EFFETS DE SOLLICITATIONS HYDRIQUES CYCLIQUES SUR LE GONFLEMENT D'UN SOL ARGILEUX TRAITE A LA CHAUX

IMPACT OF CYCLIC WETTING AND DRYING ON THE SWELLING PROPERTIES OF A LIME-TREATED EXPANSIVE CLAY

Olivier CUISINIER, Dimitri DENEELE
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes

RÉSUMÉ – Le traitement à la chaux permet notamment de réduire significativement le gonflement des sols argileux. Cependant, la durabilité de cette amélioration a été mise en question. Les résultats de cette étude tendent à montrer qu'un sol très argileux stabilisé à la chaux pourrait recouvrir ses propriétés initiales de gonflement s'il est soumis à une succession de cycles hydriques.

ABSTRACT – Lime addition is known to reduce the swelling potential of expansive soils. However the permanence of that lime effect in the very long term is questionable. The obtained results clearly indicated that the lime treatment efficiency decreased with time when the treated soil is submitted to cyclic drying and wetting phases. This tendency was confirmed by several cyclic wetting/drying tests.

1. Introduction

Le traitement à la chaux est d'un usage très ancien et très répandu dans le cadre de l'amélioration des sols fins en vue d'améliorer leur comportement et leur maniabilité. Lorsque de la chaux vive est ajoutée à un sol, celle-ci s'hydrate. Ce phénomène provoque un dégagement de chaleur et une augmentation de la quantité d'ions Ca^{2+} et OH^- en solution dans le 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 (par ex. Little 1995). Parmi ces modifications, le traitement à la chaux permet aussi de réduire, voire de supprimer, le gonflement des sols argileux (par ex. Rao et Thyagaraj, 2003). Ainsi, le traitement à la chaux pourrait être intéressant pour prévenir le gonflement des sols argileux dans le cadre de l'emploi de ces matériaux en terrassement. Cependant, l'évaluation de la stabilité dans le temps de cet effet du traitement à la chaux devient primordiale. Cela n'est pas possible actuellement, en effet, il n'existe encore que très peu de travaux sur l'impact, notamment des sollicitations hydriques cycliques, climatiques, sur la pérennité des effets du traitement à la chaux.

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). 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. Il existe aussi quelques études de laboratoire. 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, ce potentiel de gonflement 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. En conclusion, ces études laissent supposer un effet négatif des cycles hydriques sur le gonflement des sols argileux traités à la chaux. Cependant, les cycles hydriques de ces études ont été réalisés entre la saturation (imposition de succion nulle) et de très faibles humidités relatives, succion de plusieurs centaines de MPa ce qui est plutôt sévère par rapport aux variations de succions auxquelles peuvent être soumis le cœur des ouvrages en terre (quelques MPa).

Dans ce contexte, une étude expérimentale a été réalisée pour évaluer la performance à long terme, en terme de gonflement, d'une argile traitée à la chaux soumise à des cycles hydriques. Des œdomètres à succion contrôlé par la méthode osmotique ont été utilisé pour réaliser des cycles hydriques dans une gamme de succions comprise entre 0 et 8 MPa. Cette étude a été réalisée à partir de deux types de matériaux. Il s'agit, d'une part, d'échantillons prélevés dans un remblai expérimental constitué d'argiles gonflantes traitées à la chaux. D'autre part, des expériences complémentaires ont été réalisées sur des échantillons de ce même matériau mais traité en laboratoire, ceci afin d'évaluer l'impact à court terme du traitement à la chaux.

2. Origine et propriétés des matériaux utilises dans l'étude

2.1 Remblais expérimentaux

Les reconnaissances géologiques menées dans le cadre de la réalisation 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. Face à la pénurie possible de matériau de bonne qualité sur ce chantier, les possibilités de réemploi de ces argiles très plastiques ont été considérées. Dans ce cadre, deux remblais expérimentaux (100 m de longueur, 10 m de large et 1,5 m de hauteur) ont été réalisés en 2003. Deux dosages en chaux ont été utilisés ainsi que différentes modalités de mises en œuvre et compactage du matériau traité. Les propriétés de ces remblais ont été suivies jusqu'à aujourd'hui.

Dans le cadre de cette étude, des sondages ont été réalisés dans un des remblais afin de déterminer les propriétés de gonflement de l'argile traitée. Ces sondages ont été réalisés en 2006, soit trois ans après la construction du remblai, période durant laquelle les remblais ont été soumis aux sollicitations climatiques. Dans le remblai sélectionné, cette argile A34 a été traité 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. Seule la partie centrale des sondages a été utilisée dans cette étude.

En parallèle à ces prélèvements, de l'argile A34 non traitée a été utilisée dans cette étude pour réaliser des essais complémentaires.

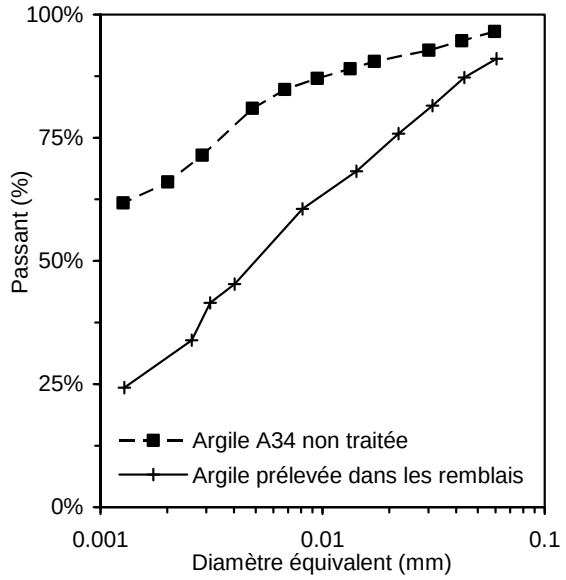


Figure 1. Courbes granulométriques.

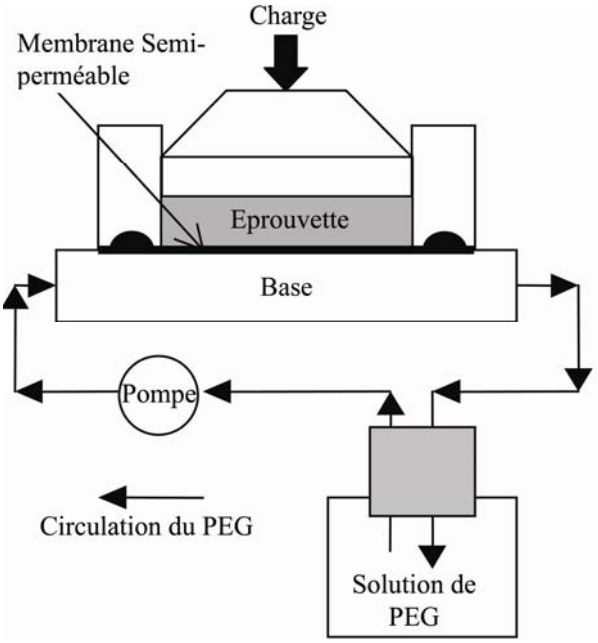


Figure 2. Œdomètre osmotique.

2.2. Propriétés de l'agrile A34 non traitée

Les propriétés d'identification de l'argile A34, avant l'ajout de chaux vive ont été déterminées. La limite de liquidité est de 98,1 %, l'indice de plasticité de 61,0 %, pour une valeur de bleu VBS de 10,7 g pour 100 g. La proportion d'éléments inférieurs à 2 µm est de 66,1 %. Ces données confirment que l'argile peut être classée comme A4. 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 $Mg.m^{-3}$. 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 densité sèche de 1,37 $Mg.m^{-3}$.

2.2. Caractérisation des prélèvements sur le remblai

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 $Mg.m^{-3}$. Le degré de saturation est compris entre 70 et 80 % environ. Ces caractéristiques sont très différentes des caractéristiques de construction du remblai en 2003. Ceci peut être relié au compactage en place qui a été moins efficace sur le chantier qu'en laboratoire, à un gonflement du sol après sa mise en place, ou bien aux effets des conditions climatiques sur le sol traité.

Une analyse de la granulométrie des prélèvements issus du remblai a été réalisée (figure 1). Le traitement à la chaux a induit une baisse importante de la teneur en particules fines (< 2 µm) qui est passée de 66,1 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 traité montre clairement que le traitement à la chaux a modifié de manière durable les propriétés de l'argile A34.

2.3. Caractéristiques des éprouvettes préparées au laboratoire

Quelques éprouvettes ont été reconstituées 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 et 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.

La préparation des éprouvettes traitées a été faite de manière à respecter autant que possible les normes françaises. Le sol humide et la chaux ont été mélangés. Ce mélange a ensuite été laissé au repos pendant une heure avant que le compactage soit réalisé. Ensuite 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 & Sivapullaiah (2005). Lorsqu'une période de cure était nécessaire, l'éprouvette et la cellule œdométrique étaient emballées dans du cellophane de manière à éviter les pertes d'eau. Toutes les éprouvettes ont été préparées avec les caractéristiques de l'optimum Proctor normal du sol (traité ou non).

3. Œdomètre à succion contrôlée par la méthode 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. Le schéma de principe de l'œdomètre osmotique utilisé est donné sur la figure 2, la base de l'œdomètre permettant de faire circuler la solution osmotique au contact de l'éprouvette. La relation entre la concentration en macromolécules et la succion a été caractérisée par différents auteurs (par ex. Cuisinier et Masrouri 2004). En l'état actuel et avec le dispositif employé, cette méthode a permis d'imposer des succions comprises entre 0 et 8,5 MPa. La hauteur initiale des éprouvettes est de 1 ± 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.

4. Comportement des échantillons provenant du remblai expérimental

4.1. Courbe de rétention d'eau

La succion matricielle des échantillons prélevés dans le remblai expérimental a été déterminée avec la technique du papier filtre. Un échantillon 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. La succion matricielle initiale est ainsi comprise entre 800 et 1000 kPa.

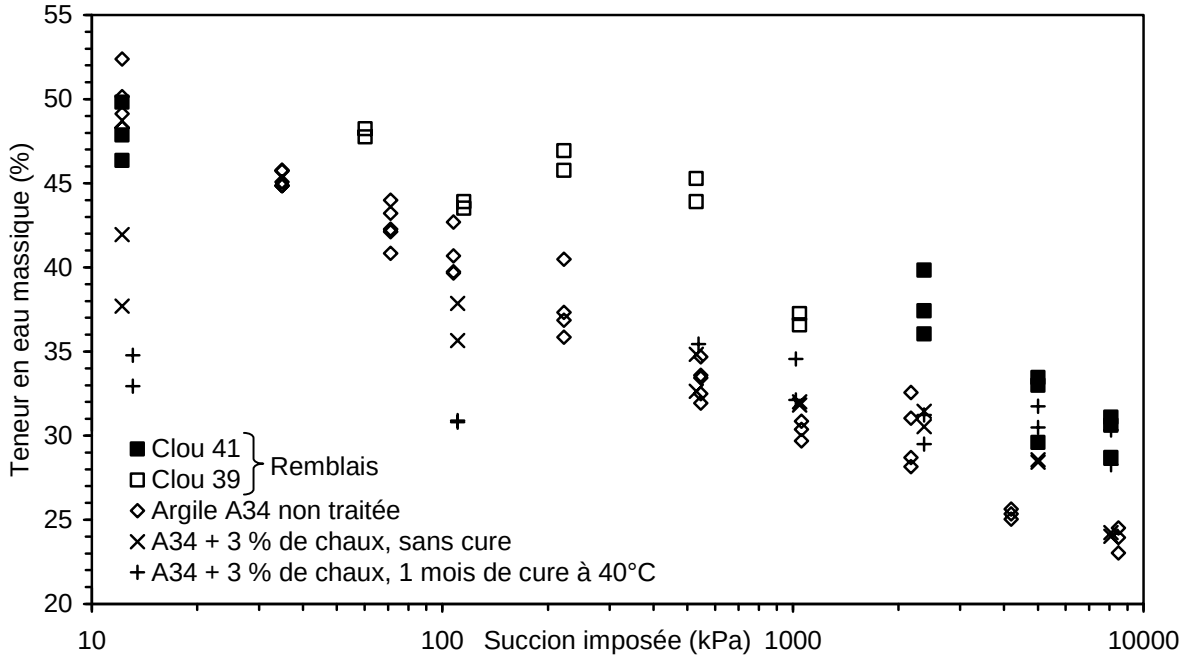


Figure 3. Courbe de rétention des matériaux étudiés.

Dans un deuxième temps, la courbe de rétention du matériau a été déterminée entre 10 kPa et 8 MPa à l'aide de la méthode osmotique. Des morceaux de sol compris entre 4 et 5 cm^3 ont été utilisés pour cette détermination. Pour chaque succion, plusieurs morceaux ont été utilisés. Pour une succion donnée, les morceaux étaient introduits dans une membrane semi-perméable, la membrane fermée étant ensuite introduite dans 500 mL de solution osmotique. Après 7 jours, la teneur en eau massique de chaque morceau a été déterminée, de même que la concentration de la solution pour le calcul de la succion imposée. La courbe de rétention a été déterminée sur deux carottes (Clous 41 et 39) pour estimer la variabilité de la courbe de rétention au sein du remblai. Les résultats sont donnés sur la figure 3. Les résultats obtenus sur les deux sondages sont assez similaires.

4.2. Propriétés de gonflement des prélèvements

Plusieurs séries d'essais ont été réalisées pour évaluer les propriétés de gonflement de l'argile A34 prélevée dans le remblai expérimental. Le potentiel de gonflement libre a été déterminé dans un œdomètre classique sous une contrainte verticale de 10 kPa. Il est inférieur à 0,5 % de la hauteur initiale. Cette valeur peut être comparée au potentiel de gonflement de l'argile, de l'ordre de 13 % pour une teneur en eau initiale de 35 %, c'est-à-dire proche de la teneur en eau *in situ*.

Ensuite, 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 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 de ces essais sont donnés sur la figure 4a. Les résultats montrent que la première phase d'humidification a induit une augmentation de volume limitée. Le premier cycle d'humidification/séchage induit des déformations irréversibles de retrait alors que les cycles ultérieurs n'induisent pas de déformations irréversibles.

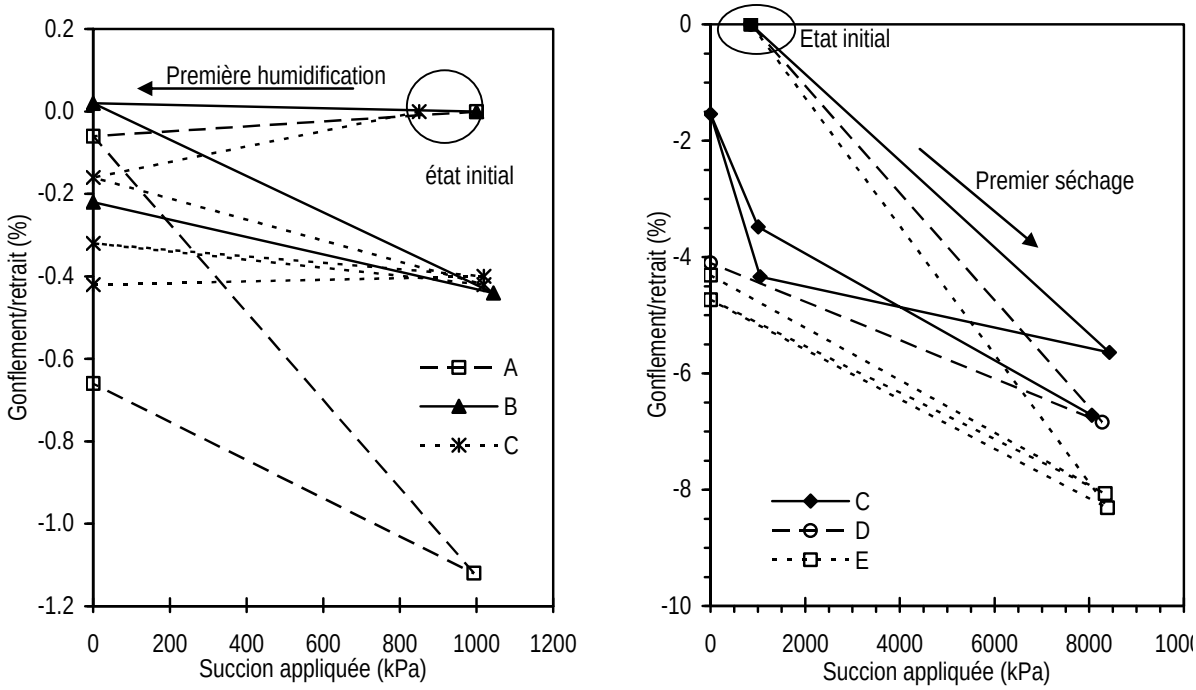


Figure 4. Influence de cycles hydriques successifs sur les échantillons intacts : (a) entre 0 et 1000 kPa ; (b) entre 0 et 8000 kPa.

Ensuite, trois autres échantillons ont été soumis à des cycles hydriques dans une gamme de succion comprise entre 0 et 8000 kPa (figure 4b). La première phase de séchage jusqu'à 8000 kPa 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 1000 kPa. Par ailleurs, il apparaît qu'un gonflement significatif ait accompagné la phase d'humidification qui a suivi la première dessiccation. L'essai C, qui comporte une succion intermédiaire entre 8000 et 0 kPa permet de voir que le gonflement est surtout produit entre 1000 et 0 kPa. Il apparaît ainsi que les propriétés de gonflement de l'argile A34 sont très dépendantes de l'amplitude de la sollicitation hydrique imposée.

5. 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 avec ceux obtenus pour des échantillons prélevés dans le remblai sur la figure 3. Les résultats montrent que le traitement à la chaux influence de manière significative le comportement de l'argile. Ainsi, la capacité de rétention d'eau de l'argile A34 traitée à 3 % de chaux

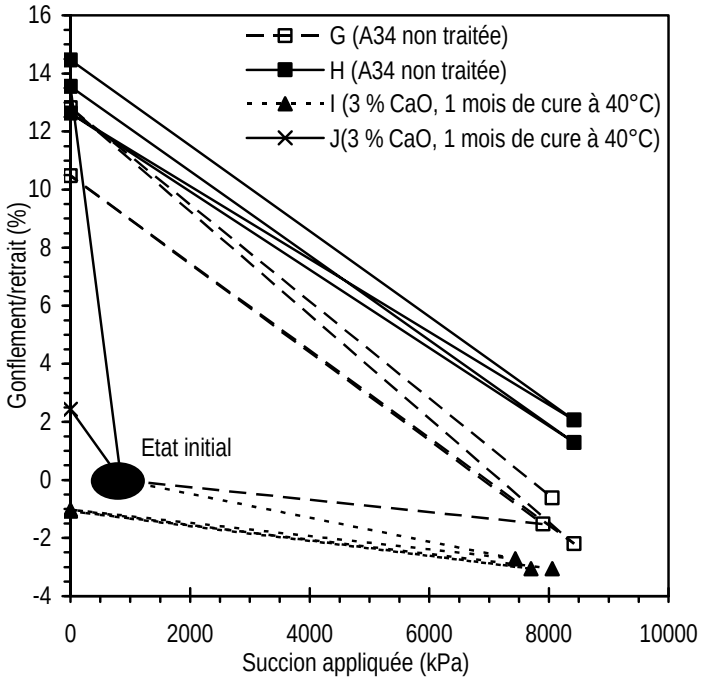


Figure 5. Influence de cycles hydriques successifs sur les échantillons reconstitués.

est plus faible que l'argile A34 non traitée pour les succions inférieures à 200 kPa. Cependant, il semble que la capacité de rétention d'eau de l'argile traitée à 3 % de chaux soit supérieure à celle de l'argile non traitée pour les succions supérieures à 1 MPa. Ce point traduit sans doute une profonde réorganisation microstructurale de l'argile suite au traitement. L'effet du temps de cure, à teneur en eau constante et 40°C, peut être apprécié. Une tendance à la diminution de la capacité de rétention d'eau avec la cure est mise en évidence.

Par ailleurs, un autre point significatif est que la courbe de rétention d'eau des échantillons prélevés *in situ* est très significativement différente de la courbe de rétention déterminée à partir des échantillons traités reconstitués en laboratoire. Il apparaît que la capacité de rétention de l'argile A34 sous une succion de 10 kPa est voisine de la capacité de rétention de l'argile non traitée.

5.2. Gonflement des échantillons reconstitués au laboratoire

La figure 5 montre que le potentiel de retrait/gonflement de l'argile A34 est très fort lorsqu'elle n'est pas traitée avec de la chaux. Il apparaît que l'éprouvette traitée à 3 % de chaux et laissée en cure pendant 28 jours à 40°C ne présente plus de variation de volume importante lorsqu'elle est soumise à des cycles hydriques entre 0 et 8 MPa. Un léger retrait irréversible est observé lors de la première dessiccation. Ces essais permettent de montrer que le traitement à la chaux est efficace sur ce type d'argile pour réduire efficacement le potentiel de retrait/gonflement. Les cycles hydriques ne semblent pas avoir d'impact sur le gonflement/retrait.

6. Discussion et conclusion

La comparaison de l'ensemble de ces résultats permet d'évaluer l'évolution à moyen terme de l'efficacité du traitement à la chaux sur les propriétés de gonflement

de l'argile A34. Ainsi, le potentiel de gonflement/retrait des échantillons prélevés dans les remblais, traités à la chaux, est très supérieur à celui des échantillons traités à la chaux en laboratoire. On peut cependant observer, que trois ans après la construction du remblai, le potentiel de gonflement/retrait des échantillons prélevés dans le remblai reste significativement inférieur à celui de l'argile non traitée. Par ailleurs, la capacité de rétention sous de faibles succions, des échantillons prélevés dans le remblai est assez similaire à la capacité de rétention d'eau de l'argile non traitée, mais très supérieure à celle des échantillons traités au laboratoire. On peut aussi noter que les courbes de rétention sont très différentes entre les succions de 50 kPa jusqu'à 8000 kPa. Les propriétés d'identification géotechnique montrent aussi que le traitement à la chaux a un impact significatif sur l'argile A34 provenant des remblais.

L'ensemble de ces résultats montre que le traitement à la chaux conserve des effets sur l'argile A34, trois après la réalisation des remblais. Cependant, si l'on prend pour référence les essais réalisés sur les échantillons reconstitués en laboratoire, l'efficacité du traitement à la chaux diminue avec le temps. Il ressort aussi des résultats obtenus que le comportement de retrait/gonflement de l'argile A34 traitée provenant des remblais est fonction de la gamme de succion dans laquelle sont réalisés les cycles hydriques.

Il est maintenant nécessaire de déterminer les raisons qui expliquent cette baisse d'efficacité du traitement avec le temps. Il s'agit de déterminer l'influence relative des conditions environnementales auxquelles le remblai a été soumis et l'effet de ces conditions sur les processus physico-chimiques connus pour les sols traités.

7. Remerciements

Les auteurs remercient V. Berche du Laboratoire Régional de l'équipement de St Quentin pour avoir fourni les échantillons provenant du remblai expérimental ainsi que les informations relatives à sa construction.

8. Références bibliographiques

Cuisinier, O., Masrouri, F. (2004) Testing the hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil. Geotechnical Testing J. 27, 598-606.

Guney, Y., Sari, D., Cetin, M., Tuncan, M. (2007) Impact of cyclic wetting-drying on swelling behaviour of lime-stabilized soil. Building and Environment 42, 681-688.

Gutschick, K.A. (1978) Lime stabilization under hydraulic conditions. 4th lime congress, 1-20.

Kelley, C.M. (1988) A long range durability study of lime stabilized bases at military posts in the southwest. Bulletin 328, National Lime Association, Arlington, 2nd edition.

Khattab, S.A.A., Al-Mukhtar M., Fleureau J.-M. (2007) Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. J. of Materials in Civil Engineering, 19, 358-366.

Little, D.N. (1995) Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Arlington: National lime association.

Rao, S.M., Thyagaraj, T. (2003) Lime slurry stabilisation of an expansive soil. Geotechnical Engineering, 153, 139-146.

Sridharan, A., Sivapullaiah, P.V. (2005) Mini compaction test apparatus for fine grained soils. Geotechnical Testing J., 28, 240-246.