

**ETUDE COMPARATIVE DE LA STABILISATION CHIMIQUE D'UN SOL
DE KINSHASA À LA CHAUX ET À LA POUDRE DE CALCITE**
**COMPARATIVE STUDY OF CHEMICAL STABILIZATION OF A KINSHASA
SOIL WITH LIME AND CALCITE POWDER**

BASILE LUSE BELANGANAYI¹, NABIL ABOU-BEKR²

¹Université Officielle de Ruwenzori, Faculté des Sciences

²Université de Tlemcen, Faculté de technologie

RÉSUMÉ

L'utilisation de la chaux comme stabilisant des sols argileux est un remède efficace en géotechnique. La chaux agit essentiellement par un mécanisme caractérisé par la dissolution des minéraux argileux dans un milieu alcalin suivie d'une recombinaison du calcium de la chaux avec la silice et l'alumine issues de la dissolution des argiles. Ce travail étudie la possibilité d'obtenir des résultats similaires avec la poudre de calcite employée conjointement avec une solution de soude caustique une fois normale. A cet effet un sol argileux de la banlieue de Kinshasa a été stabilisé par les deux méthodes avec différents teneurs en stabilisant. La comparaison des résultats de ces deux méthodes montrent que la stabilisation à la poudre de calcite, bien que moins efficace que celle à la chaux, augmente la résistance à la compression et l'indice CBR du sol d'étude et réduit son potentiel de gonflement. L'optimum est atteint avec la teneur de 10% en poudre de calcite.

Mots clés : Stabilisation chimique, résistance à la compression, Indice CBR, potentiel de gonflement, calcite, soude caustique.

ABSTRACT

The use of lime as stabilizer is a efficient remedy in geotechnical engineering. Lime acts essentially by a mechanism characterized by the dissolution of clay minerals in alkaline medium followed by recombination of calcium lime with silica and alumina from the dissolution of clays. This work studies the possibility of obtaining similar results with calcite powder used in conjunction with a solution of caustic soda once normal. For this purpose a clay soil on the outskirts of Kinshasa was stabilized by the two methods with different levels of stabilizer. Comparison between the results of both methods show that stabilization to calcite powder, although less effective than stabilization to lime, increases the unconfirmed compressive strength and CBR of the studied soil and reduces its swelling potential . The optimum is reached at the concentration of 10% of calcite powder.

Keywords: Chemical stabilization, unconfirmed compressive strength, CBR index, calcite, caustic soda.

1. INTRODUCTION

Le traitement des sols à la chaux vive ou éteinte est une technique éprouvée et parfaitement au point qui a connu un très fort développement depuis une vingtaine d'années, Réf. [5]. De nos jours, il existe un cumul de travaux de recherches faisant état du succès de la chaux dans la stabilisation des sols, Réf. [2, 10, 24 & 27].

La chaux est l'un des stabilisants qui présente un intérêt croissant pour la stabilisation des sols qui contiennent une fraction argileuse non négligeable, autrement dit, des sols avec une plasticité élevée, Réf. [11 & 27]. Elle agit essentiellement par un mécanisme caractérisé par la dissolution des minéraux argileux dans un milieu alcalin créé par la chaux, suivie d'une recombinaison du calcium issu de la chaux avec la silice et l'alumine provenant de la dissolution des argiles : c'est la réaction pouzzolanique, Réf. [11 & 25]

La réaction pouzzolanique est de loin le mécanisme le plus important qui conditionne le comportement hydromécanique du sol traité à la chaux. Ces principaux résultats sont : la réduction de la plasticité et de la capacité de rétention de l'eau ainsi que l'augmentation de la résistance mécanique, Réf. [9 & 11].

Ce travail se propose d'étudier la possibilité d'obtenir des résultats donnés par la chaux éteinte sur un sol argileux, avec la poudre de calcite, employée conjointement avec une solution une fois normale d'hydroxyde de sodium (soude caustique). L'hypothèse étant que l'hydroxyde de sodium crée un environnement alcalin dans le sol favorisant ainsi l'échange du calcium entre la calcite et les argiles du sol. Notre participation dans ce contexte consiste à proposer une nouvelle technique chimique de stabilisation à la fois simple, économique et écologique.

Plus précisément, ce travail vise à étudier l'effet de la calcite sur la variation de la teneur en eau, du poids volumique sec, du potentiel de gonflement, de la résistance à la compression et de l'indice CBR.

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1. Sol et matériaux utilisés

Le sol choisit pour l'étude provient du quartier *Velemani*, dans la commune de Mont-ngafula, à la périphérie de la ville de Kinshasa. Les propriétés physico-chimiques et mécaniques sont regroupées dans le tableau 1. La distribution granulométrique, Réf. [6 & 25], classe ce sol comme étant un limon argilo-sableux. L'identification comme *argile peu plastique* est donnée par le cheminement des méthodes de classification USCS (CL),

Réf. [25] et AASHTO (A-6), Réf. [6 & 25]. Le coefficient d'activité de ce sol le catégorise comme une Kaolinite, Réf. [6].

Tableau 1 : propriétés physico-chimiques et mécaniques du sol (physico-chemical and mechanical properties of the studied soil)

Teneur en eau optimale w_{opt} en %			11,30±0,40
Densité sèche maximale (en T/m ³)			1,97± 0,01
Distribution granulométrique	Sable (%)	Sable grossier	0,48 ± 0,01
		Sable fin	69,02±1,45
	Limon (%)		8,70 ± 0,18
	Argile (%)		21,80±0,35
Limite de liquidité, w_L (%)			22,97±0,35
Limite de plasticité, w_p (%)			13,82±1,28
Indice de plasticité, I_p (%)			9,15±0,93
Coefficient d'activité			0,42±0,01
Indice C.B.R			32,00±1,00
Teneur en carbonate (%)			0,46±0,02
Teneur en matière organique (%)			7,66±0,47
Capacité d'échange cationique (még./100g de sol)			12,80±0,61
pH			4,32 ± 0,19

La poudre de calcite (carbonate de calcium, $CaCO_3$) utilisée est un produit de la cimenterie de Lukala, commercialisé en sac de 30 kg. Elle titre 86,03% en carbonate de calcium pur.

L'hydroxyde de sodium est un produit pour analyse de la maison *AnalaR NORMAPUR* ; l'hydroxyde de calcium un produit du commerce. Son dosage a montré qu'il contenait 76,04% d'hydroxyde de calcium pur.

2.2. Echantillonnage

Les échantillons de sol ont été prélevés dans deux sites différents à une profondeur de 50 centimètres, dans des fouilles creusées à cet effet. Après prélèvement, tous les échantillons furent mélangés et conditionnés dans des sacs étanches en fibres synthétiques.

2.3. Techniques d'analyse

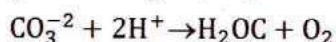
Le pH a été mesuré par une électrode de verre sur une suspension contenant 10 g de sol, par la méthode décrite par Pauwels J.M & al., Réf. [22].

La capacité d'échange cationique était déterminée avec l'acétate d'ammonium à pH 7. Nous l'avons effectué en trois phases, Réf. [22]:

- saturation du sol par l'ion ammonium et extraction des bases échangeables ;
- lavage du sol à l'alcool, afin d'éliminer l'excès d'ammonium ;
- dosage de l'ammonium par potentiométrie.

Le dosage de la matière organique était effectué par la méthode de Walkey et Black, Réf. [22].

Nous avons réalisé le dosage de l'ion carbonate (CO_3^{-2}) par volumétrie. L'analyse se base sur une préalable décomposition des échantillons par l'acide chlorhydrique avec libération du gaz carbonique (CO_2) suivant l'équation :



Le gaz carbonique dégagé est piégé par la potasse (KOH) en excès. Par titrage en retour de l'excès de KOH, on déduit la quantité de CO_2 libéré, et partant la teneur en CO_3^{-2} , Réf. [21].

L'Analyse granulométrique a été effectuée suivant les normes ASTM D421 et ASTM D2487, Réf [21 & 25].

Les limites d'Atterberg et la résistance à la compression ont été respectivement déterminées suivant les procédures d'essai normalisées définies dans les normes ASTM D 4318, Réf. [11], et ASTM D2166-85, Réf.[25].

L'essai Proctor modifié et l'essai CBR ont été réalisés respectivement suivant les normes ASTM D698, Réf. [25] et ASTM D1883 normes-05, Réf. [13].

Tous ces tests ont été réalisés avec des pourcentages différents de chaux et de poudre de calcite dans le sol d'étude afin de déterminer le pourcentage optimal de stabilisant.

Pour la stabilisation à la poudre de calcite, une solution d'hydroxyde de sodium une fois normale a servi de liquide de mouillage.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Etude de la compactabilité

La sensibilité à l'eau des mélanges se traduit par la différence des formes des courbes Proctor. On remarque sur la fig. 1 que pour l'état naturel, la courbe de compactage présente une forme accentuée à l'OPM, ce qui explique la plus grande sensibilité du sol non stabilisé. Pour les sols stabilisés, les courbes Proctor sont déplacées vers la droite et présentent une forme aplatie qui traduit une faible sensibilité à l'eau, Réf. [19].

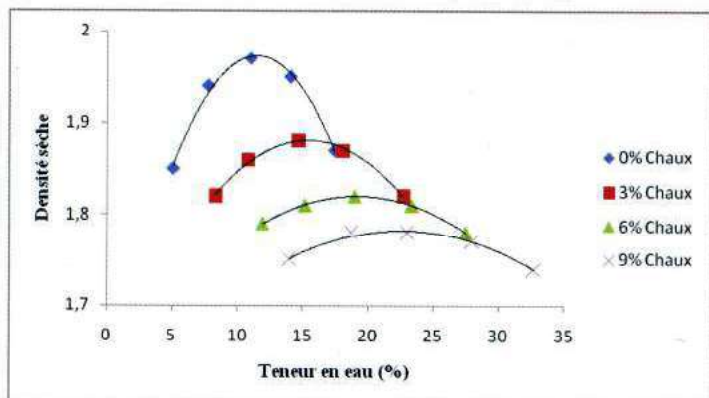


Figure 1 : Courbe Proctor du sol d'étude stabilisé avec la chaux (Proctor curve of lime-treated soil).

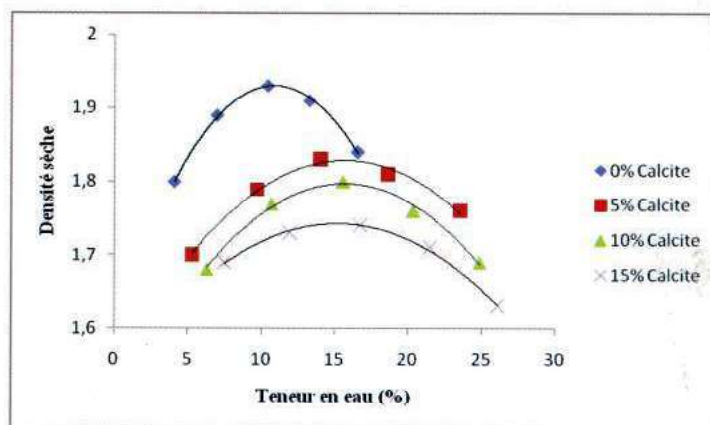


Figure 2 : Courbe Proctor du sol d'étude stabilisé avec la calcite (Proctor curve of calcite-treated soil).

On peut toutefois remarquer que l'aplatissement et le déplacement des courbes Proctor sont plus marqués avec la chaux qu'avec la poudre de calcite. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'avec la poudre de calcite, les réactions pouzzolaniques sont soit moins rapides soit moins quantitative que dans le cas de la stabilisation à la chaux.

Comme la chaux, Réf [15, 16 & 17], la calcite réduit la valeur maximale de la densité sèche et augmente la valeur de la teneur en eau optimale.

Nous pensons que ce qui explique la diminution de la densité c'est la floculation créée dans le sol, provoquant l'agglomération et l'augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine du sol. Il en résulte une augmentation de la porosité du matériau stabilisé, vu que les gros agrégats avec des formes variées ne peuvent pas former un assemblage parfaitement compact.

L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à l'accroissement de la surface totale des particules des sols traités, Réf [19].

3.2. Résistance à la compression

Les figures 3 et 4, représentent le développement de la résistance à la compression en fonction de la teneur de stabilisant ajouté et en fonction des différentes conditions de cure. La figure 3 donne les valeurs de résistance à la compression mesurée après 7 jours de cure et la fig. 4, après 28 jours de cure.

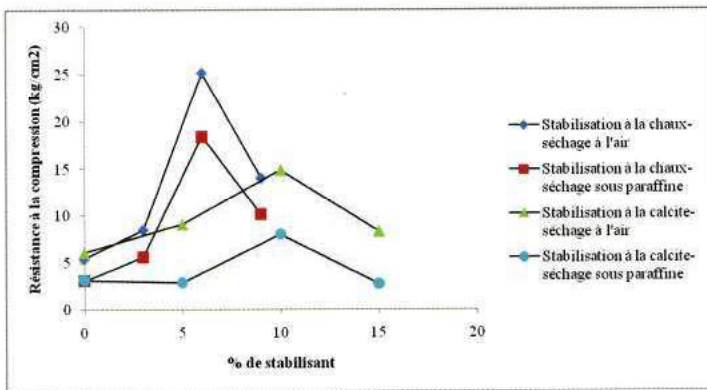


Figure 3 : Variation de la résistance à la compression du sol d'étude avec la stabilisation après 7 jours de séchage (Effects of stabilizer percent on compressive strength of studied soil after 7 days of maturation).

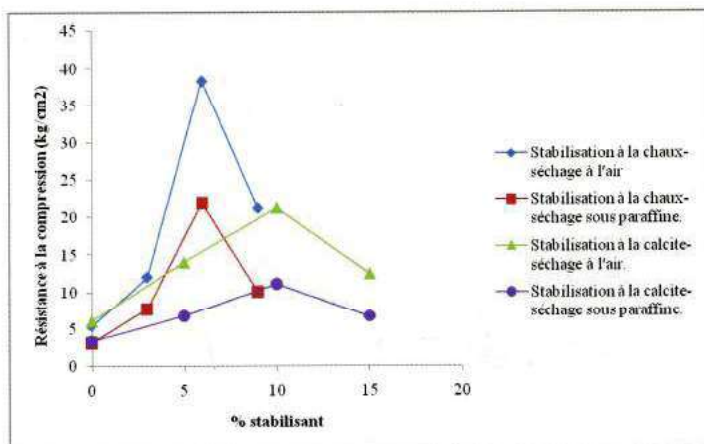


Figure 4 : Variation de la résistance à la compression du sol d'étude avec la stabilisation après 28 jours de séchage (Effects of stabilizers percent on compressive strength of studied soil after 28 days of maturation).

La résistance à la compression croît avec l'augmentation de la teneur en stabilisant, atteint un maximum puis décroît. Pour tous les échantillons, les meilleurs résultats sont obtenus avec une cure à l'air libre car, les échantillons bénéficiant de ce traitement, sont suffisamment hydratés pour être le siège de réactions chimiques se déroulant sans entrave. On constate que les résistances des matériaux stabilisés demeurent toutes supérieures à celles du sol naturel et que la résistance croît avec l'âge du matériau : pour une maturation de 7 jours, on remarque une augmentation de la résistance à la compression qui atteint un maximum de $25,13 \text{ kg/cm}^2$ pour une teneur de 6 % en chaux et $14,89 \text{ kg/cm}^2$ pour une teneur de 10 % en poudre de calcite. Pour la durée de cure de 28 jours, on constate une évolution plus importante avec des valeurs maximales respectives de $38,38 \text{ kg/cm}^2$ et $21,23 \text{ kg/cm}^2$ pour la chaux et la poudre de calcite.

Comme dans la stabilisation à la chaux, la résistance à la compression augmente avec l'ajout de la poudre de

calcite au sol. Cette augmentation peut être expliquée par la réactivité de la calcite avec le sol, aboutissant à la formation de silicates complexes d'aluminium et de calcium, impliquant une augmentation de la cohésion. La raison d'une plus importante augmentation de la résistance à la compression après 28 jours de cure est que les réactions pouzzolaniques sont lentes. En effet, il est montré que les réactions pouzzolaniques peuvent s'échelonner sur plusieurs mois et même sur plusieurs années, Réf. [17 & 23]. Anuar et Kai (2004), Réf. [1], dans leur étude sur la stabilisation d'un sol cohésive de Malaisie à la chaux, ont montré que l'accroissement de la résistance à la compression d'une Kaolinite stabilisée à la chaux était plus rapide au-delà de 28 jours. Cela étant, de plus grandes valeurs de résistance pour les sols stabilisés à la poudre de calcite avec le temps sont envisageables.

Comme l'a fait remarquer Légère (2001), Réf. [13], dans son étude sur la stabilisation d'un sol argileux à la chaux, un gain moins significatif en résistance des mélanges à 9 et 12 % de chaux et à 15 % de poudre de calcite, est dû à un excès de stabilisant.

Pour qu'une réaction pouzzolanique ait lieu, le pourcentage d'argile doit être $>20 \%$, Réf [7], ce qui implique que la quantité du stabilisant censée participer à une réaction pouzzolanique est proportionnelle au pourcentage d'argile contenu dans le sol. Ainsi, notre sol avec ses 21,80 % d'argile, valeur relativement faible, a exigé peu de stabilisant et par conséquent nous a donné des valeurs maximales de résistance à la compression, relativement faibles que ça soit avec la chaux ou avec la poudre de calcite. Néanmoins, les valeurs de résistance à la compression obtenues avec la poudre de calcite font d'elle un important stabilisant en construction car, malgré la faible teneur en argile du sol d'étude, les valeurs maximales atteintes sont comprises dans la marge de sécurité requise par la plupart des normes de construction des bâtiments de plain-pied, Réf [11], et des sous-couches de revêtement, Réf [17]. Ainsi, nous pensons que la stabilisation à la calcite peut donner des résultats beaucoup plus satisfaisants avec des sols contenant davantage d'argile.

3.4. Etude de la portance

La figure 5 donne les effets de la chaux et de la calcite sur l'indice CBR du sol d'étude.

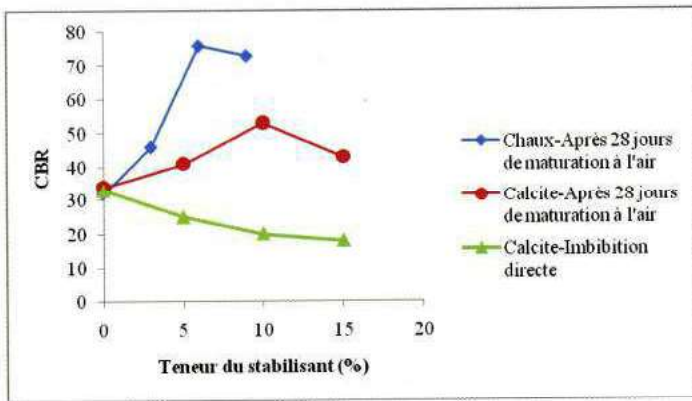


Figure 5 : Variation de l'indice CBR du sol d'étude avec la teneur en stabilisant (Effects of stabilizer percent on CBR index of studied soil).

On remarque que pour le matériau ayant subi une imbibition directe juste après le traitement à la poudre de calcite, le CBR est décroissant avec l'ajout de stabilisant pour tous les mélanges. Le CBR effectué après 28 jours de maturation s'est accru et atteint sa valeur maximale de 53, à la teneur de 10% de poudre de calcite. On en déduit que l'indice CBR des mélanges à la calcite a une tendance générale d'augmenter avec l'âge du matériau traité comme dans le cas de la stabilisation à la chaux, Réf. [13].

Comparée à la chaux, la poudre de calcite améliore moins le CBR. Mais, à comparer les améliorations observées à celle obtenues par Lin et al., (2005), Réf. [14], avec de la cendre d'égoûts, nous pouvons affirmer que la poudre de calcite est efficace dans l'amélioration du CBR.

3.5. Etude du potentiel de gonflement

Il ressort des différentes tables de catégorisation des potentiels de gonflement de sols, Réf. [20], que le sol d'étude a un potentiel de gonflement faible à son état naturel.

La figure 6 présente la variation du potentiel de gonflement du sol stabilisé, 28 jours après traitement à la chaux et à la poudre de calcite. On remarque que le gonflement atteint son minimum avec les teneurs de 6 et 10% respectivement en chaux et en poudre de calcite.

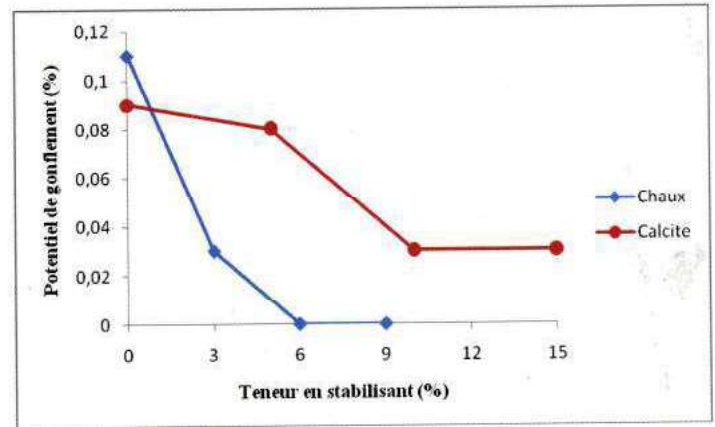


Figure 6 : Variation du potentiel de gonflement (compactage à l'énergie de 5 x 55 coups) avec l'ajout de stabilisant, après 28 jours de maturation (Effects of stabilizer percent on swelling potential of studied soil, after 28 days of maturation).

La pression de gonflement du sol d'étude diminue sensiblement avec 3% de chaux et s'annule avec 6%, pendant que la calcite le réduit mais ne l'annule pas à ce stade de maturation.

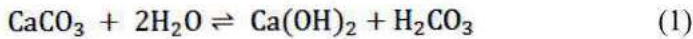
La modification du potentiel de gonflement survient suite à l'échange cationique, Réf. [3 & 4], et au déroulement des réactions dans un environnement au pH élevé, Réf. [11, 12, 16 & 26].

Nous pensons que la lenteur de réactions de la poudre de calcite avec le sol ne permet pas l'annulation du potentiel de gonflement à 28 jours de maturation et qu'une durée un peu plus longue est requise.

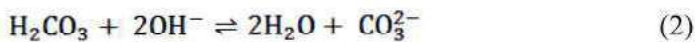
4. MÉCANISME PROBABLE DE LA STABILISATION DES SOLS ARGILEUX À LA POUDRE DE CALCITE ET LA SOUDE CAUSTIQUE

Orienté par les résultats de la stabilisation du limon argilo-sableux de Velemani, nous pensons que la calcite et la soude caustique agisse suivant un mécanisme de stabilisation en deux étapes :

- 1^{ère} étape : action de l'hydroxyde de Sodium . La solution de NaOH mélangée au sol produit un environnement alcalin qui crée une vacance des charges négatives sur les minéraux argileux. Il y a en même temps élévation du pH du milieu et par conséquent de sa capacité d'échange cationique.
- 2^{ème} étape : action du carbonate de Calcium. En milieu aqueux le carbonate de Calcium, CaCO_3 se dissocie selon l'équation suivante, Réf. [8]:



Cette réaction a un produit de solubilité k_{ps} , égal à $0,87 \cdot 10^{-8}$ à 25°C , valeur qui fait du carbonate de Calcium un sel peu soluble dans l'eau. Toutefois, le milieu étant fortement alcalin, l'acide carbonique produit dans l'éq. (1), est neutralisé par les ions OH^- d'après l'équation suivante :



L'équilibre de l'éq. (1) se déplacera vers la droite (loi de Le Chatelier), Réf.[18]. La solubilité de l'hydroxyde de calcium augmentera, pourvu qu'une bonne cure d'eau soit assurée aux matériaux stabilisés. En outre, la forte alcalinité du milieu peut constituer un frein à la dissociation de Ca(OH)_2 : cela peut être la cause de la lenteur des réactions.

Les ions CO_3^{2-} peuvent se recombinaer avec des cations libres du milieu et précipiter sous forme de sels peu solubles, renforçant ou pas la stabilisation du sol.

5. CONCLUSION

Cette recherche a permis d'établir des éléments importants favorisant la réussite d'un projet de stabilisation à la poudre de calcite.

Des essais en laboratoire ont validé le choix de la poudre de calcite et ont déterminé approximativement un dosage optimal. Ces essais démontrent des gains importants en résistance à la compression et en CBR ainsi qu'une réduction du gonflement. Les meilleurs résultats ont été atteints à la teneur en calcite de 10 %. En effet, ce mélange a présenté, 28 jours après traitement, une résistance à la compression de $21,23 \text{ kg/cm}^2$, un indice CBR 53 et un gonflement de 0,03%, contre une résistance à la compression de $38,38 \text{ kg/cm}^2$, un CBR de 76 et un potentiel de gonflement nul pour le même sol traité avec 6% de chaux éteinte.

Du point de vue convenance de sols traités avec la poudre de calcite, nous pensons que leurs résistances font qu'ils soient d'utilité en construction des couches de sous-révetements et des murs de bâtiment de plain-pied. Nous pensons, en outre, que le mécanisme de stabilisation des sols argileux à la calcite est similaire à celle que suggèrent les théories de la stabilisation à la chaux.

Dans les limites de notre étude, il s'avère que la méthode de stabilisation à la poudre de calcite et soude caustique est moins efficace que celle à la chaux éteinte.

Des études sur la résistance à l'environnement bioclimatique (pluie, gel, vent) et aux conditions

d'utilisation (action des habitants, des animaux, etc.) des matériaux stabilisés à la poudre de calcite peuvent être envisagées.

Références bibliographiques

- [1] Anuar, K.K. and Kai, K.C., *Lime stabilized Malaysian cohesive soils*, JurnalKejuruleraan Awan, Vol. 16, 2004.
- [2] Azadegan, O., Jafari S.H., Li, J., *Compaction Characteristics and Mechanical Properties of Lime/ Cement Treated Granular Soils*, EJDGE, Vol. 17, 2012.
- [3] Bell, F.G., *Lime stabilization of clay minerals and soils*, Engineering Geology, Vol. 42, 1996.
- [4] Boardman, D. I., Glendinning, S., Rogers, C. D. F., *Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes*, Géotechnique, vol. 50, 2001.
- [5] Bouasker, M., Kharrat, A., Al-Mukhtar, M., *Comportement hydromécanique des argiles traitées à la chaux : effet de la variation du poids volumique et de la teneur en eau*, XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, ALGERIE, 29 au 31 mai 2011.
- [6] Braja M. D., *"Advanced soil Mechanics"*, 3th Edition, Taylor & Francis, New York, USA, 2007.
- [7] Broms, B.B. *Stabilization of soil with lime columns*, 1991. Dans: Fang, H.-Y. (ed.) *Foundation Engineering Handbook* (2nd edition), Van Nostrand Reinhold, New York.
- [8] Bruylants, A., Jungrers, J.C., Verhulst, J., *Chimie Générale*, tome II, Dunod, Paris, 1961.
- [9] Dafalla, M. And Mutaz, E., *Study of the Mineralogical Changes of Clay Due to Cement and Lime Addition Using X Ray Diffraction Technique*, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol. 4, 2012.
- [10] Haricane, K. and Ghrici, M., *Effect of combination of lime and natural pozzolana on the plasticity of soft clayey soils*, 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus, 28-30 May 2009.
- [11] Houben, H., Guillaud, H., *Traité de construction en terre*, vol. 1, éditions Parenthèses, Paris, 1989.
- [12] James, R., Kamruzzaman, A.H.M., Haque, A. & Wilkinson, A., *Behaviour of lime-slag-treated clay*, Proceedings of the ICE - Ground Improv., Vol. 161, 2008.
- [13] Légère, G., *Etude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie*

forestière, Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Université du Québec, 2001.

[14] Lin, D-F., Luo, H-L., Hsiao, D-H. and Yang, C-C., *The effects of sludge ash on the strength of soft sub grade soil*, Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering, Vol. 15, 2005.

[15] Little, D.N., *Handbook for stabilization of pavement sub grades and base courses with lime*, the National Lime Association, Washington, D.C. 1995.

[16] Little, D.N., *Fundamentals of the stabilization of soil with lime*. National Lime Association Bulletin, Arlington, USA, Vol. 332, 1996.

[17] Little, D.N., *Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates, volume 1: summary of findings*, the National Lime Association, Washington, D.C. 1999.

[18] Mahan, B.H., *Chimie*, InterEdition, Paris, 1977.

[19] Mellal, F., Lamri, B., *Etude du comportement d'un remblai routier traité à la chaux cas de l'autoroute est-ouest*, Symposium International sur la Construction en Zone Sismique, Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26 – 27 octobre 2010.

[20] Nowamooz, H., *Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (France), 2007.

[21] Pansu, M. and Gauthervrou, J., *Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods* Springer-Verlag, New York, USA, 2003.

[22] Pauwels J.M, VanRanste, Verloo M., MvondoZeA., *Manuel de laboratoire de pédologie*, AGCD, Bruxelles, 1992.

[23] Sakr, M.A., Shahin, M.A. and Metwally, Y.M. *Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content*, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 27, 2009.

[24] Sapkota, S., Dhingra, M. & Jayalekshmi, S., *Review on soil stabilization techniques*, International Journal of Civil Engineering (IJCE), Vol. 3, 2014.

[25] Schroeder, W.L., Dickenson, S.E., Warrington, D.C., *Soils in construction*, 5th edition, Pearson Education, Inc, New Jersey, USA, 2004.

[26] 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.

[27] Zurairahetty, N.M.Y., Wanatowski, D., Stace, R., Marto, A., Asnida, R.A. and Mashros, N., *A short Review of the Factors Influencing Lime-Clay Reactions*, EJDGE, Vol. 19, 2014.