
Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux

Khelifa Harichane^{1*}, Mohamed Ghrici¹, Wiem Khebizi¹, Hanifi Missoum²

¹ Université de Chlef, Faculté des Sciences, Département de Génie Civil-BP 151-02000, Algérie. m_ghrici@yahoo.fr, wiem_khebizi@hotmail.fr

² Université de Mostaganem, Faculté des Sciences, Département de Génie Civil-BP 227 -27000, Algérie. hanifimissoum@yahoo.fr

*kharichane@yahoo.fr

RÉSUMÉ. La stabilisation des sols a été pratiquée pendant longtemps en mélangeant des additifs tels que le ciment, la chaux et les cendres volantes au sol pour augmenter leurs résistances. Cependant, il ya un manque d'investigations sur l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule ou combinée avec la chaux pour l'amélioration des sols. Dans cette étude, l'effet des cycles séchage-saturation sur le comportement de la résistance à la compression des sols argileux stabilisés par la pouzzolane naturelle -chaux a été effectué. Les échantillons ont été soumis aux essais de la résistance à la compression et aux essais de durabilité relatifs aux cycles de séchage-saturation. Basé sur les résultats obtenus, il peut être conclu que l'utilisation de la combinaison pouzzolane naturelle-chaux peut améliorer efficacement la durabilité des sols argileux.

ABSTRACT. Soil stabilization has been practiced for quite some time by mixing additives, such as cement, lime and fly ash to the soil to increase its strength. However, there is a lack of investigations on the use of natural pozzolana alone or combined with lime for ground improvement applications. In this study, the impact of cyclic wetting and drying on compressive strength behaviour of lime-natural pozzolana stabilized clayey soils has been investigated. Specimens were tested for unconfined compressive tests and for wetting-drying durability tests. Based on the durability results obtained, it can be concluded that the combination lime-natural pozzolana can effectively improve the durability of clayey soils from poor to excellent.

MOTS-CLÉS: argile, chaux, pouzzolane naturelle, stabilisation, durabilité, résistance.

KEY WORDS: clay, lime, natural pozzolana, stabilization, durability, strength.

1. Introduction

La réduction des ressources des matériaux disponibles et le coût accru lié à l'utilisation des matériaux de haute qualité ont nécessité le besoin d'utiliser les sols locaux dans les travaux géotechniques. Cependant, les propriétés géotechniques médiocres de ces sols posent des difficultés pour les projets de construction et par conséquent ils doivent être stabilisés pour améliorer leurs propriétés. La stabilisation des sols est une technique introduite depuis de nombreuses années avec le but principal de rendre les sols capables de satisfaire les exigences des projets techniques spécifiques (Kolias et al., 2005). Plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur la stabilisation des sols argileux en utilisant divers additifs tels que le ciment, la chaux, les cendres volantes, la fumée de silice (Al-Rawas et al., 2006). La stabilisation des sols avec la chaux est largement appliquée du fait que cette dernière présente une efficacité géotechnique et économique. La chaux comme additif apporte plusieurs changements bénéfiques des propriétés géotechniques des sols traités (Ola, 1977 ; Rahman, 1986 ; Attoh-Okine, 1995 ; Bell, 1996 ; Osula, 1996 ; Muntohar et al., 2000 ; Okagbue et al., 2000 ; Bagherpour et al., 2003 ; Al-Rawas et al., 2005 ; Goswami et al., 2005 ; Ansary et al., 2006 ; Nalbantoglu, 2006 ; Hossain et al., 2007 ; Kavak et al., 2007 ; Lasledj et al., 2008 ; Manasseh et al., 2008). Ces dernières années, des sous-produits industriels (cendres volantes, fumée de silice, cendre des gousses de riz...) ont été utilisés pour la stabilisation des sols argileux. L'efficacité de ces sous-produits pour la stabilisation des sols a été étudiée (Muntohar et al., 2000 ; Basha et al., 2003 ; Nalbantoglu, 2004 ; Prabakar et al., 2004 ; Parsons et al., 2005 ; Goswami et al., 2005 ; Basha et al., 2005 ; Senol et al., 2006 ; Sezer et al., 2006 ; Kalkan, 2009). D'autre part, ces ajouts cimentaires réagissent avec la chaux plus efficacement que s'ils sont utilisés seules.

La stabilisation des sols et leur comportement vis-à-vis des conditions climatiques aussi bien que la durabilité du traitement dans le temps sont devenues les considérations principales des ingénieurs ces dernières années. Mais il y a toujours beaucoup d'interrogations concernant ce sujet et la majeure partie des travaux de recherche disponibles concernait principalement les effets de gel-dégel. Le comportement à court et/ou à long terme désigné sous le nom de durabilité peut mieux être interprété si l'influence du facteur environnemental des cycles de séchage-saturation sur les propriétés géotechniques des sols traités est étudiée. Plusieurs études de recherches ont été effectuées pour mieux comprendre le comportement à la durabilité des sols argileux traités à la chaux et/ou des cendres volantes (Rao et al., 2001 ; Shihata et al., 2001 ; Guney et al., 2007 ; Khattab et al., 2007 ; Khattab et al., 2008 ; Zhang et al., 2008 ; Mollanahmutoglu et al., 2009 ; Bin-Shafique-Shafique et al., 2010). Cependant les études menées sur l'utilisation de la chaux combinée à la pouzzolane naturelle se font limitées et même très rares. Hossain et al., 2007 ont utilisé la cendre volante volcanique des ressources naturelles de Papua en Nouvelle Guinée. Plusieurs essais ont été effectués à savoir le compactage, la résistance à la compression ainsi que la durabilité, mais l'effet des cycles de séchage-saturation sur la résistance à la compression n'a pas été étudié.

Effet de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux

La pouzzolane naturelle se trouve en abondance dans des zones étendues de Beni-Saf qui est une carrière située dans l'Ouest de l'Algérie (Ghrici et al., 2007). L'utilisation de la pouzzolane naturelle seule et combinée à la chaux doit faire l'objet d'investigation expérimentale approfondie. Comme le sol est une bonne source d'alumine alors les effets de traitement par la chaux peuvent être améliorés dans une large mesure si le manque apparent en silice peut être adéquatement complété par l'ajout de la pouzzolane naturelle qui contient une teneur élevée en silice réactive. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des cycles de séchage-saturation sur la durabilité et la résistance à la compression de deux sols argileux Algériens stabilisés par la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle.

2. Investigation expérimentale

2.1. Matériaux utilisés

2.1.1. Sols

Le premier sol utilisé dans cette étude a été obtenu à partir d'un site (projet de remblai) situé approximativement à 18 km au Nord-Est de la ville de Chlef. Le deuxième sol a été obtenu à partir d'un site (projet de l'Autoroute Est-Ouest) situé approximativement à 25 km à l'Est de la ville de Chlef. Les différentes caractéristiques physiques et mécaniques des sols fins utilisés ainsi que leur classification ont été déterminées suivant les normes américaines ASTM (Tableau 1).

Caractéristiques de base	Sol 1	Sol 2
Couleur	gris	roug
Profondeur	4m	5m
Teneur en eau naturelle (%)	32.8	13.7
Densité spécifique	2.71	2.84
Éléments passant au tamis 80 μm (%)	85	97.5
Limite de liquidité (%)	84.8	47.7
Limite de plasticité (%)	32.7	23.2
Indice de plasticité (%)	52.0	24.5
Classification (USCS)	CH	CL
Teneur en eau optimale (%)	28.3	15.3
Densité sèche maximale (kN/m^3)	13.8	16.9
Resistance à la compression non confinée (kPa)	55.6	222.

Tableau 1. *Caractéristiques physiques des sols*

2.1.2. Ajouts

La pouzzolane naturelle utilisée dans cette étude est une roche d'origine volcanique. Elle a été procurée de la carrière de Béni-Saf située dans l'Ouest du territoire national. La roche a été broyée au laboratoire jusqu'à une surface spécifique de 420 m²/kg. La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda (Sud-Ouest du territoire national). Les propriétés physiques et chimiques des ajouts sont présentées dans le tableau 2.

Nom chimique	Chaux (%)	Pouzzolane Naturelle (%)
Apparence physique	Poudre blanche sèche	Poudre brune sèche
CaO	> 83.3	9.90
MgO	< 0.5	2.42
Fe ₂ O ₃	< 2	9.69
Al ₂ O ₃	< 1.5	17.5
SiO ₂	< 2.5	46.4
SO ₃	< 0.5	0.83
Na ₂ O	0.4 - 0.5	3.30
K ₂ O	-	1.51
CO ₂	< 5	-
TiO ₂	-	2.10
P ₂ O ₃	-	0.80
CaCO ₃	< 10	-
Densité spécifique	2	-
Plus de 90 µm (%)	< 10	-
Plus de 630 µm (%)	0	-
Matériau insoluble (%)	< 1	-
Densité apparente (g/l)	600-900	-
Perte au feu	-	5.34

Tableau 2. *Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés*

2.2. Déroulement des essais

Des essais au laboratoire concernant la résistance à la compression non confinée et la durabilité (cycles séchage-saturation) ont été effectués sur les deux sols argileux choisis. Plusieurs combinaisons de la pouzzolane naturelle et la chaux ont été utilisées. Les teneurs de la pouzzolane naturelle sont de 0, 10 et 20 % tandis que celles de la chaux sont de 0, 4 et 8 %. Un total de 18 combinaisons ont été étudiées (Tableau 3). Tous les échantillons soumis aux essais de compression et de durabilité ont été préparés conformément à leur teneur en eau optimale et leur densité sèche maximale.

Effet de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux

Designation	Echantillon mélange (%)		
	Sol	Pouzzola	Chaux
P0L0	100	0	0
P0L4	96	0	4
P0L8	92	0	8
P10L0	90	10	0
P20L0	80	20	0
P10L4	86	10	4
P20L4	76	20	4
P10L8	82	10	8
P20L8	72	20	8

Tableau 3. *Combinaisons des échantillons des sols stabilisés*

Les essais cycliques de séchage-saturation sont réalisés conformément à la norme ASTM D559. Dans le but de faire une comparaison directe avec les échantillons traités à la chaux et/ou la pouzzolane naturelle, une légère modification a été apportée à la norme c'est-à-dire la confection d'une deuxième série d'éprouvettes destinée à l'application de grattage à l'aide d'une brosse de fil d'égratignure effectuée sur toutes les faces de l'éprouvette après chaque cycle recommandé a été omise. Vu que les éprouvettes préparées avec la chaux, la pouzzolane naturelle ou la combinaison des deux ajouts ont un comportement fragile vis-à-vis de cette application agressive. Donc la première série d'éprouvettes sera destinée à l'essai de séchage-saturation. Avec le temps plusieurs des échantillons testés ont commencé à perdre significativement leur masse rendant ainsi les mesures dimensionnelles difficiles. En outre, plusieurs des échantillons se désintègrent avant d'accomplir les 12 cycles de séchage- saturation prescrits dans la méthode d'essai. Les échantillons des sols traités soumis aux essais de séchage-saturation sont introduits dans l'eau potable (submergés) à la température ambiante pendant une période de 5 heures et ensuite retirés. La masse des échantillons a été enregistrée. Les échantillons humidifiés sont de nouveau placés dans un four à 71° C pendant 42 heures et ensuite retirés. Encore la masse des échantillons a été enregistrée. Ce procédé constitue donc un cycle (48 heures) de saturation et de séchage. De nouveau submerger les échantillons d'eau et continuer le procédé pour 12 cycles. Afin d'étudier l'effet de la durée de cure sur la durabilité, les échantillons ont été placés dans des boîtes en plastique pour différentes périodes de cure (7 et 28 jours) avant d'accomplir les 12 cycles de séchage-saturation recommandés par la norme.

La résistance à la compression des éprouvettes de sols naturels et de sols traités est déterminée selon deux procédures. Dans la première procédure les éprouvettes sont préparées et testées conformément à la norme ASTM D2166. Après la

préparation des éprouvettes et avant de les soumettre à l'essai, elles sont stockées dans des boîtes en plastique (pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité) et laissées pour des périodes de cure de 7 et 28 jours à la température ambiante. A la fin de la durée de cure, les éprouvettes sont soumises aux essais de la résistance à la compression. Dans la seconde procédure les éprouvettes qui ont été déjà soumises aux essais de durabilité (cycles de séchage-saturation) et qui ont accomplies les 12 cycles recommandés seront ensuite soumises aux essais de la résistance à la compression (certaines éprouvettes se désintègrent avant même d'atteindre les 12 cycles recommandés).

3. Résultats et discussion

3.1 Cycles de séchage-saturation complétés après traitement

Les cycles séchage-saturation complétés avant la rupture de l'échantillon sont présentés sur les figures 1 et 2.

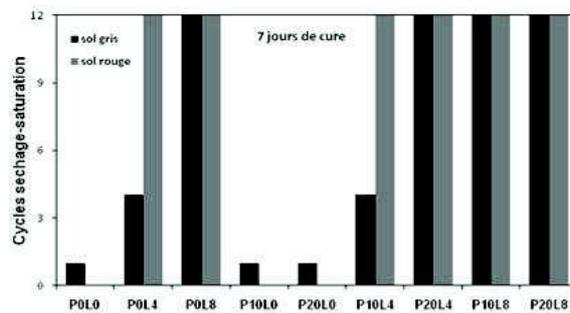


Figure 1. Cycles séchage-saturation complétés pour une période de cure de 07 jours

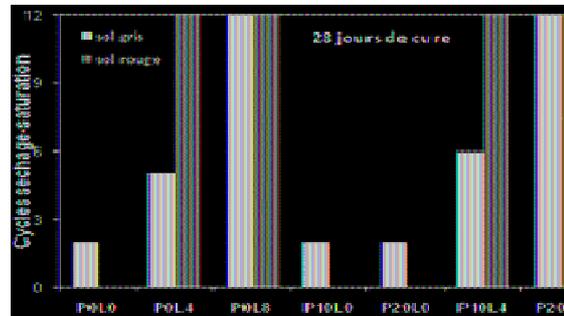


Figure 2. Cycles séchage-saturation complétés pour une période de cure de 28 jours

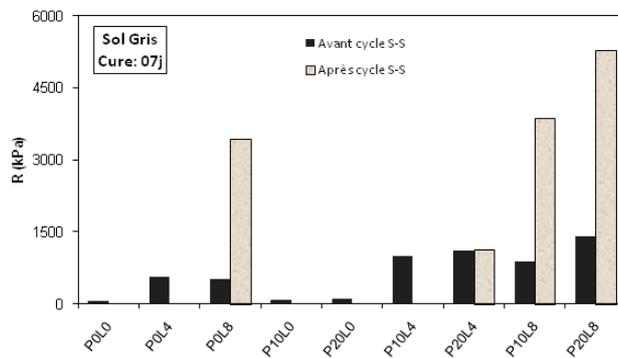
D'après la figure 1 et concernant le sol argileux gris, la plupart des échantillons ne complètent pas les 12 cycles recommandés. Cependant, pour le sol argileux rouge six des neuf échantillons complètent globalement les 12 cycles prescrits par la norme. Ce comportement est conforme avec d'autres observés pour des échantillons traités à la chaux, aux cendres volantes et au ciment (Parsons et al., 2004). Par ailleurs, les sols argileux présentant des indices de plasticité élevés montrent un comportement de souffrance sévère aux situations de séchage-saturation. La durabilité des sols lors des cycles de séchage-saturation dépend principalement de la structure des pores et de la résistance à la traction du matériau. D'autres paramètres tels que le frottement interparticule et la cohésion peuvent également influencer la perte matérielle dans cet essai. Les résultats indiquent clairement que les échantillons traités par l'action combinée de la chaux et de la pouzzolane naturelle présentent une bonne performance que ceux traités à la pouzzolane naturelle ou à la chaux seule. Ceci est du probablement à la continuité de la réaction pouzzolanique.

3.2 Résistance à la compression non confinée

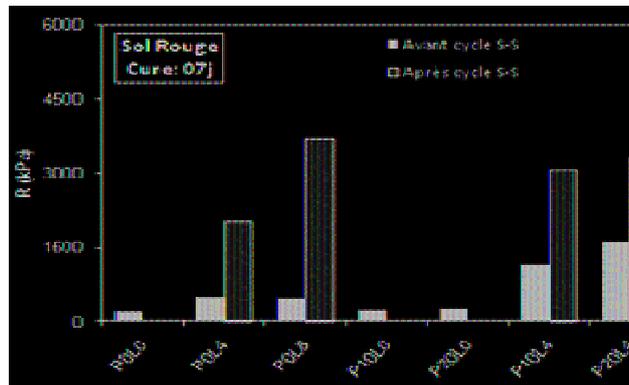
Après les 12 cycles séchage-saturation, les résultats des essais de résistance à la compression sont présentés sur les figures 3 et 4.

D'après les figures 3 et 4, la résistance à la compression résiduelle a augmenté considérablement par rapport à la résistance à la compression initiale. Ce comportement est similaire pour les deux sols argileux stabilisés par la chaux et la pouzzolane naturelle. Cependant, pour le sol argileux gris, la résistance résiduelle diminue légèrement avec la durée de cure mais pour le sol argileux rouge la tendance inverse est observée.

Les échantillons des deux sols argileux traités avec 10 à 20% de pouzzolane naturelle seule ont été tous désintégrés avant le 12^{ème} cycle. De plus, pour les échantillons du sol argileux gris traités avec 4% de chaux et avec 4% chaux + 10% pouzzolane naturelle se sont désintégrés avant le 12^{ème} cycle. Tandis que les échantillons traités avec la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle résistent bien et montrent une augmentation élevée de la résistance à la compression après l'essai des cycles séchage-saturation.



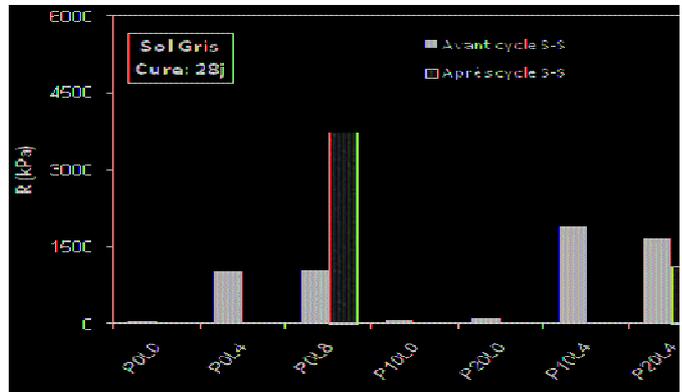
(a)



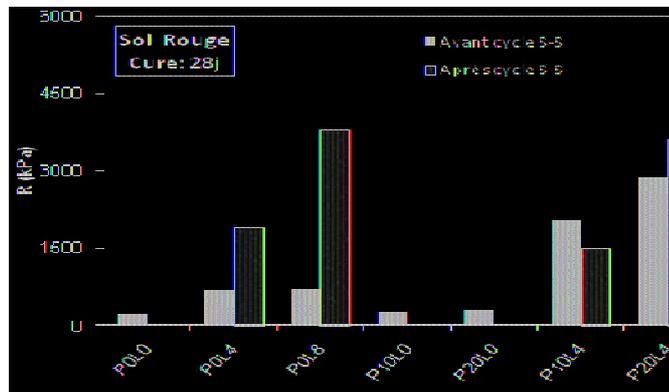
(b)

Figure 3. Variation de la résistance à la compression initiale et résiduelle des sols traités pour une période de cure de 07 jours: (a) Sol Gris; (b) Sol Rouge

Effet de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux



(a)



(b)

Figure 4. Variation de la résistance à la compression initiale et résiduelle des sols traités pour une période de cure de 28 jours: (a) Sol Gris; (b) Sol Rouge

La raison pour cette amélioration élevée de la résistance à la compression est due probablement aux conséquences de la durée de cure durant les cycles de séchage-saturation (Bin-Shafique et al., 2010). Cependant, les résultats ont montré que la durabilité du sol traité donne une bonne indication de la performance du sol stabilisé.

4. Conclusions

Cette étude présente l'influence des cycles de séchage-saturation sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés avec l'action combinée de la chaux et de la pouzzolane naturelle. Basé sur les résultats trouvés, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

La stabilisation des sols avec la combinaison chaux-pouzzolane naturelle aboutit à une amélioration notable de la durabilité de ces sols argileux. Les échantillons stabilisés montrent une performance élevée et résistent bien aux 12 cycles de séchage-saturation.

La résistance à la compression résiduelle augmente considérablement par rapport à la résistance à la compression initiale. Ce comportement est similaire pour les deux sols argileux stabilisés avec la combinaison chaux-pouzzolane naturelle. Pour le sol argileux rouge la durée de cure a un effet notable sur la résistance résiduelle.

Les résultats des essais montrent que la combinaison chaux-pouzzolane naturelle peut améliorer efficacement la durabilité des sols argileux.

5. Bibliographie

- Al-Rawas A.A., Goosen M.F.A., *Expansive soils-recent advances in characterization and treatment*, London, Taylor & Francis, 2006.
- Al-Rawas A.A., Hago A.W., Al-Sarmi H., « Effect of lime, cement and sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman», *Building and Environment*, vol. 40, 2005, p. 681-687.
- Ansary M.A., Noor M.A., Islam M., « Effect of fly ash stabilization on geotechnical properties of Chittagong coastal soil», *The geotechnical symposium on soil stress-strain behavior*, Roma, 2006, p. 443-454.
- ASTM., « Annual book of ASTM Standards», *American Society for Testing and Materials*, vol. 04-08, 2004, Philadelphia, USA.
- Attoh-Okine N.O., « Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited», *Construction and Building Materials*, vol. 9, 1995, p. 283-287.
- Bagherpour I., Choobbasti A.J., « Stabilization of fine-grained soils by adding microsilica and lime or microsilica and cement», *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, n° B, 2003, p. 1-10.
- Basha E.A., Hashim R., Mahmud H.B., Muntohar A.S., « Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement», *Construction and Building Materials*, vol. 19, 2005, p. 448-453.
- Basha E.A., Hashim R., Muntohar A.S., « Effect of the cement - rice husk ash on the plasticity and compaction of soil», *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 8, n° A, 2003, p. 1-8.

Effet de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux

- Bin-Shafique S., Rahman K., Yaykiran M., Azfar I., « The long-term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil subbases», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, 2010, p. 666-672.
- Ghrici M., Kenai S., Said Mansour M., « Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements», *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, 2007, p. 524-549.
- Goswami R.K., Singh B., « Influence of fly ash and lime on plasticity characteristics of residual lateritic soil», *Ground Improvement*, vol. 9, 2005, p. 175-182.
- Guney Y., Sari D., Cetin M., Tuncan M., « Impact of cyclic wetting-drying on swelling behaviour of lime-stabilized soil», *Building and Environment*, vol. 42, 2007, p. 681-688.
- Hossain K.M.A., Lachemi M., Easa S., « Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 51, 2007, p. 711-731.
- Kalkan E., « Influence of silica fume on the desiccation cracks of compacted clayey soils», *Applied Clay Science*, vol. 43, n° 3-4, 2009, p. 296-302.
- Kavak A., Akyarli A., « A field application for lime stabilization», *Environmental Geology*, vol. 51, 2007, p. 987-997.
- Khatab S.A.A., Al-Juari K.A.K., Al-Kiki I., « Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime», *Al-Rafidain Engineering*, vol.16, n° 1, 2008, p. 102-116.
- Khatab 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*, vol. 19, n° 4, 2007, p. 358-366.
- Kolias S., Kasselouri-Rigopoulou V., Karahalios A., « Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement», *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, 2005, p. 301-313.
- Lasledj A., Al-Mukhtar M., « Effect of hydrated lime on the engineering behaviour and the microstructure of highly expansive clay», *The 12th international conference on computer methods and advances in geomechanics*, Goa, 2008, p. 3590-3598.
- Manasseh J. Olufemi A.I., « Effect of lime on some geotechnical properties of igumale shale», *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 13, n° A, 2008, p. 1-12.
- Mollamahmutoglu M., Yilmaz Y., Gungor A.G., « Effect of a class C fly ash on the geotechnical properties of an expansive soil», *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 1, n° 1, 2009, p. 1-6.
- Muntohar A.S., Hantoro G., « Influence of the rice husk ash and lime on engineering properties of clayey subgrade», *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 5, 2000, p. 1-9.
- Nalbantoglu Z., « Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer», *Construction and Building Materials*, vol. 18, 2004, p. 377-381.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

- Nalbantoglu Z., « Lime stabilization of expansive clay», In: Al Rawas A.A., Goosen M.F.A., *Expansive soils-recent advances in characterization and treatment*, London, Taylor & Francis, 2006, p. 341-348.
- Okagbue C.O., Yakubu J.A., « Limestone ash waste as a substitute for lime in soil improvement for engineering construction», *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, vol. 58, 2000, p. 107-113.
- Ola S.A., « The potentials of lime stabilization of lateritic soils», *Engineering Geology*, vol. 11, 1977, p. 305-317.
- Osula D.O.A., « A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite», *Engineering Geology*, vol. 42, 1996, p. 71-81.
- Parsons R.L., Kneebone E., « Field performance of fly ash stabilized subgrade», *Ground Improvement*, vol. 9, 2005, p. 33-38.
- Parsons R.L., Kneebone E., Milburn J.P., Use of cement kiln dust for subgrade stabilization, Report n° KS-04-3, October 2004, Kansas Department of Transportation.
- Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R.K., « Influence of fly ash on strength behavior of typical soils», *Construction and Building Materials*, vol. 18, 2004, p. 263-267.
- Rahman M.D.A., « The potentials of some stabilizers for the use of lateritic soil in construction», *Building and Environment*, vol. 21, 1986, p. 57-61.
- Rao S.M., Reddy B.V.V., Muttharam M., « The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behavior of stabilized expansive soils», *Engineering Geology*, vol. 60, 2001, p. 223-233.
- Senol A., Edil T.B., Bin-Shafique M.S., Acosta H.A., Benson C.H., « Soft subgrades stabilization by using various fly ashes», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 46, 2006, p. 365-376.
- Sezer A., Inan G., Yilmaz H.R., Ramyar K., « Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay», *Building and Environment*, vol. 41, 2006, p. 150-155.
- Shihata S.A., Baghdadi Z.A., « Long-term strength and durability of soil cement», *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 13, n° 3, 2001, p. 161-165.
- Zhang Z., Tao M., « Durability of cement stabilized low plasticity soils», *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, n° 2, 2008, p. 203-213.