

Effets de sollicitations hydriques cycliques sur le gonflement d'un sol argileux traité à la chaux

O. CUISINIER

Laboratoire Environnement,
Géomécanique & Ouvrages
Nancy-Université
Rue du Doyen
Marcel-Roubault
BP 40
54501 Vandœuvre-
lès-Nancy Cedex
Olivier.Cuisinier@
ensg.inpl-nancy.fr

D. DENELEE

Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes
Route de Bouaye, BP 4129
44341 Bouguenais Cedex
Dimitri.Deneele@lpcp.fr

Résumé

Le traitement à la chaux améliore le comportement des sols fins. En dehors de ces applications classiques en terrassement, le traitement à la chaux permet aussi de réduire le gonflement des sols très argileux. Toutefois, dans le long terme, la pérennité des effets positifs de la chaux reste toujours en question. En effet, certains auteurs ont montré que les sols traités peuvent retrouver leur potentiel de retrait/gonflement après quelques cycles successifs d'humidification/séchage. Dans ce contexte, cette étude expérimentale a été entreprise pour évaluer les effets successifs d'humidification/séchage sur le comportement d'une argile traitée à la chaux. Elle a été menée à partir de prélèvements réalisés dans un remblai expérimental réalisé en argile traitée à la chaux. Ces travaux ont été complétés par des expériences menées sur des échantillons d'argile, traitée ou non, préparés en laboratoire. Des œdomètres à succion contrôlée par la méthode osmotique ont été employés pour soumettre les différents matériaux testés à des cycles hydriques. L'analyse des résultats obtenus montre que le traitement de la chaux permet de réduire considérablement la capacité de gonflement de l'argile dans le court terme. Toutefois, les échantillons prélevés sur le remblai expérimental présentent un potentiel de gonflement/retrait de l'ordre de 5 à 8 % alors que le potentiel de retrait/gonflement des éprouvettes d'argile traitée préparées en laboratoire est quasi nul. Les résultats obtenus tendent ainsi à indiquer que l'efficacité du traitement à la chaux sur le gonflement d'une argile plastique diminue avec le temps.

Mots-clés : traitement des sols, chaux, succion, argile, durabilité.

Impact of cyclic wetting and drying on the swelling properties of a lime-treated expansive clay

Abstract

Lime addition is a very wide spread technique to improve the engineering behaviour of soils and it is known to reduce the swelling potential of expansive soils. However, in the long term, the permanence of that lime effect is questionable. Some authors have shown that a lime-treated expansive soil can recover its initial swelling/shrinkage ability after some successive wetting/drying cycles. This question is of interest since lime might be used to prevent swelling of expansive soils in earthworks. An experimental study was undertaken to assess the effects of successive wetting/drying cycles on the swelling behaviour of lime-treated expansive soils. This study was conducted both on three-years-old field-samples coming from an experimental backfill and samples reconstituted in the laboratory. Osmotic suction-controlled oedometers were used to determine their swelling/shrinkage behaviour when submitted to wetting/drying cycles. The results obtained on the reconstituted samples showed that the lime treatment can reduce dramatically the swelling capacity of an expansive soil. However, the lime-treated samples taken from the experimental backfill exhibited important swelling and shrinkage deformations when submitted to successive wetting and drying. The obtained results clearly indicated that the lime treatment efficiency decreased with time.

Key words: lime stabilisation, suction, clay, durability.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} septembre 2010.

Introduction

Le traitement à la chaux des sols fins est d'un usage ancien et très répandu en vue d'améliorer leur comportement et leur maniabilité. Lorsque de la chaux vive est ajoutée à un sol, celle-ci s'hydrate ce qui provoque un dégagement de chaleur et une augmentation de la quantité d'ions Ca^{2+} et OH^- dans la solution du sol. Ces ions vont réagir avec les constituants du matériau, modifiant ainsi ses caractéristiques de maniabilité, de compactage, et de comportement mécanique à court et long termes (Little, 1995 ; Bell, 1996). L'augmentation du pH conduit à la dissolution des minéraux du sol, ce qui libère de l'alumine et de la silice, silice et alumine qui vont se combiner avec les ions calcium apportés par la chaux pour former des composés cimentaires. Ces composés cimentent les particules du sol entre elles, ce qui conduit à l'amélioration de son comportement mécanique.

Le traitement à la chaux permet aussi de réduire, voire de supprimer, le gonflement des sols argileux (Brandl 1981 ; Nalbantoglu et Tuncer, 2001 ; Rao et Thyagaraj, 2003). Ainsi, le traitement à la chaux pourrait être intéressant pour prévenir le gonflement des sols argileux dans le cadre de leur emploi en terrassement. Dans ce contexte, l'évaluation de la stabilité dans le temps de cet effet du traitement à la chaux est primordiale. Cependant, il n'existe aujourd'hui que très peu de travaux sur l'impact, notamment des sollicitations hydriques cycliques, climatiques, sur la pérennité des effets du traitement à la chaux. Ainsi, quelques études de cas sont disponibles dans la littérature pour évaluer les performances de remblais traités à la chaux quelques années après la réalisation de l'infrastructure (Gutschik, 1978 ; Kelley, 1988). Ces auteurs notent que dans la zone soumise aux aléas climatiques il est apparu quelques désordres liés apparemment à la présence de boules d'argiles mal pulvérisées lors du traitement. D'après ces quelques études, il apparaît que l'alternance de périodes sèches et humides pourrait être néfaste. Il est cependant difficile de conclure à partir de ces seules études puisque les informations sur les dosages, les types de sol, les conditions de compactage ne sont pas présentées en détail. Par ailleurs, il existe aussi quelques études de laboratoire sur cette thématique. Guney *et al.* (2007) ont imposé des cycles de séchage/humidification à une argile gonflante compactée traitée à la chaux. Ces auteurs ont montré que, bien que le potentiel de gonflement de l'argile soit réduit immédiatement après le traitement à la chaux, il tend à augmenter de manière significative lorsque des cycles hydriques successifs sont imposés. L'étude présentée par Khattab *et al.* (2004), à partir d'essais réalisés sur l'argile FoCa traitée à la chaux, aboutit aux mêmes conclusions. Ces auteurs montrent que ce comportement semble relié à la période de cure entre le traitement et le premier cycle hydrique. Ces quelques études de cas et de laboratoire tendent à conclure à un effet négatif des cycles hydriques sur le gonflement des sols argileux traités à la chaux, et mettent ainsi en doute la durabilité des effets du traitement à la chaux. Cependant, les cycles hydriques de ces études de laboratoire ont été réalisés entre la saturation (imposition de succion nulle) et de très faibles humidités relatives, ce qui correspond à une succion de plusieurs centaines de MPa. Ce type de cycle est plutôt sévère par rapport aux variations de teneur en eau, et donc de succion, auxquelles peut être soumis le cœur des ouvrages en terre (quelques MPa).

Dans ce contexte et afin de maîtriser l'amplitude des cycles hydriques imposés, la technique d'imposition de la succion par la méthode osmotique a été utilisée. Des œdomètres spéciaux ont ainsi permis d'étudier le comportement des matériaux considérés dans cette étude entre 0 et 8,5 MPa de succion. Cette étude expérimentale a été réalisée à partir de deux types de matériaux et vise à évaluer la performance à long terme d'une argile traitée à la chaux soumise à des cycles hydriques. Elle a été menée sur des échantillons prélevés en juillet 2006 dans un remblai expérimental constitué d'argiles très plastiques (A4) traitées à la chaux réalisé en 2003. Des expériences complémentaires ont été réalisées sur des échantillons de ce même matériau mais traités en laboratoire, ceci afin d'évaluer l'impact à court terme du traitement à la chaux. La comparaison des résultats obtenus avec chacun des matériaux permet d'approcher l'évolution avec le temps de l'efficacité d'un traitement à la chaux d'un sol très argileux.

Origine et propriétés des matériaux utilisés dans l'étude

Remblais expérimentaux

Les reconnaissances géologiques menées dans le cadre de la réalisation du tronçon Rethel – Charleville de l'autoroute A34 ont mis en évidence la présence d'argiles très plastiques (A4). Ces argiles ne sont pas utilisables en remblais selon le guide de réutilisation des matériaux en remblais et couche de forme (LCPC-SETRA, 2000). Face à la pénurie possible de matériaux de bonne qualité sur ce chantier, les possibilités de réemploi de ces argiles très plastiques en terrassement ont été considérées. Dans ce cadre, après une étude préliminaire, deux remblais expérimentaux (100 m de longueur, 10 m de large et 1,5 m de hauteur) ont été réalisés en juillet 2003. Deux dosages en chaux, 2 et 3 %, ont été utilisés ainsi que différentes modalités de mise en œuvre et de compactage du matériau traité. Par ailleurs, un des remblais a été surmonté d'une couche de forme en argile traitée avec 3 % de chaux et 7 % de liant. Les propriétés de ces remblais ont fait l'objet d'un suivi spécifique qui a montré que, si le remblai possédait des caractéristiques initiales acceptables, une légère amélioration des performances de portance a été mise en évidence lors du suivi de 2006 (Berche, 2007).

Des sondages au carottier battu ont été réalisés dans un des remblais afin de déterminer les propriétés de gonflement de l'argile traitée. Ces sondages ont été réalisés en juillet 2006, soit trois ans après la construction du remblai, période durant laquelle les remblais ont été soumis aux seules sollicitations climatiques. Dans le remblai sélectionné, cette argile A34 a été traitée avec 3 % de chaux vive et compactée à la teneur en eau optimale (Proctor normal). Ce dosage en chaux avait été reconnu comme suffisant pour supprimer le gonflement de cette argile sous humidification lors des études préliminaires. En parallèle à ces sondages, de l'argile A34 non traitée a été prélevée. Ce matériau a

été utilisé pour réaliser des essais complémentaires de traitement et de vieillissement au laboratoire. La couche de forme traitée n'a pas été considérée dans le cadre de cette étude.

2.2

Propriétés de l'argile A34 non traitée

Les propriétés d'identification géotechnique de l'argile A34, avant l'ajout de chaux vive, ont été déterminées. La limite de liquidité est de 98 %, l'indice de plasticité de 61 %, pour une valeur de bleu VBS de 10,7 g pour 100 g. La proportion d'éléments inférieurs à 2 μm est de 66 %. Ces données confirment que l'argile peut être classée comme A4 selon la classification GTR. La courbe granulométrique de l'argile est donnée sur la figure 1. Les caractéristiques de compactage ont aussi été déterminées. La teneur en eau de l'optimum Proctor normal est de l'ordre de 24,5 %, avec une masse volumique sèche correspondante de 1,46 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Après un traitement à 3 % de chaux vive, la teneur en eau de l'optimum Proctor normal de cette argile est de 27,0 % pour une masse volumique sèche de 1,37 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

L'analyse minéralogique effectuée par diffraction des rayons X (Fig. 1) montre que ce matériau est composé essentiellement de minéraux argileux (montmorillonite, illite et kaolinite), de quartz et de carbonates de calcium. Les estimations semi-quantitatives aboutissent à une proportion de 66 % d'argiles, 19 % de quartz et 15 % de carbonates de calcium. La fraction argileuse est composée de 90 % de montmorillonite, 8 % d'illite et 2 % de kaolinite.

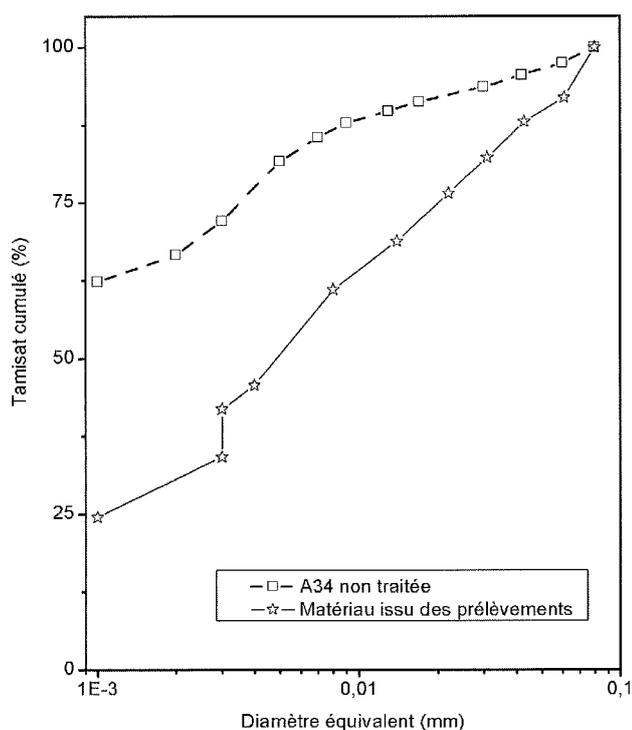


FIG. 1

Comparaison entre la granulométrie de l'argile A34 non traitée et de l'argile A34 traitée prélevée au sein des remblais expérimentaux.

Comparison between the granulometry of unstabilized A34 clay and stabilized A34 clay sampled in the experimental backfills.

2.3

Caractérisation des prélèvements

Seule la partie centrale des sondages a été utilisée dans cette étude. La teneur en eau moyenne des carottes prélevées dans le remblai était comprise entre 32 et 36 %, pour une masse volumique sèche comprise entre 1,14 et 1,28 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Le degré de saturation était compris entre 70 et 80 % environ. Ces caractéristiques sont très différentes des caractéristiques visées pour la construction du remblai en 2003 qui étaient du même ordre de grandeur que les propriétés de compactage à l'optimum déterminées en laboratoire. La teneur en eau du matériau issu du remblai indique notamment une importante prise d'eau du matériau entre le moment de la construction et la réalisation des sondages.

Une analyse de la granulométrie des prélèvements issus du remblai a été réalisée (Fig. 1). Le traitement à la chaux a induit une baisse importante de la teneur en particules fines (< 2 μm) qui est passée de 66 % à moins de 30 % pour l'argile traitée. De même, la valeur de bleu VBS sur les prélèvements est comprise entre 5,1 et 7,1 g pour 100 g, ce qui est significativement inférieur à l'argile A34 non traitée. La comparaison de ces résultats avec l'argile A34 non traitée montre clairement que le traitement à la chaux a modifié de manière durable les propriétés d'identification de l'argile A34.

Afin de qualifier les effets de la chaux sur l'assemblage minéralogique du matériau, une analyse minéralogique par diffraction des rayons X a été menée sur un échantillon prélevé sur une des carottes utilisées pour réaliser les travaux de cette étude (Fig. 2). Aucune modification du cortège minéralogique, ni dissolution des phases initialement présentes, ni apparition de phases cimentaires (CSH ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$) n'est détectable dans l'échantillon. Le diffractogramme obtenu sur l'échantillon prélevé est identique au diffractogramme de l'échantillon A34 brut.

2.4

Caractéristiques des éprouvettes préparées au laboratoire

A l'époque de la construction, aucun essai n'a été réalisé sur des prélèvements dans les remblais expérimentaux. Ainsi les propriétés initiales de retrait/gonflement des matériaux traités sont inconnues. Afin de les estimer, des essais sur des éprouvettes préparées en laboratoire ont été entrepris. La comparaison entre ces résultats et les prélèvements *in situ* trois ans après la construction des remblais fournit une base pour évaluer l'évolution à long terme de l'efficacité du traitement à la chaux. Une des principales limites de cette tentative de comparaison concerne les moyens de préparation, de mélange et de compactage des éprouvettes, mis en œuvre au laboratoire et sur un chantier.

En laboratoire, plusieurs modalités de préparation de l'argile A34 ont été retenues : argile non traitée, argile traitée avec 3 % de chaux sans cure, argile traitée à 3 % avec un mois de cure à 40 °C à teneur en eau constante. Cette dernière modalité a été sélectionnée de manière à accélérer les processus physico-chimiques induits par le traitement à la chaux et ainsi tenter d'estimer les propriétés de l'argile A34 traitée à très long terme. Les réactions sont en effet très dépendantes de la température et ce type de procédé est fréquemment utilisé dans le cadre de l'étude du traitement des sols (Little, 1995).

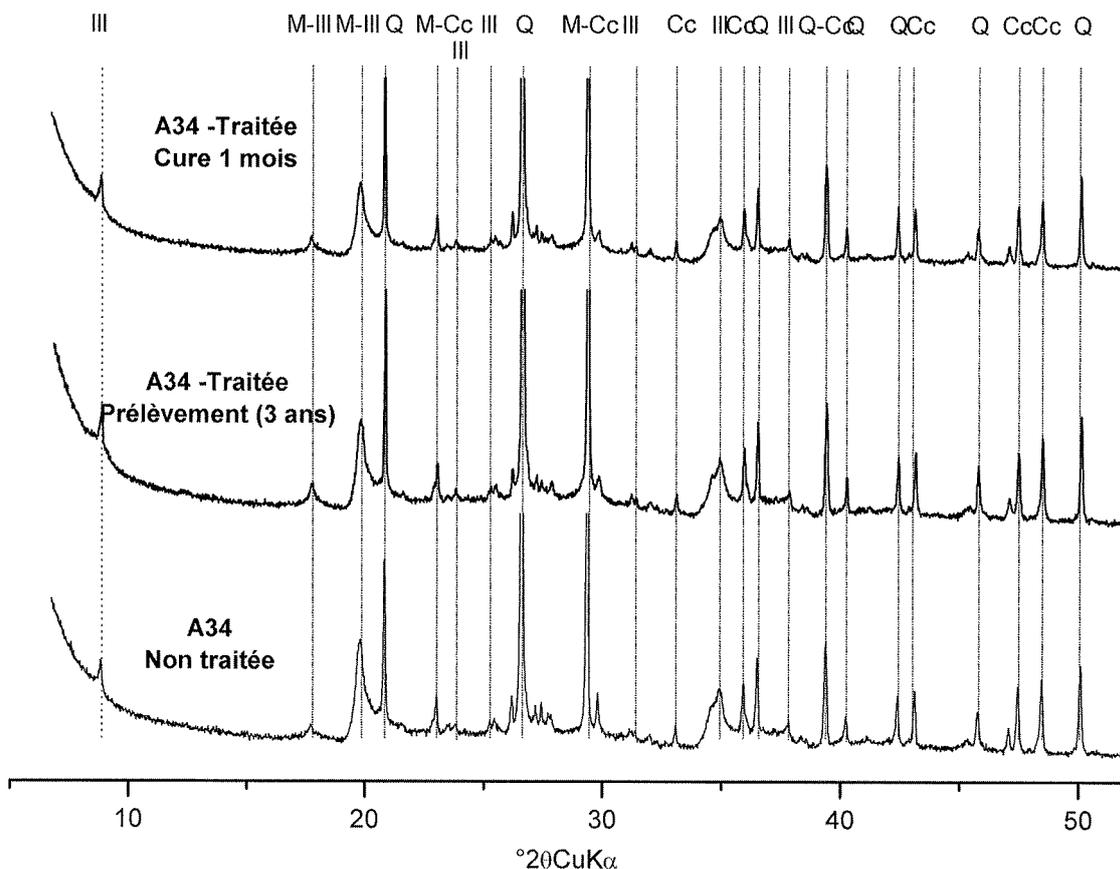


FIG. 2 Diffractogrammes de la fraction globale de l'argile A34 brute et traitée à 3 % de chaux (III : illite, M : montmorillonite, Q : Quartz, Cc : carbonate de calcium).
X ray diffractogram of unstabilized A34 clay and A34 clay stabilized with 3 % of quicklime (I : illite, M : montmorillonite, Q : quartz, Cc : calcium carbonate).

La procédure de préparation des éprouvettes était la suivante. Tout d'abord, l'argile humide et la chaux ont été malaxées. Ce mélange a ensuite été laissé au repos pendant une heure avant que le compactage ne soit réalisé. Dans un dernier temps, l'éprouvette a été préparée par compactage du mélange sol + chaux directement dans le corps de la cellule œdométrique. La procédure de compactage retenue a été adaptée à partir d'un dispositif présenté par Sridharan et Sivapullaiah (2005). Cette procédure repose sur l'utilisation d'une mini-dame de compactage. Lorsqu'une période de cure était nécessaire, l'éprouvette et la cellule œdométrique étaient emballées dans du film plastique de manière à éviter les pertes d'eau. Toutes les éprouvettes ont été préparées avec les caractéristiques de l'optimum Proctor normal du sol.

3

Technique d'imposition de la succion

La technique d'imposition de la succion retenue pour cette étude est la technique osmotique. Le principe de la méthode est de mettre en contact une éprouvette de sol et une solution de macromolécules en insérant entre les deux une membrane semi-

perméable. Celle-ci empêche le passage des macromolécules de la solution vers l'éprouvette mais elle permet les échanges d'eau. Les mouvements d'eau, et donc la succion, sont contrôlés par le phénomène d'osmose : plus la concentration en macromolécules est élevée, plus la succion imposée est forte. La macromolécule utilisée classiquement est le polyéthylène glycol (PEG) avec différents poids moléculaires. La relation entre la concentration en macromolécules et la succion a été caractérisée par différents auteurs (Williams et Shaykewich, 1969 ; Delage *et al.*, 1998 ; Cuisinier et Masrouri 2004). Cette méthode a permis d'imposer des succions comprises entre 0 et 8,5 MPa. Lorsqu'une succion était appliquée, une durée de 10 jours était respectée de manière à atteindre l'équilibre hydrique (Cuisinier et Masrouri 2005).

Pour étudier le retrait/gonflement des matériaux de cette étude, un œdomètre à succion contrôlée par la méthode osmotique a été utilisé. Le schéma de principe de l'œdomètre osmotique est donné sur la figure 3, la base de l'œdomètre permettant de faire circuler la solution osmotique au contact de l'éprouvette. La hauteur initiale des éprouvettes est de $1 \pm 0,05$ cm et leur diamètre de 7 cm. Dans cette étude, les phases de dessiccation/humidification ont été réalisées sous une contrainte verticale de 10 kPa de manière à assurer un bon contact entre la base de l'éprouvette et la membrane semi-perméable.

Comportement des échantillons provenant du remblai expérimental

Les propriétés hydriques et mécaniques des matériaux prélevés dans les remblais ont été déterminées. Il s'agit de la courbe de rétention d'eau, la compressibilité œdométrique et des propriétés de retrait/gonflement. Les essais menés sur les prélèvements *in situ* ont le plus souvent été doublés ou triplés.

4.1

Propriétés hydriques

La succion matricielle des échantillons prélevés dans le remblai expérimental a été mesurée en utilisant la technique du papier filtre (ASTM D 5298, 1995). Un tronçon de carotte est initialement coupé en deux, trois papiers filtres secs étant introduits entre les deux morceaux. Après 10 jours, le papier filtre central a été utilisé pour déterminer la succion initiale en utilisant la courbe d'étalonnage du papier. La succion matricielle initiale déterminée est ainsi comprise entre 800 et 1 000 kPa pour une teneur en eau des éprouvettes comprise entre 32 et 36 %.

La courbe de rétention du matériau a été déterminée entre 10 kPa et 8 MPa de succion à l'aide de la méthode osmotique. Les résultats sont donnés sur la figure 4, où chaque point est la moyenne de trois mesures au moins.

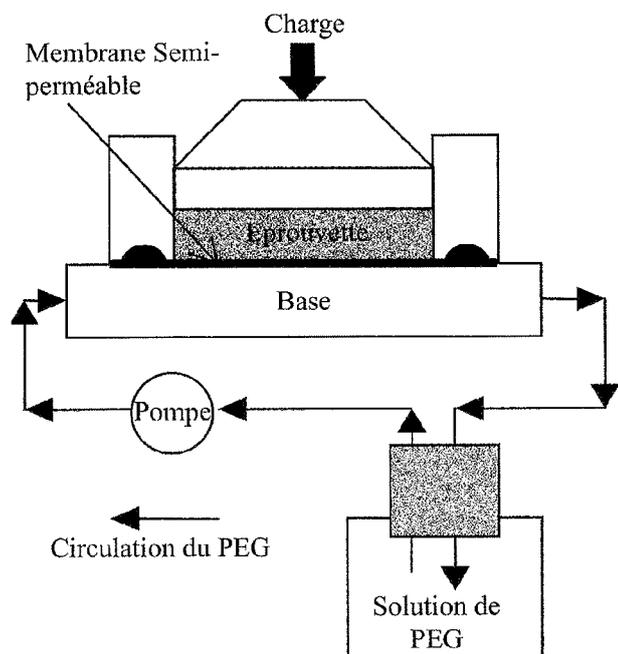


FIG. 3 Principe d'un œdomètre à succion contrôlée par méthode osmotique.

Schematic of an oedometer using the osmotic method for the suction control.

La méthode osmotique a aussi été employée pour déterminer la courbe de rétention d'eau des matériaux de cette étude. Des fragments de matériau d'un volume de quelques centimètres cubes, issus de prélèvements ou d'éprouvettes compactées au laboratoire, étaient insérés dans une membrane semi-perméable. L'ensemble était ensuite plongé dans une solution de macromolécules permettant d'imposer la succion. Après une période de 10 jours la teneur en eau des fragments était déterminée.

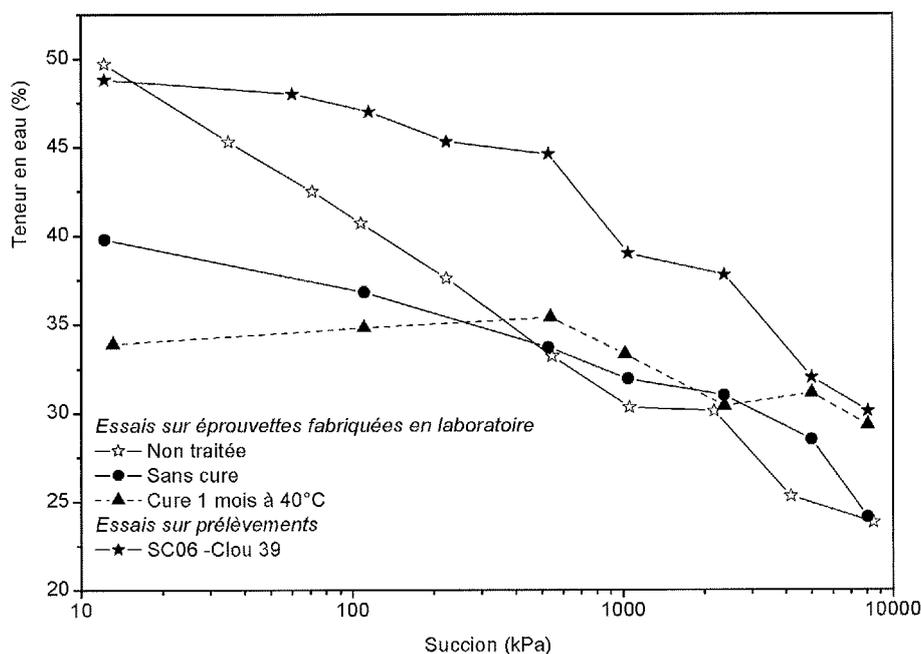


FIG. 4 Courbes de rétention des matériaux étudiés. Retention curves of the studied materials.

Essais œdométriques classiques

Des essais œdométriques classiques ont été réalisés sur plusieurs prélèvements afin d'évaluer la compressibilité des échantillons issus du remblai expérimental. Les résultats sont donnés dans la figure 5. Trois ans après la mise en place du remblai, l'indice de compression de l'argile A34 traitée avec 3 % de chaux est compris entre 0,286 et 0,342, la pression de préconsolidation entre 100 et 150 kPa. Le potentiel de gonflement libre peut aussi être évalué grâce à ces essais, à partir de la variation de volume enregistrée lors de la mise en eau initiale des éprouvettes sous une contrainte verticale de 3 kPa. Il est compris entre 0,5 et 2 % de la hauteur initiale en fonction des différentes éprouvettes testées.

Propriétés de retrait/gonflement

Plusieurs séries d'essais ont été réalisées pour évaluer les propriétés de gonflement de l'argile A34 prélevée dans le remblai expérimental. Trois échantillons ont été soumis à des cycles hydriques successifs dans les œdomètres osmotiques, les cycles étant compris entre une valeur proche de la succion initiale (1 MPa) et 0 kPa. La masse volumique sèche initiale des éprouvettes testées était comprise entre 1,17 et 1,28 Mg.m⁻³.

Pour limiter la durée de l'essai, aucune succion intermédiaire entre 1 et 0 MPa n'a été imposée. Les résultats montrent que la première phase d'humidification se traduit par une légère variation de volume (Fig. 6). En revanche, l'imposition d'une succion de 1 MPa après cette humidification conduit à un retrait des éprouvettes. À la fin de ce premier cycle d'humidification/dessiccation l'éprouvette présente une hauteur inférieure à la hauteur initiale, ce premier cycle induit donc des déformations irréversibles de retrait. En revanche, les cycles ultérieurs n'induisent pas de déformations irréversibles supplémentaires, le comportement hydrique apparaît alors comme élastique. Dans cette gamme de succion, les modifications de volume restent limitées dans cette gamme de succion, l'amplitude de gonflement/retrait est inférieure à 1,2 %.

Trois autres échantillons ont été soumis à des cycles hydriques dans une gamme de succion comprise entre 0 et 8 MPa (Fig. 7). La masse volumique sèche des éprouvettes testées était comprise entre 1,24 et 1,38 Mg.m⁻³. La première phase de séchage jusqu'à 8 MPa a induit un fort retrait du matériau, compris entre 5,1 et 8,5 % en fonction de l'éprouvette considérée, ce qui est très supérieur à ce qui avait été enregistré lors des essais A, B et C entre 0 et 1 MPa. L'humidification de 8 MPa jusqu'à une succion nulle conduit à un gonflement des éprouvettes. Le premier cycle conduit à une accumulation de déformation de type retrait. Le comportement volumique devient élastique après ce premier cycle hydrique.

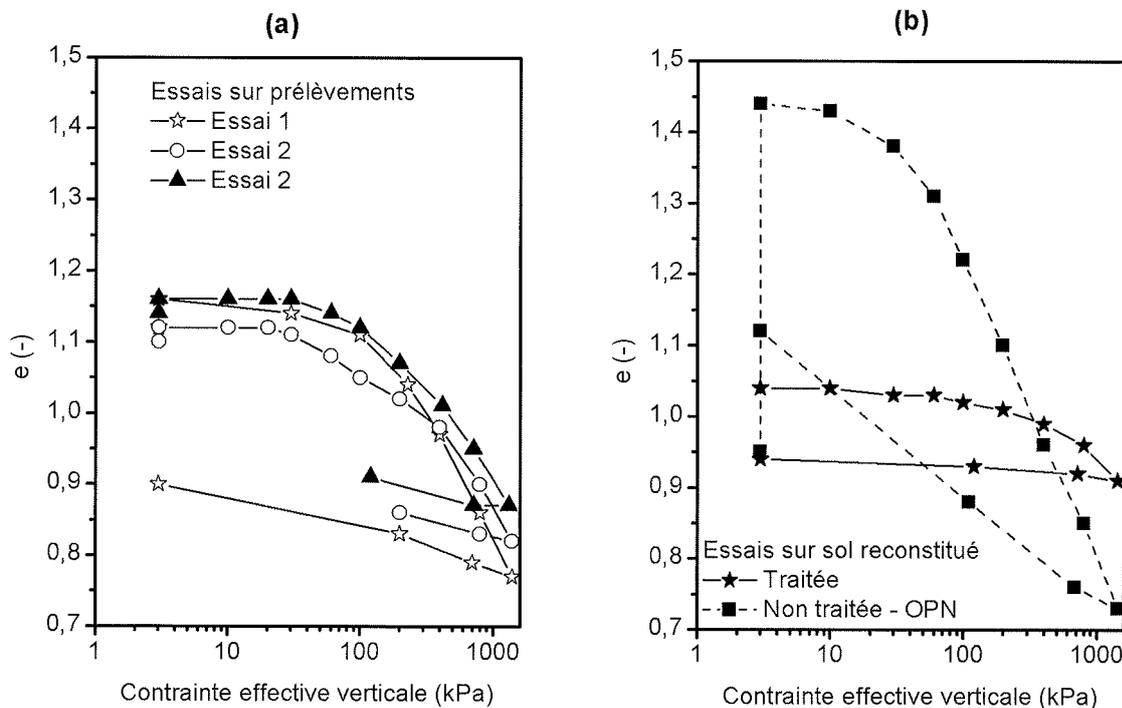


FIG. 5 Résultats des essais œdométriques menés sur l'argile A34 : (a) essais sur les prélèvements issus du remblai expérimental ; (b) essais sur éprouvettes reconstituées au laboratoire.

Results of the oedometric tests performed on A34 clay : (a) tests performed on samples taken in the experimental backfill ; (b) test performed on samples reconstituted in the lab.

Comportement des échantillons reconstitués au laboratoire

Pour évaluer l'effet de la chaux après trois ans, il est nécessaire de disposer de résultats sur le matériau A34 non traité et traité avec 3 % de chaux avec un temps de cure limité. Cette partie donne les résultats de l'ensemble des essais réalisés sur des éprouvettes reconstituées au laboratoire.

5.1

Courbes de rétention

Les courbes de rétention des matériaux préparés en laboratoire ont été déterminées par la méthode osmotique suivant la méthodologie exposée précédemment. Les résultats de ces essais sont comparés entre eux sur la figure 8. Les résultats montrent que l'ajout de chaux modifie de manière significative la courbe de rétention de l'argile A34 entre une succion de l'ordre de 300 à 400 kPa et 10 kPa. Ainsi, sous une succion de 10 kPa, la teneur en eau de l'argile A34 est de l'ordre de 40 % alors qu'elle est de 50 % pour l'argile non traitée. Ces résultats permettent aussi d'évaluer l'effet d'une cure d'un mois à 40 °C et teneur en eau constante. Cette cure conduit à une baisse de la capacité de rétention d'eau de l'argile A34 sous une succion de 10 kPa. Elle passe ainsi de 40 % sans cure à environ 33 % après la cure. On peut donc conclure que l'ajout de chaux baisse la capacité de rétention d'eau d'une argile, une cure accentuant cet effet de l'ajout de chaux.

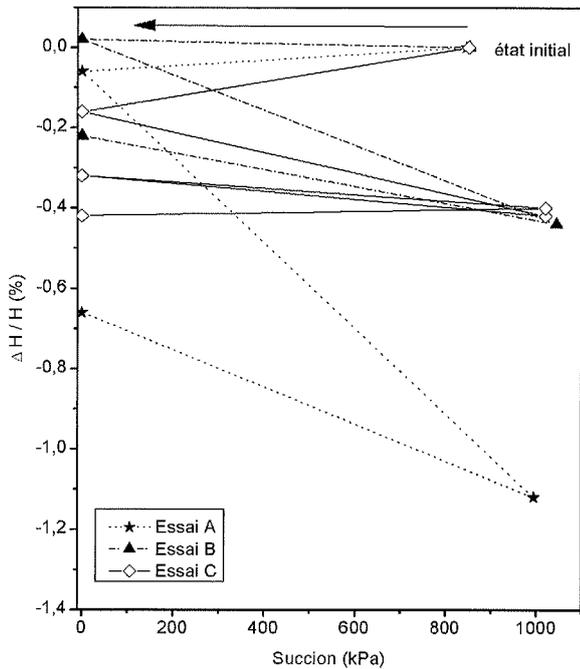


FIG. 6 Variations de volume d'éprouvettes issues des prélèvements réalisés dans le remblai A34 et soumises à des cycles hydriques entre leur succion initiale et la saturation. Volumetric variation of samples taken in the experimental backfill and submitted to suction cycles between their initial suction and null suction.

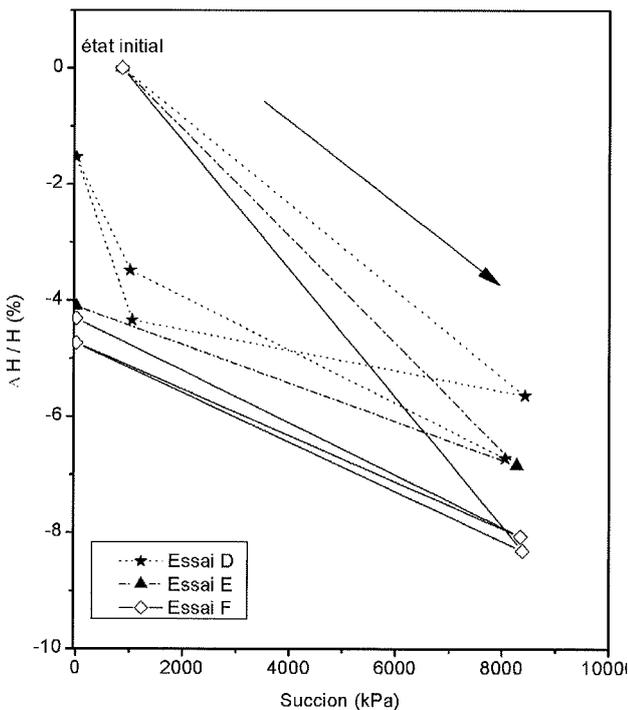


FIG. 7 Variations de volume d'éprouvettes issues des prélèvements réalisés dans le remblai A34 et soumises à des cycles hydriques entre 8,5 MPa et la saturation. Volumetric variation of samples taken in the experimental backfill and submitted to suction cycles between 8.5 MPa and null suction.

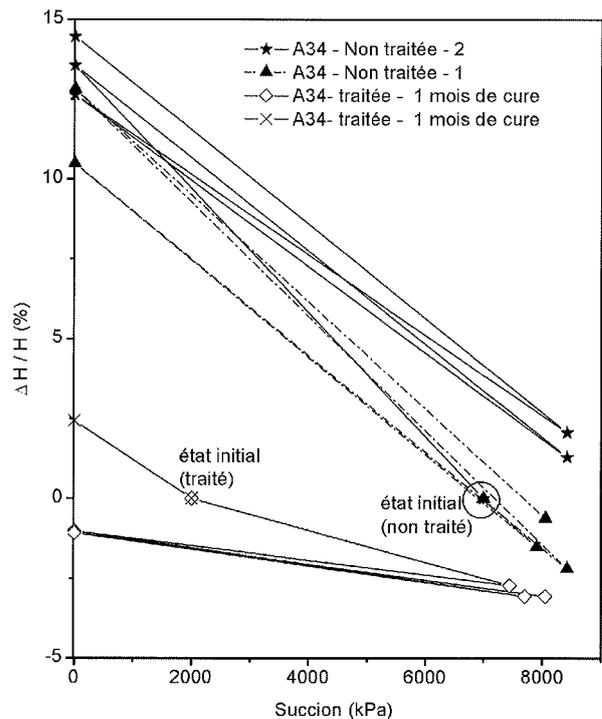


FIG. 8 Variations de volume d'éprouvettes préparées en laboratoire soumises à des cycles hydriques entre 8,5 MPa et la saturation. Volumetric variation of samples prepared in the laboratory and submitted to suction cycles between 8.5 MPa and null suction.

Ces courbes de rétention permettent aussi d'évaluer la succion initiale des éprouvettes préparées en laboratoire. Dans le cas de l'argile non traitée, pour la teneur en eau optimale, soit 24,5 %, la succion initiale est de l'ordre de 6 à 7 MPa. Dans le cas de l'argile traitée, avec ou sans cure, et pour la teneur en eau optimale, soit 27,0 %, la succion initiale est d'environ 2 MPa. Ces valeurs de succion seront utilisées dans ce qui suit pour représenter les variations de volume de ces matériaux en fonction de la succion.

5.2

Compressibilité œdométrique

La figure 5 donne les résultats des essais œdométriques réalisés sur les éprouvettes fabriquées au laboratoire. L'essai réalisé sur l'argile A34 non traitée, compactée à son optimum de compactage normal, permet d'apprécier le potentiel de gonflement libre de cette argile qui est de l'ordre de 16,5 %. Dans ces conditions la pression de préconsolidation est de l'ordre de 50 kPa, l'indice de compression C_c est d'environ 0,34 et l'indice de gonflement C_s d'environ 0,14. L'essai réalisé sur l'argile A34 traitée à 3 % de chaux et laissée en cure pendant 1 mois à 40 °C à teneur en eau constante permet d'estimer le gain mécanique lié au traitement à la chaux. Ainsi, le potentiel de gonflement est dans ce cas quasi nul. De plus, la pression de préconsolidation est de l'ordre de 1 MPa, une détermination précise aurait nécessité de charger l'éprouvette au-delà de 1,8 MPa, valeur maximale qu'il est possible d'appliquer avec les appareils utilisés. De même, l'estimation de l'indice de compression n'a pas été possible.

Ces résultats montrent que les propriétés mécaniques de l'argile A34 sont profondément modifiées par l'ajout de 3 % de chaux. Cela se traduit notamment par une suppression du gonflement de l'éprouvette et d'une augmentation très significative de la pression de préconsolidation.

5.3

Gonflement des échantillons reconstitués au laboratoire

Le potentiel de retrait/gonflement de l'argile A34 non traitée a été évalué en réalisant deux essais (Fig. 7). Dans le premier essai, la première sollicitation hydrique correspond à une dessiccation jusqu'à une succion de 8,5 MPa, puis une humidification jusqu'à une succion nulle a suivi. Afin de limiter les temps d'essais et pouvoir réaliser plusieurs cycles, aucune succion intermédiaire n'a été imposée. Dans le deuxième essai sur l'argile non traitée, l'essai a débuté par une humidification jusqu'à une succion nulle, humidification suivie d'une augmentation de succion jusqu'à 8 MPa. Ces résultats montrent que l'argile A34 non traitée est un sol très sensible à toute variation de teneur en eau. Ainsi, le potentiel de retrait/gonflement de l'argile A34 est de l'ordre de plus ou moins 15 à 16 %. La succession de plusieurs cycles hydriques conduit à l'accumulation de déformations irréversibles au fur et à mesure des cycles.

L'apport de chaux modifie profondément le comportement de retrait/gonflement de l'argile A34. En effet, dans la gamme de succion étudiée, le potentiel

de retrait/gonflement est de l'ordre de plus ou moins 3 % entre 8,5 et 0 MPa de succion. Le potentiel de gonflement libre a aussi été déterminé. Il n'est plus que de 2,8 % après 1 mois de cure à 40 °C et teneur en eau constante. Trois cycles successifs ne semblent pas altérer le comportement du matériau traité, le comportement volumique est élastique.

6

Discussion

6.1

Analyse des résultats

L'ensemble des résultats obtenus permet d'évaluer l'efficacité à moyen terme du traitement à la chaux, tant au niveau des propriétés microscopiques que macroscopiques de l'argile A34.

Ainsi, si les résultats des analyses par diffraction des rayons X ne mettent pas en évidence de différences significatives entre l'argile non traitée, l'argile traitée en laboratoire et les prélèvements issus du remblai expérimental (Fig. 2), la granulométrie des matériaux est très différente trois ans après le traitement (Fig. 1). Ainsi, le matériau issu des remblais est beaucoup plus grossier que l'argile A34 non traitée. La proportion d'éléments inférieurs à 2 μm est de 25 % pour le matériau du remblai alors qu'elle est de 66 % dans l'argile non traitée. Ces résultats indiquent la persistance, trois ans après la construction, d'un effet significatif du traitement avec 3 % de chaux sur l'argile A34.

La courbe de rétention de chacun des matériaux étudiés permet aussi d'apprécier la pérennité de l'effet de la chaux. La figure 4 montre des différences profondes entre la courbe de rétention de l'argile A34 traitée en laboratoire et celle issue des prélèvements. Ainsi, on peut constater que la capacité de rétention d'eau de l'argile issue des prélèvements est du même ordre de grandeur que celle de l'argile non traitée, et très supérieure à celle de l'argile A34 traitée en laboratoire. Cependant, les courbes de rétention de l'argile issue du remblai et celle traitée en laboratoire sont très différentes entre 10 et 4 000 kPa. La comparaison des courbes de rétention tend à mettre en évidence une baisse d'efficacité du traitement à la chaux trois ans après la réalisation du remblai.

La comparaison des essais œdométriques permet d'estimer l'évolution des performances mécaniques de l'argile A34 traitée (Fig. 5). Ainsi, les résultats obtenus montrent que l'argile issue du remblai est plus gonflante et plus compressible que l'argile A34 traitée au laboratoire. La pression de préconsolidation des deux matériaux est aussi significativement différente. Cependant, il apparaît que la compressibilité des matériaux issus du remblai de même que leur sensibilité à l'imbibition est très inférieure à celle de l'argile A34 non traitée. De même, leur pression de préconsolidation est deux à trois fois supérieure à celle de l'argile non traitée.

Les essais hydriques cycliques permettent d'évaluer les propriétés de retrait/gonflement de l'argile A34 à moyen terme. Ainsi, quand pour l'argile traitée en laboratoire le potentiel de retrait/gonflement est de l'ordre de plus ou moins 15 à 16 % entre une succion de 8 MPa et la saturation, il n'est que de 5 à 8 % pour

celle prélevée sur le remblai. Il est intéressant de noter que cette valeur de potentiel de retrait/gonflement de l'argile prélevée est certes très supérieure à celui de l'argile traitée en laboratoire mais elle reste inférieure de moitié à celle de l'argile non traitée préparée en laboratoire, de l'ordre de plus ou moins 15 à 16 %.

6.2

Efficacité à moyen terme du traitement à la chaux

L'ensemble de ces résultats démontre que, à court terme, le traitement à la chaux est très efficace pour supprimer la sensibilité à l'eau d'une argile très plastique. Dans le cas de l'argile A34, 3 % de chaux vive permettent de modifier totalement le comportement de l'argile, en réduisant sa sensibilité à l'eau. L'ensemble des essais réalisés mène à cette même conclusion. Cette efficacité résulte d'une suite de processus physico-chimiques qui ne modifient pas en profondeur la minéralogie de l'argile comme le montre l'analyse des diffractogrammes.

Les résultats obtenus sur le matériau prélevé dans le remblai montrent que le traitement à la chaux conserve des effets significatifs sur l'argile A34, trois ans après la réalisation des remblais. Cependant, si l'on prend pour référence les essais réalisés sur les éprouvettes reconstituées en laboratoire, l'efficacité du traitement à la chaux semble avoir diminué avec le temps. Les propriétés des matériaux issus des prélèvements sont intermédiaires entre celles de l'argile A34 non traitée et de l'argile A34 traitée en laboratoire. Ces résultats doivent cependant être pris avec précaution. En effet, comme indiqué précédemment, les conditions de préparation des éprouvettes en laboratoire et *in situ* sont extrêmement différentes même si les références de densité et de teneur en eau sont les mêmes. Il semble donc que les résultats mettent en évidence une dégradation significative des effets initiaux du traitement à la chaux. Cette observation rejoint les conclusions obtenues par certains auteurs qui, en imposant des sollicitations hydriques intenses à des éprouvettes d'argile gonflante traitée à la chaux, avaient mis en évidence une dégradation des effets du traitement (Guney *et al.*, 2007 ; Khattab *et al.*, 2004).

7

Conclusion

Le travail réalisé dans cette étude avait pour but principal de caractériser la sensibilité d'un sol gonflant traité à la chaux à des cycles d'humidification/séchage, et de tenter de quantifier son évolution dans le temps. Les expériences ont été notamment menées à partir de prélèvements dans un remblai expérimental traité à la chaux, prélèvements réalisés trois ans après la construction du remblai. Les résultats montrent que le traitement à la chaux conserve des effets significatifs sur les propriétés de retrait/gonflement de l'argile traitée prélevée dans le remblai : son potentiel de retrait/gonflement est inférieur de moitié à celui de l'argile non traitée. Cependant, il est très supérieur au potentiel de retrait/gonflement de l'argile traitée déterminée sur des éprouvettes fabriquées au laboratoire après un mois de cure. Si l'on prend pour références les éprouvettes fabriquées au laboratoire, on peut conclure à une perte d'efficacité significative du traitement à la chaux, trois ans après la construction du remblai, cette conclusion rejoignant des observations réalisées précédemment dans les quelques études disponibles sur le sujet. Les causes de cette dégradation ne peuvent pas être clairement identifiées. On peut cependant supposer qu'elle résulte de l'accumulation de sollicitations environnementales sur le remblai (gel/dégel, humidification/séchage). Un suivi dans le temps du remblai aurait été nécessaire pour estimer ces sollicitations. Par ailleurs, cette dégradation des propriétés de l'argile traitée a été estimée en utilisant comme référence des résultats obtenus sur des éprouvettes préparées en laboratoire, ces conditions de préparation étant favorable à un mélange intime de la chaux et de l'argile et donc aux réactions entre argile et chaux.

Cette étude conclut donc à l'existence d'un risque de réduction en fonction du temps de l'efficacité de la chaux sur les propriétés de retrait/gonflement des argiles traitées à la chaux. Il est cependant nécessaire de confirmer ces résultats par la réalisation d'une étude plus complète qui intégrerait le suivi, depuis sa construction, d'une argile gonflante traitée à la chaux.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient V. Berche du laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Quentin pour avoir fourni les échantillons provenant du remblai expérimental ainsi que les nombreuses informations relatives à la construction du remblai expérimental et à son suivi.

Bibliographie

- ASTM D 5298-94 – Measurement of soil potential (suction). Using filter paper, vol. 4.09, 1995, p. 154-159.
- Bell F.G. – Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 1996, 1996, p. 223-237.
- Berche V. – *Réutilisation d'argiles très plastiques en corps de remblais routiers : expérimentation sur le chantier de l'autoroute A34 (Charleville-Rethel)*. Rapport de recherche du Centre d'études, techniques de l'équipement Nord-Picardie, opération 11L031, 2007, 42 p.
- Brandl H. – Alteration of soil parameters by stabilization with lime. *10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, vol. 3, 1981, p. 587-594.
- Cuisinier O., Masroufi F. – Testing the hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil. *Geotechnical Testing Journal*, 27, 2004, p. 598-606.
- Cuisinier O., Masroufi F. – Hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil over a wide suction range. *Engineering Geology*, vol. 81, n° 3, 2005, p. 204-212.
- Delage P., Howat M.D., Cui Y.J. – The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology*, vol. 50, 1998, p. 31-48.
- Guney Y., Sari D., Cetin M., Tuncan M. – Impact of cyclic wetting-drying on swelling behaviour of lime-stabilized soil. *Building and Environment*, 42, 2007, p. 681-688.
- Gutschick K.A. – Lime stabilization under hydraulic conditions. *4th Lime congress*, 1978, p. 1-20.
- Kelley C.M. – *A long range durability study of lime stabilized bases at military posts in the southwest*. Bulletin 328, National Lime Association, Arlington, 1988, 2nd éd.
- Khattab S.A.A., Al-Mukhtar M., Fleureau J.-M. – Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 2007, p. 358-366.
- LCPC-SETRA – *Guide technique : réalisation des remblais et des couches de forme*. LCPC-SETRA, fascicules I et II, 2000.
- Little D.N. – *Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. Arlington : National Lime Association, 1995.
- Nalbantoglu Z., Tuncer E.R. – Compressibility and hydraulic conductivity of chemically treated expansive clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 2001, p. 154-160.
- Rao S.M., Thyagaraj T. – Lime slurry stabilization of an expansive soil. *Geotechnical Engineering*, 153, 2003, p. 139-146.
- Sridharan A., Sivapullaiah P.V. – Mini-compaction test apparatus for fine grained soils. *Geotechnical Testing Journal*, 28, 2005, p. 240-246.
- Williams J., Shaykewich C.F. – An evaluation of polyethylene glycol (PEG) 6000 and PEG 20000 in the osmotic control of soil water matric potential. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 49, 1969, p. 397-401.