
Comportement hydromécanique des argiles traitées à la chaux : effet de la variation du poids volumique et de la teneur en eau

Marwen Bouasker—Aymen Kharrat — Muzahim Al-Mukhtar*

Centre de Recherche sur la Matière Divisée – UMR-CNRS 6619, 1b rue de la fêrolierie, 45071 Orléans Cedex 2

*muzahim.al-mukhtar@univ-orleans.fr

RÉSUMÉ. Ce travail de recherche fait partie d'un projet ANR intitulé TerDOUEST qui a pour objectif une meilleure connaissance du comportement des différents types d'argiles traitées après leurs mises en place. Cette étude vise à reproduire les conditions d'exécution de compactage des sols traités à la chaux. Des variations plausibles de la teneur en eau et du poids volumique sec de l'ordre de $\pm 10\%$ par rapport à l'OPN sont ainsi appliquées afin de voir leurs effets sur le comportement hydromécanique du matériau. Deux types d'argile sont utilisés : la bentonite calcique et la kaolinite dite « Polwhite ». Les propriétés hydromécaniques étudiées sont la pression de gonflement (P_g) et la résistance à la compression. Les pourcentages de chaux ajoutés sont respectivement, 0%, 2%, 3% et 5% pour la kaolinite et 0%, 2%, 5%, 6% et 10 % pour la bentonite. L'ensemble des essais est réalisé à 28 jours de maturation. Les résultats obtenus montrent que la chaux ajoutée réduit remarquablement la pression de gonflement, celle-ci s'annule à 3% de chaux pour la kaolinite et 6% de chaux pour la bentonite. La pression de gonflement et la résistance à la compression croissent avec l'augmentation du poids volumique sec. Quant à la variation de la teneur en eau, elle n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la compression, son augmentation réduit la pression de gonflement.

ABSTRACT. This research is a part of an ANR project entitled TerDOUEST which aims to a better understanding of the behaviour of different types of clay treated after their compaction. This study aims to reproduce the conditions of implementation of compacting soils treated with lime. Plausible variation of water content and dry density of about 10% are applied and compared to the standard Proctor to see their effects on the hydromechanical behaviour of the material. Two types of clay are used: calcium bentonite and kaolinite called "Polwhite". The hydromecanical properties studied are the swelling pressure (P_g) and the compressive strength. The percentages of lime added are respectively 0%, 2%, 3% and 5% for kaolinite and 0%, 2%, 5%, 6% and 10% for bentonite. All tests were conducted at 28 days of curing time. The results showed that the lime significantly reduced the swelling pressure, it decreased down to zero at 3% lime for kaolinite and 6% lime for bentonite. The swelling pressure and compressive strength increased with increasing dry density. The variation of water content had no significant effect on compression resistance, its increase reduced the swelling pressure.

MOTS-CLÉS : argile, gonflement, pression de gonflement, chaux, traitement, stabilisation.

KEY WORDS : clay, swelling, swelling pressure, lime, treatment, stabilisation.

1. Introduction

Cette étude fait partie des objectifs d'un projet financé par l'Agence Nationale pour la Recherche intitulé TerDOUEST (Terrassements Durables - OUvrages En Sols Traités). Ce projet a pour objectif d'augmenter notablement la réutilisation des matériaux du site dans les projets de terrassement en permettant d'étendre le traitement à des sols jugés aujourd'hui inaptes (très argileux, gonflants...) et d'élargir le champ d'utilisation des matériaux traités (zones inondables, soutènements, assises de chaussées...).

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au ciment est une technique éprouvée et parfaitement au point, qui a connu un très fort développement depuis une vingtaine d'années. Ce développement est dû essentiellement à des impératifs économiques associés à un souci écologique croissant qui exige d'utiliser au maximum les matériaux situés dans l'emprise des nouveaux projets d'infrastructure (zéro emprunt/zéro déchet).

Les interactions sol-chaux dépendent fortement de la nature du sol et les mécanismes sont principalement l'échange cationique suivi de la réaction pouzzolanique (Lasledj, 09 ; Khattab *et al.*, 07 ; Al-Rawas & Goosen, 06). Ces deux phénomènes qui conditionnent le comportement hydromécanique du sol traité dépendent quant à eux de plusieurs paramètres tels que les conditions de compactage in situ (Bouasker *et al.*, 10) la température (Al-Mukhtar *et al.*, 10) et l'humidité. Dans cette étude, on se limite à étudier uniquement l'effet des paramètres de compactage sur le comportement hydromécanique. En effet pendant le compactage du sol, il est souvent difficile de maîtriser sur chantier la teneur en eau et le poids volumique sec à l'Optimum Proctor Normalisé (OPN). Dans les projets de terrassement, le compactage du sol est souvent contrôlé afin d'éviter des fortes variations de la teneur en eau et du poids volumique par rapport à l'OPN. Ainsi, il est souvent conseillé de respecter une variation de $\pm 10\%$ autour de l'OPN (NF XP P-94-105).

Dans ce contexte, ce travail de recherche vise à étudier l'effet de la variation de la teneur en eau et du poids volumique sec sur le potentiel de gonflement et la résistance à la compression de deux types d'argiles traitées à la chaux. Les argiles choisies sont la bentonite calcique et la majoritairement kaolinite (90%) dite « polwhite ». Les pourcentages de chaux ajoutés sont respectivement de 0%, 2%, 3% et 5% pour la kaolinité et de 0%, 2%, 5%, 6% et 10 % pour la bentonite. Les matériaux non traités ont été également étudiés afin d'avoir une référence de comparaison. La durée de maturation est de 28 jours pour l'ensemble des éprouvettes. Cette durée représente l'âge de référence des sols traités à la chaux et également à la chaux et au ciment.

2. Programme expérimental

2.1. Protocoles de mesure

L'essai Proctor est réalisé selon la norme NF P94-093. Cet essai a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un poids volumique sec maximal. Les limites d'Atterberg et la résistance à la compression sont réalisées respectivement selon les normes NF P94-051 et NF P94-077. L'éprouvette remaniée compactée à l'OPN a pour dimension 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur.

La méthode de « gonflement empêché » a été appliquée pour mesurer la pression de gonflement (Bouasker *et al.*, 10 ; Lasledj, 09). L'essai consiste à saturer une éprouvette de matériau dans un oedomètre et de mesurer la force exercée verticalement par le matériau à déformation empêchée (volume constant). Les dimensions des échantillons confectionnés sont de 65 mm de diamètre et de 10 mm de hauteur.



Figure 1 : à gauche : cellule de mesure de la pression de gonflement, à droite : cellule de confection des éprouvettes de compression.

2.2. Préparation des échantillons

La méthode de préparation des éprouvettes, du malaxage au compactage, utilisée pour les différents essais de compression et de gonflement est la suivante :

- L'ajustement à la teneur en eau de compactage avec de l'eau déminéralisée.
- Le malaxage se fait exclusivement avec un malaxeur à couteaux. La durée du malaxage est définie dans la norme Proctor (NF P 94-093). Le critère d'arrêt de la phase de malaxage est l'atteinte d'une mouture 0-5 mm.
- Les matériaux sont conditionnés dans des sachets fermés hermétiquement et sont conservés à la température ambiante de la salle d'essai ($\approx 20^{\circ}\text{C}$). Le temps de repos nécessaire pour assurer une répartition homogène de l'eau au sein de l'échantillon est de 24 heures au minimum pour tous les matériaux.
- La teneur en eau de chaque lot sera contrôlée avant utilisation, la marge d'erreur est de ± 1 point de teneur en eau.

À la reprise du matériau, et après contrôle de la teneur en eau, on ajoute la quantité de chaux* nécessaire pour le traitement et on procède au malaxage. Immédiatement après le malaxage de l'argile et de la chaux, on procède à la fabrication des éprouvettes pour les essais de compression et de gonflement. Ces éprouvettes sont ensuite protégées par un film de paraffine avant d'être stockées à 20°C pendant 28 jours.

Les pourcentages de chaux étudiés sont respectivement 0%, 2% et 5% pour la kaolinite et 0%, 2%, 5% et 10% pour la bentonite. A la lumière des résultats obtenus et afin d'affiner l'étude pour déterminer le pourcentage de chaux au-delà duquel la pression de gonflement devient nulle, on a ajouté une formulation à 3% de chaux pour la kaolinite et une autre à 6% de chaux pour la bentonite.

Trois lots d'échantillons non traités et traités à la chaux sont préparés :

- Echantillons à l'OPN : $w = w_{OPN}$ et $\gamma = \gamma_{dOPN} (\gamma_{dmax})$,
- Echantillons avec teneur en eau à l'OPN et avec $\gamma_{dOPN} \pm 10\%$,
- Echantillons avec γ_{dOPN} et $w_{OPN} \pm 10\%$.

3. Résultats et discussion

3.1. Composition du matériau sol

L'argile de type kaolinite est constituée majoritairement de kaolinite, de muscovite et d'une faible quantité de quartz avec un indice de plasticité de 27%. La bentonite est une argile très plastique (IP = 162%) constituée principalement de smectite (85%), de feldspaths (15%) et de cristobalite (5%). Les résultats des essais de caractérisation géotechniques, mécaniques et hydromécaniques de ces deux sols argileux non traités sont regroupés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractérisation des matériaux

	Bentonite	Kaolinite
Indice de plasticité ($\pm 5\%$)	162	27
Pression de gonflement libre à l'OPN (± 20 kPa)	995	392
Résistance à la compression à l'OPN (± 10 kPa)	117	224
Teneur en eau OPN (%)	39	24
Poids volumique sec OPN (kN/m^3)	11,87	14,52
Surface spécifique (m^2/g)	48	13
Composition minéralogique	Kaolinite	90
	Muscovite	10
	Smectite	85
	Feldspaths	10
	Cristobalite	5

* La chaux vive (CaO) utilisée pour le traitement provient du groupe Lhoist.

3.2. Pression de gonflement

3.2.1. Effet de la chaux ajoutée

La figure 2 présente l'évolution de la pression de gonflement (P_g) en fonction du pourcentage de chaux pour les deux matériaux (bentonite et kaolinite) à différents poids volumiques et à teneur en eau constante (w_{OPN}). D'après la Figure 2, on constate que la pression de gonflement de la bentonite diminue sensiblement avec 5% de chaux; au-delà de ce pourcentage, le gonflement devient négligeable. La pression de gonflement de la bentonite compactée à l'OPN, s'annule à 6% de chaux. Pour la kaolinite, la pression de gonflement diminue de 60% pour 2% de chaux et s'annule à 3% de chaux ajoutée pour l'échantillon compacté à l'OPN.

A 28 jours de maturation, l'échange cationique est le mécanisme dominant dans la réaction chaux argile devant la réaction pouzzolanique qui peut commencer rapidement mais qui se poursuit à long terme. L'échange cationique qui résulte de l'échange de cations calcium apportés par la chaux et des cations normalement présents absorbés à la surface de l'argile, modifie considérablement les propriétés hydromécaniques (Bell, 96 ; Boardman *et al.*, 01).

La modification survient aussi par la réaction de la chaux avec la surface argileuse dans un environnement au pH élevé : la minéralogie de la surface argileuse est altérée lorsqu'elle réagit avec les ions de calcium pour former des produits cimentaires (James *et al.*, 08 ; Little, 96 ; Young & Ouhadi, 07). Il en résulte une réduction de la plasticité et du gonflement et une réduction de la capacité de rétention de l'humidité. Cet effet est d'autant plus accentué que le pourcentage en chaux est important.

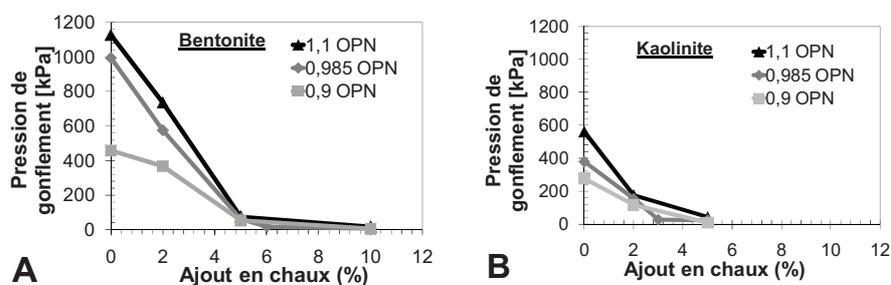


Figure 2 : Effet de la chaux ajoutée sur la pression de gonflement des éprouvettes compactées à des γ_d différents et à $w = w_{OPN}$. A : bentonite, B : kaolinite.

3.2.2. Effet de la variation de la teneur en eau « w »/ w_{OPN}

La figure 3 montre l'évolution de la pression de gonflement en fonction des variations de la teneur en eau de la kaolinite et de la bentonite à différents pourcentages d'addition en chaux.

D'après la figure 3, la pression de gonflement a une tendance à décroître avec l'augmentation de la teneur en eau initiale dans les échantillons traités et non traités. Cet effet est plus prononcé sur les matériaux non traités et à faible pourcentage de traitement. Au-delà de 2% d'ajout en chaux pour la kaolinite et 5% pour la bentonite, on remarque que le gonflement devient insensible vis-à-vis de la variation teneur en eau initiale. Pour une variation de la teneur en eau de $\pm 10\%$ autour de w_{OPN} , la chaux ajoutée réduit alors l'effet de la teneur en eau sur la pression de gonflement.

L'ajout de la chaux dans les argiles testées réduit d'autant plus la pression de gonflement que la teneur en eau est importante. Ce comportement est interprété par une efficacité accrue du traitement à la chaux en présence d'eau.

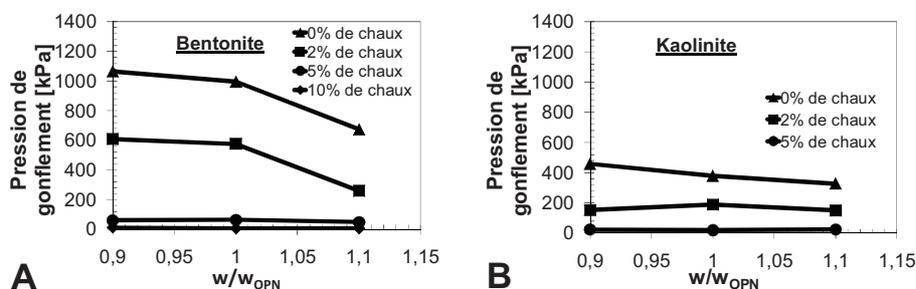


Figure 3 : Pression de gonflement (P_g) des échantillons traités et non traités en fonction de la variation de la teneur en eau ($\gamma = 0,985 \gamma_{OPN}$). A : bentonite, B : kaolinite.

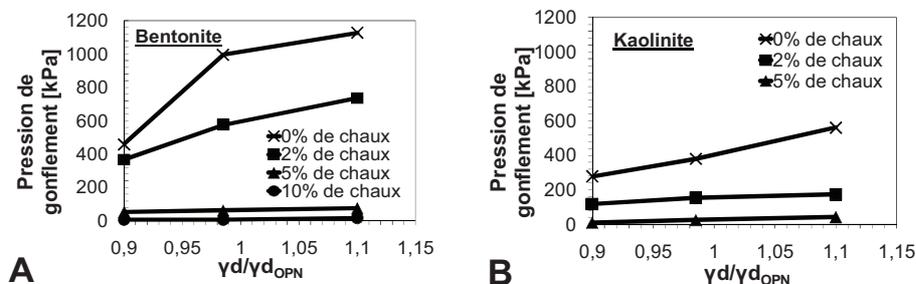


Figure 4: Pression de gonflement des échantillons traités et non traités compactés à différents poids volumiques ($w=w_{OPN}$), A : bentonite, B : kaolinite.

3.2.3. Effet de la variation du poids volumique sec « γ_d » / $\gamma_{d_{OPN}}$

L'influence de la variation du poids volumique sec (γ_d) a été étudiée sur des échantillons de bentonite et de kaolinite à trois poids volumiques secs : 0,9 ; 0,985 et 1,1 de $\gamma_{d_{OPN}}$ avec une teneur en eau constante égale à w_{OPN} .

La figure 4 montre que la pression de gonflement augmente avec le poids volumique sec pour les échantillons traités et non traités. Ceci est dû à l'accroissement de la quantité de matériaux gonflants par unité de volume avec une énergie de compactage plus forte à une teneur en eau identique. Cet accroissement de pression de gonflement est plus significatif dans les échantillons non traités. Dans le cas de l'argile traitée (au-delà de 2%), l'influence du poids volumique sec reste très limitée.

3.3. La résistance à la compression

3.3.1. Effet de la chaux ajoutée

La résistance à la compression des argiles étudiées à l'état naturel est de l'ordre de 0,12 MPa pour la bentonite et 0,22 MPa pour la kaolinite ce qui représente des faibles résistances mécaniques à l'OPN.

La figure 5.A montre l'amélioration significative de la contrainte à la rupture en fonction de l'addition en chaux à 28 jours de maturation. Une faible augmentation de résistance à la compression pour 2% de chaux ajoutée, alors qu'à 5% de chaux, on remarque une forte augmentation de la résistance.

Toujours, d'après la figure 5.A, on remarque que la pente « moyenne » de la courbe de compression est d'autant plus importante que le poids volumique sec est élevé. Pour la bentonite traitée à 5% de chaux, une augmentation de 10% du poids volumique sec, améliore la résistance à la compression de 30%. Une diminution de 10% du poids volumique sec par rapport à celle de l'OPN réduit la résistance à la compression de 53%. Le même constat est observé sur la kaolinite mais à des amplitudes réduites.

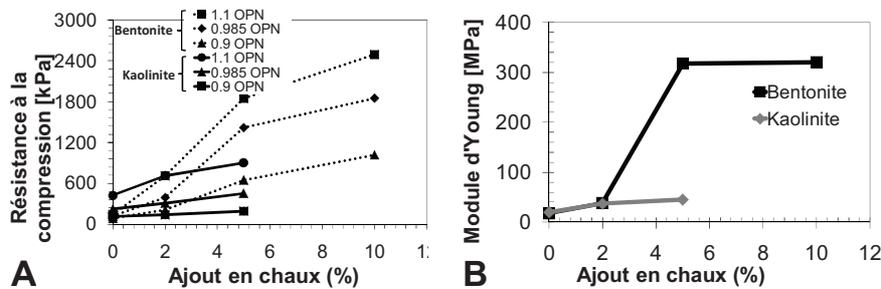


Figure 5 : Effet du traitement sur les propriétés mécaniques. A : effet de la chaux ajoutée sur la résistance à la compression (avec une variation du poids volumique sec, $w=w_{OPN}$), B : effet de la chaux ajoutée sur l'évolution du module d'Young à w et γ de l'OPN

La figure 5.B, montre une augmentation du module d'Young avec l'augmentation du pourcentage de traitement en chaux à γ et w de l'OPN. Une amélioration significative du module d'Young de la bentonite a été observée à 5% de chaux. Pour la kaolinite, le module d'Young ne dépasse pas 50 MPa contre 320 MPa pour la bentonite à 5% de traitement.

L'augmentation de la résistance à la compression simple est due au changement de structure et de la minéralogie à court terme et à l'augmentation de la cohésion produite avec le temps (avec la progression de la réaction pouzzolanique). En effet, certains sols peuvent produire des gains de solidité très élevés lorsqu'ils sont traités à la chaux (Sivapullaiah *et al.*, 00). La clé de l'efficacité du traitement à la chaux est un sol réactif et un bon protocole de formulation. D'après la figure 5.A on remarque que la bentonite est beaucoup plus réactive que la kaolinite. A 5% de chaux, la résistance à la compression de la bentonite est 7 fois plus importante que celle de la kaolinite (Figure 5.A). La réactivité est issue de deux phénomènes : la capacité d'échange cationique et la réaction pouzzolanique suite à la réaction de l'argile avec la chaux.

3.3.2. Effet de la variation de la teneur en eau « w »/ w_{OPN}

L'évolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau par rapport à l'OPN (Figure 6) ne montre aucun effet significatif de la teneur en eau quelque soit la teneur en chaux et quelque soit le type de matériaux. Ceci signifie que la quantité d'eau existante est largement supérieure à la quantité d'eau nécessaire pour la réaction chaux argile (notamment l'échange cationique et au déclenchement de la réaction pouzzolanique).

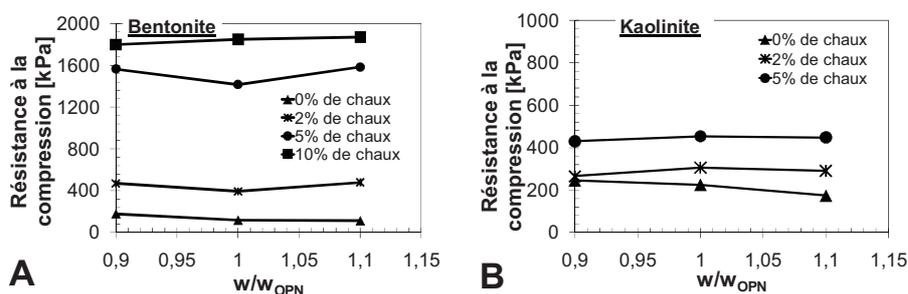


Figure 6 : Effet de la teneur en eau sur la résistance à la compression à un poids volumique sec égal à 0,985 de l'OPN, A : bentonite, B : kaolinite.

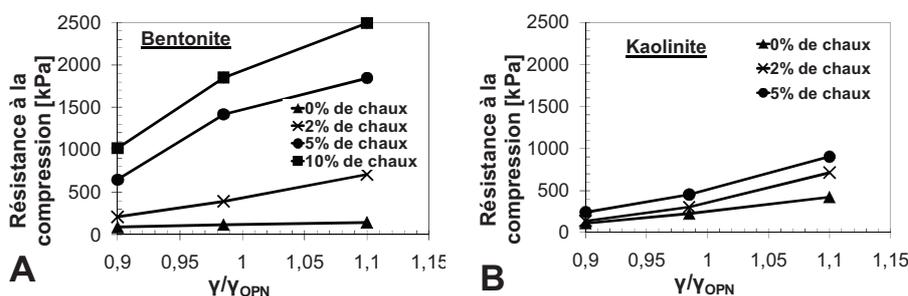


Figure 7 : Effet de la variation du poids volumique sec sur la résistance à la compression à une teneur en eau égale à w_{OPN} . A : bentonite, B : kaolinite.

3.3.3. Effet de la variation du poids volumique sec « γ_d »/ $\gamma_{d_{OPN}}$

L'effet de la variation du poids volumique sec a été étudié sur des échantillons de bentonite et de kaolinite, pour une teneur en eau égale à w_{OPN} .

Pour un matériau donné, l'augmentation du poids volumique sec s'accompagne toujours d'une augmentation de la résistance mécanique. La Figure 7 montre que la contrainte à la rupture croît avec l'augmentation du poids volumique sec pour les échantillons traités et non traités.

La pente des courbes croît avec l'augmentation de la quantité de chaux ajoutée, ce qui signifie un effet de plus en plus important du poids volumique sec sur la résistance à la compression. L'ajout de la chaux amplifie l'effet de γ_d sur la résistance à la compression avec une relation quasi-linéaire croissante entre la résistance à la compression et le poids volumique sec.

4. Conclusion

Cette étude a montré l'effet des variations plausibles (recommandées par la norme NF XP P-94-105) de la teneur en eau et du poids volumique sec ($\pm 10\%$) par rapport à ceux de l'OPN des deux argiles traitées à la chaux sur la pression de gonflement et sur la résistance à la compression. D'après cette étude, après 28 jours de maturation des argiles traitées, on retient les points suivants :

- La chaux ajoutée réduit remarquablement la pression de gonflement dans les deux argiles testées pour des variations de l'ordre de $\pm 10\%$ par rapport à l'OPN (w_{OPN} et $\gamma_{d_{OPN}}$). La pression de gonflement s'annule à 3% et 6% de chaux pour la kaolinite et pour la bentonite respectivement.
- La chaux ajoutée améliore les propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression et le module de rigidité. Le module d'Young de la bentonite traitée avec 10 % de chaux est 10 fois plus important que celui de la bentonite à l'état naturel et de 2,5 fois pour la kaolinite.
- Pour les matériaux non traités et la bentonite traitée à 2%, la pression de gonflement mesurée à l'OPN varie sensiblement avec les modifications imposées à la teneur en eau et au poids volumique sec : la pression de gonflement croît avec le poids volumique sec et décroît avec la teneur en eau. Pour les autres formulations l'effet des variations de la teneur en eau et du poids volumique sec par rapport à l'OPN sur la pression de gonflement semble très limité.
- Les variations du poids volumique sec ($\pm 10\%$ par rapport au poids volumique maximal) modifient fortement la résistance à la compression et changent ainsi les conditions de mise en œuvre des matériaux traités à la chaux, tels que l'énergie de compactage.
- Une légère variation de la résistance à la compression est constatée (6%) avec la teneur en eau initiale lorsque les poids volumiques secs sont maintenus à $\pm 10\%$ de celle de l'OPN.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Nationale de la Recherche pour le support financier de cette étude.

6. Bibliographie

- Al-Mukhtar M., Lasledj A., Alcover J. F., "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C", *Applied Clay Science*, vol. 50, n° 2, 2010, p. 191-198.
- Al-Rawas A. A., Goosen M.F.A., "Expansive soils: recent advances in characterization and treatment", *Taylor & Francis group/Balkema*, London, 2006.
- Bell F.G., "Lime stabilization of clay minerals and soils", *Engineering Geology*, vol. 42, n° 4, 1996, p. 223-237.
- Boardman D. I., Glendinning S., Rogers C. D. F., "Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes", *Géotechnique*, vol. 51, n° 6, 2001, p. 533 –543.
- Bouasker M., AL-Mukhtar M., Shneider O., « Caractérisation d'une Argile traitée à la chaux après six ans de maturation », XXVIII^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. La Bourboule, 2 au 4 juin 2010.
- Khattab S.A.A., Al-Mukhtar M., Fleureau J.M., "Long-term characteristics of a lime treated plastic soil", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, n°4, 2007, p. 358-366.
- Lasledj A., « Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques », Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2009.
- James R., Kamruzzaman A. H. M., Haque A., Wilkinson A., "Behaviour of lime-slag-treated clay", *Proceedings of the ICE - Ground Improv.*, vol. 161, n° 4, 2008, p. 207 –216.
- Little D.N., "Fundamentals of the stabilization of soil with lime". *National Lime Association Bulletin, Arlington, USA*, vol. 332, 1996, p. 1-20.
- Sivapullaiah P. V., Sridharan, A., and Bhaskar Raju, K.V., "Role of Amount and Type of Clay in the Lime Stabilisation of Soils", *Proceedings of the ICE - Ground Improv.*, Vol. 4 n° 1, 2000, p. 37–45.
- Young R. N., & Ouhadi V. R., "Applied Clay Science Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils", *Applied Clay Science* vol. 35, 2007, p. 238-249.