13,2 kN/m<sup>3</sup>

### 3.2 Conductivité hydraulique

Des mesures, de conductivité hydraulique à charge variable, des échantillons préparés à l'OPN, traités à la chaux et saturés sans variation de volume, ont été réalisées. La figure 4 montre que cette conductivité augmente nettement avec la chaux jusqu'à un pourcentage optimal d'adjonction de chaux dans l'argile qui est de 4%. La conductivité est multipliée pratiquement par 1000 pour 4% de chaux. Cette augmentation est peut-être due à la réorganisation texturale moins orientée selon l'axe de compactage et comportant vraisemblablement plus d'espace poral. La désorientation est la conséquence de la réaction chaux-argile, notamment de la dissolution des minéraux argileux. L'addition d'une quantité de chaux supérieure à 4% et qui ne réagit pas avec l'argile, pourrait avoir comme effet de réduire l'espace poral et, par conséquent, de diminuer la conductivité hydraulique dans l'échantillon traité avec 10% de chaux.

### 3.3 Porosité au mercure

Les résultats obtenus sur les échantillons testés à une densité initiale sèche identique ( $\gamma_d$  maximale de la courbe Proctor) montrent, pour tous les échantillons traités et non traités (Figures 5A et 5B), une distribution porale bi-modale. Dans les échantillons traités, les "gros" pores (> 6 $\mu$ m) sont fortement réduits, notamment pour l'échantillon compacté du côté sec de la courbe Proctor. Les pores de faible dimension (< 0,1  $\mu$ m) restent pratiquement inchangés dans tous les échantillons traités et non traités. Les pores de dimension intermédiaire (0,1  $\mu$ m < diamètre < 6 $\mu$ m) augmentent généralement dans les échantillons traités.

Une analyse plus fine (tableau 1) montre que, dans les échantillons non traités, le volume total des pores diminue avec l'augmentation de la teneur en eau initiale. Dans les trois

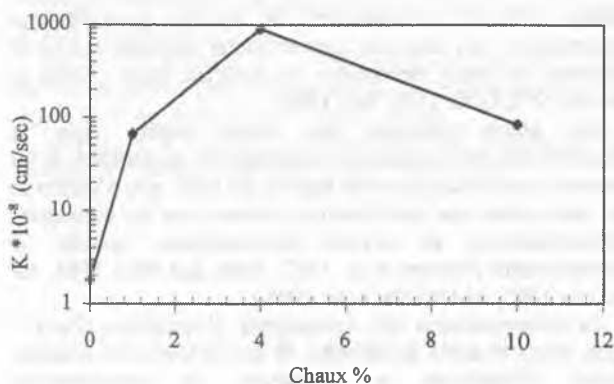


Figure 4 Effet de la chaux sur la perméabilité (K) à saturation des échantillons compactés à l'OPN

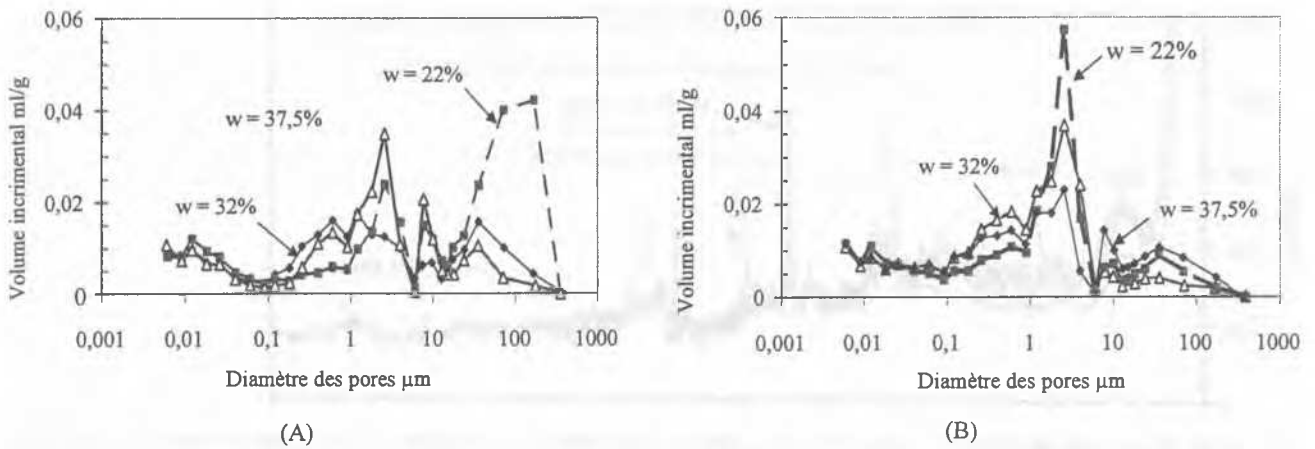


Figure 5 Effet d la chaux sur la distribution porale des échantillons compactés à l'OPN, non traités (A) et traités (B)

échantillons traités, le volume total des pores est pratiquement identique quelle que soit cette teneur en eau. Donc, sans traitement, l'effet de la teneur en eau initiale est prépondérant sur le volume des pores. En effet, dans ces échantillons, la présence de l'eau favorise une organisation plus serrée de la texture. Avec traitement à la chaux, l'effet de la teneur en eau initiale dans les échantillons testés est réduit car la chaux consomme de l'eau pour sa réaction instantanée (floculation, échange ionique, carbonatation et cimentation). De ce fait, les échantillons compactés à  $\gamma_d$  initial identique ont un volume poral pratiquement identique, quelle que soit leur teneur en eau. La comparaison des échantillons traités et non traités, compactés dans des conditions identiques (mêmes  $w_{init}$  % et  $\gamma_d$ ) montre qu'à faible teneur en eau le volume total des pores diminue avec l'incorporation de la chaux. En revanche, dans les deux autres échantillons, le volume total des pores augmente avec le traitement. Ceci pourrait expliquer l'augmentation de la perméabilité dans les échantillons compactés à l'OPN et traités à avec différents pourcentages de chaux.

### 3.4 Diffraction des rayons X

La figure 6 montre l'influence de la chaux sur trois échantillons compactés à l'OPN : l'un est non traité et les deux autres sont traités à 4% et à 10% de chaux. On constate que le premier pic,  $d_{001}$ , se situe entre 16 et 17,5Å pour les trois échantillons. Ces distances correspondent de 2 à 3 pseudo-couches d'eau interfoliaire. L'analyse montre que, dans l'échantillon non traité, il y a en majorité 3 pseudo-couches d'eau alors que, dans les échantillons traités, il y a en majorité, 2 pseudo-couches d'eau. Cette évolution indique que la chaux a absorbé une partie de l'eau interfoliaire pour son interaction avec l'argile. Cette figure montre également peu de variations dans les raies hk, ce qui signifie peu de différences dans l'organisation, la taille des particules et dans l'orientation au niveau textural interparticulaire. Le changement minéralogique est à observer grâce à l'apparition de nouveaux pics de calcite dans les échantillons traités issues de la réaction de carbonatation avec le  $CO_2$  de l'air. Enfin, dans l'échantillon traité avec 10% de chaux, on constate l'apparition de bandes indiquant la présence de la

chaux libre. Ceci confirme les résultats macroscopiques qui montrent peu de changement pour des additions de chaux au-delà de 4% qui ne participe pas à la réaction avec l'argile.

### 4. CONCLUSION

Cette étude montre que le traitement avec de la chaux hydratée d'une argile plastique calcique réduit considérablement la pression de gonflement de cette argile quel que soit l'état hydromécanique initial. Cette réduction est d'autant plus importante que la teneur en eau initiale est élevée, et peut atteindre 95% de  $P_g$  initiale. Cependant, la pression de gonflement diminue dans les argiles traitées et non traitées avec l'augmentation de la teneur en eau. Au-delà d'un certain pourcentage de chaux correspondant à un pH limite, la chaux en excès ne réagit plus avec le matériau et ne diminue pas davantage le gonflement. La conductivité hydraulique de l'argile augmente avec l'addition de la chaux jusqu'à 4%. Ensuite, un excès de chaux qui, probablement, referme certains pores, fait chuter la perméabilité.

Les résultats de porosimétrie au mercure obtenus sur quelques échantillons montrent un changement important dans la distribution porale et dans le volume poral des échantillons traités et non traités. L'effet de la chaux semble être de réduire fortement les "gros" pores ( $> 6 \mu m$ ). On constate également que le volume total des pores est pratiquement identique quelle que soit la teneur en eau initiale dans les échantillons compactés à un  $\gamma_d$  identique. Donc, la présence de la chaux réduit l'effet de la teneur en eau sur l'espace poral et cela est dû à la réaction instantanée de la chaux avec l'argile (floculation, échange ionique, carbonatation et cimentation) et donc c'est le  $\gamma_d$  de compactage qui devient prépondérant dans la distribution porale. Ces résultats pourraient être interpréter également par la formation d'une liaison des particules argileuses dû à l'action de la chaux (formation d'un squelette rigide et poreux).

Des modifications micro-texturales légères ont été observées grâce à la DRX. Des changements minéralogiques sont observés, notamment une importante réflexion de la calcite dans les échantillons traités. La DRX montre également la présence de la

Tableau I. Résultats des tests de porosimétrie au mercure sur des échantillons compactés à un poids volumique initial identique égal à  $13,2 \text{ kN/m}^3$

Teneur en eau initiale %	22		32		37,4	
Chaux ajoutée %	0	4	0	4	0	4
Volume total des pores ml/g	0.315	0.279	0.234	0.283	0.246	0.270
Volume des pores avec diamètre $> 6 \mu m$ (ml/g)	0.170	0.050	0.071	0.033	0.070	0.077

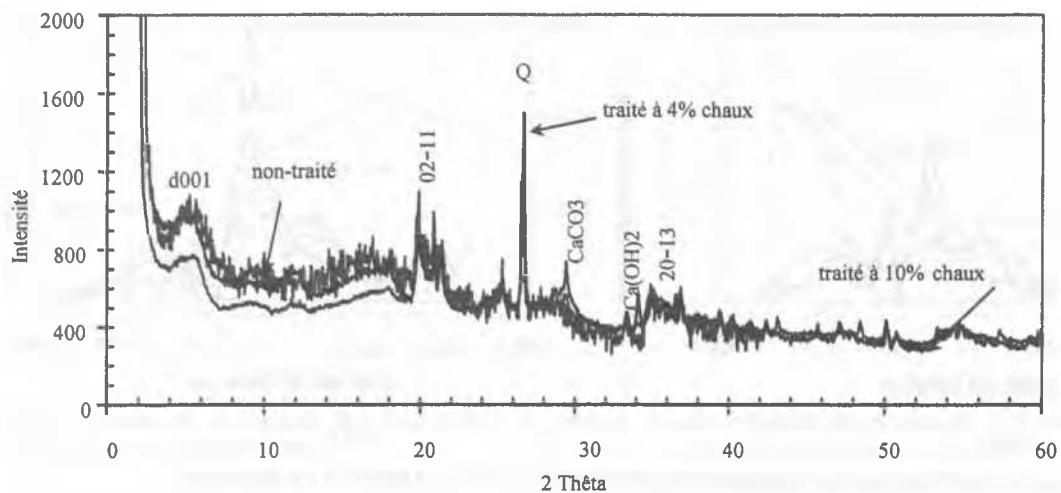


Figure 6 Résultats de diffraction des rayons X sur des échantillons traités et non traités

chaux hydratée en excès dans les échantillons traités avec 10% de la chaux (alors qu'il faut uniquement 4% pour traiter cette argile). La structure rigide poreuse n'est pas observée par DRX car l'extension des liaisons entre particules est probablement très limitée.

D'autres recherches sont en cours afin de mieux analyser le comportement de cette argile lors de son traitement avec de la chaux hydratée notamment l'analyse thermogravimétrique (interaction eau-argile et différents types d'eau) et la microscopie électronique à balayage (espaces poreux, taille des particules, liaison entre particule

## 5. RERERENCES

- Al-Mukhtar M. 1995. *Macroscopic behavior and microstructural properties of a Kaolinite clay under controlled mechanical and hydraulic state*. Proceedings of the 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, A.A. Balkema and Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - Paris. Vol. 1 : 3-11.
- Al-Mukhtar M., Belanteur N., Tessier D., Vanapalli S.K. 1996. The fabric of a clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states. *Applied Clay Science* 11 : 99-115.
- Arabi M. and wild S.1989. Property changes induced in clay soils when using lime stabilization. *Municipal Engineer (London)* 6:85-99.
- Bell, F.G. 1996. *Lime stabilisation of clay minerals and soils* Eng. Geol., vol. 42:223-237.
- Eades, J. L. and Grim, R. E. 1966. *A quick test to determine lime requirements for soil stabilization* Highway Research Record No.139.
- Gedney, D.S., Harland Bartholomew and Associates. 1987. *Lime stabilization, reaction, properties, design, and construction*. state of the art report No.5, Transportation Research Board.
- Ingles, O. G. and Metcalf, J. B 1972. *Soil stabilisation, theory and practice* Butterworth Pty. Limited, Sidney.
- Khatab S., AL-Mukhtar M., Crespin M., Alcover J.F., Fleureau J.-M., Bergaya F. 2000. *Stabilisation with lime: Swelling capacity and microstructure changes*. international conference on Ground Improvement Techniques, Singapore.
- Little, D.N. 1995. *Handbook for stabilisation of pavement subgrades and base courses with lime* Kendall/Hunt Publishing company, USA, 219p.