

ÉTUDE DE STABILITÉ DU PHÉNOMÈNE RETRAIT –GONFLEMENT D’UNE ARGILE DE L’EST DE L’ALGÉRIE (BATNA-TIMGAD) PAR L’AJOUT D’UN CIMENT

STUDY OF THE STABILITY OF THE PHENOMENON OF SHRINKAGE–SWELLING OF CLAY IN EASTERN ALGERIA (BATNA-TIMGAD) BY THE ADDITION OF CEMENT

Réception : 25/05/2022

Acceptation : 04/12/2022

Publication : 05/01/2023

BEKHOUCHE Hizia¹, BAHLOUL Ouassila², ABBECHÉ Khelifa³^{1,2} et ³ Faculté de Technologie, Département Génie Civil, Laboratoire de Génie Civil-Risques et Ouvrages en Interaction (LGCROI), Université Batna2¹ e-mail : h.bekhouche@univ-batna2.dz² e-mail : o.bahloul@univ-batna2.dz³ e-mail : k.abbeche@univ-batna2.dz

Résumé- Les sols non saturés subissent un ensemble de modification dans le temps sous l’effet des différentes sollicitations telles que les sollicitations climatiques. Le présent travail étudie la caractérisation des propriétés géotechniques et mécaniques ainsi que l’évolution du retrait- gonflement de sols argileux expansifs de l’Est de l’Algérie avant et après traitement avec différents dosages de ciment Portland. En effet, les résultats obtenus ont conduit à l’augmentation de la limite de plasticité W_p et la limite de retrait W_r lorsque le ciment est ajouté, alors que la limite de liquidité W_l et l’indice de plasticité I_p diminuent. Toutefois, les résultats des différents échantillons ont montré une réduction des potentiels de gonflement et des pressions de gonflement. Un traitement de ciment à 9% réduit le potentiel de gonflement de 75 à 80% pour les sols testés.

Mots - clés : Retrait, Gonflement, Argile, Ciment, Traitement.

Abstract-The unsaturated soils undergo a set of modification in time, under the effect of various solicitations such as climatic stresses. The present work studies the characterization of the geotechnical and mechanical properties as well as the evolution of the shrinkage-swelling of the expansive clayey soils of the east of Algeria before and after treatment with various dosages of Portland cement. Indeed, the results obtained led to the increase of the plasticity limit W_p and the shrinkage limit W_r when cement is added, while the liquid limit W_l and the plasticity index I_p decrease. However, the results of the different samples showed a reduction in swelling potentials and swelling pressures. A 9% cement treatment reduces the swelling potential by 75-80% for the tested soils.

Keywords: Shrinkage, Swelling, Clay, Cement, Treatment.

1-Introduction

Le phénomène de gonflement-retrait qui affecte les sols et les fondations des constructions, les routes et les remblais, nécessite une attention particulière de la part des ingénieurs géotechniciens. Cependant, la stabilisation des sols est généralement obtenue par l’utilisation de matériaux de haute qualité pour pouvoir les utiliser dans la construction. On note que les études de stabilisation réalisées sur certaines des anciennes argiles expansives

utilisent comme stabilisants le ciment et / ou la chaux [1, 2], le sable [3], le sel [4], le sable de dune et le mélange de sels [5]. Les résultats expérimentaux obtenus sont relativement satisfaisants pour le traitement au ciment et / ou à la chaux. Cet article expose les résultats d’une étude menée sur l’argile expansive sur-consolidées extraite du site urbanisé de la région de Timgad (Algérie) où des désordres importants apparaissent fréquemment dans les infrastructures routières et autoroutières et dans les structures légères civiles et industrielles. Le

programme expérimental réalisé vise à déterminer les paramètres physiques et mécaniques de cette argile naturelle traitée avec du ciment à différent pourcentage (1%, 3%, 5%, 7% et 9%). Certains aspects, tels que les limites de consistance, la limite de retrait, le potentiel de gonflement et la pression de gonflement sont passés en revue. Les effets des traitements sur les caractéristiques de cisaillement et sur la microstructure et la porosité du sol non traité et traité à 9% de ciment sont ensuite présentés et analysés.

2- Matériels et Méthodes

Le sol utilisé a été extrait depuis un site urbanisé, sol provenant de la ville de Timgad, situé à 36 kilomètres à l'Est de la wilaya de Batna. Le stabilisant utilisé dans la présente étude est un ciment portland (CPJ – CEMII/A 42,5) fabriqué localement par la cimenterie de Ain Touta, Batna –Algérie.

Les caractéristiques physiques et géotechniques du sol étudié et les propriétés physico-chimiques et mécaniques du ciment sont résumées dans les tableaux 1 et 2. D'après les résultats de l'identification de l'échantillon étudié et selon la classification française destinée aux sols à grains fins, ce sol appartient à la sous-classe A4 ($I_p > 40$ ou $VBS > 8$) des argiles ou des argiles marneuses très plastiques [6]. Par ailleurs, et selon d'autres classifications disponibles dans la littérature (tableau 3), on constate que le sol ST présente un potentiel de gonflement très élevé.

Tableau 1 : Paramètres physiques, chimiques et mécanique du sol étudié.

Sol Témoin		
Paramètres	Norms standard	Valeur
Teneur en eau w (%)	NF P94-050 (1995)	34,90
Densité humide γ_h (kN/m ³)	NF P94-053 (2014)	18,50
Densité sèche γ_d (kN/m ³)		13,7
Degré de saturation S_r (%)	$S_r = \frac{w}{w_{sat}}$	35,76
Teneur en saturation WS (%)		97,71
Limite de liquidité WL(%)		95,28
Limite de plasticité WP(%)	NF P94-051 (1993)	36,55
Indice de plasticité IP (%)		58,73

Passants fins <80 μ (%)	NF P94-056 (1996)	95,15
Clay content C2 μ m (%)	NF P94-057 (1992)	62,00
Activité A	Ac = PI / ($\leq 2\mu$ m)	0,94
Densité sèche Max γ_d max (kN/m ³)	Standard Proctor test	17,3
Teneur en eau optimale wopt(%)	NF P94-093 (2014)	20,44
Bleu de méthylène VBS	NF P 94-68 (1998)	15,33
Surface spécifique SST	SSA =21xVbs	321,93
Teneur en CaCO ₃ (%)	NF P94-048 (1996)	2,88
Déformation $\Delta H/H$ (%)	ASTM D 4546-96 méthode A	24.06
Pression de gonflement P_g (kPa)		920
Angle de frottement ϕ (°)	NF P 94-071-1 (1994)	7.89
Cohésion C (kPa)		204

Tableau 2 : Paramètres physico- chimiques du ciment.

Ciment	
Caractéristiques physiques	Valeurs
Poids Spécifique (g/cm ³)	3.06
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	428
Consistance normale (%H ₂ O)	0.35
Temps de prise (h:min)	2:02
Caractéristiques chimiques	Valeurs
SiO ₂	23.5 %
Al ₂ O ₃	5%
Fe ₂ O ₃	4.2%
CaO	56.5%
MgO	1.8%
K ₂ O	0.96%
Na ₂ O	0.8%
SO ₃	2.6%
CaO libre	0.94%
LOI (1000 °C)	4.75%

Tableau 3 : Classification du sol étudié.

Auteurs	Potentiel de gonflement du sol ST
Seed et al (1962)	Très élevé
Williams et Donaldson (1980)	Très élevé
BRE (1980)	Très élevé
Senthen (1980)	Très élevé
Dakshanamurthy et Raman (1973)	Très élevé
chen (1988)	Très élevé

3- Résultats et discussions

3.1- Préparation des échantillons

Une série d'essais œdométriques a été menée pour étudier le comportement du sol vis-à-vis du gonflement libre. Les échantillons de sol ont été préparés à partir d'un mélange de la quantité nécessaire de sol séché finement broyé à la teneur souhaitée en stabilisant par l'ajout du ciment. Ce mélange sec étant bien homogénéisé puis humidifié à la teneur en eau optimale w_{opt} de chaque mélange (sol-ciment) à différents pourcentages (0, 1, 3, 5, 7 et 9%) respectivement (20.8, 23.4, 24.5, 27.8, 29.5 et 31.1%). On notera que le mélange sol-ciment humidifié a été compacté statiquement dans un moule cylindrique ayant les dimensions suivantes : 70 mm de diamètre et 20 mm de hauteur, sous une vitesse de déformation constante de 1mm/min. Trois séries d'échantillons ont été préparées : la première pour l'essai de gonflement libre-pression, la deuxième pour l'essai de gonflement libre suivi par l'essai de retrait et la troisième série pour l'essai de cisaillement à différentes dimensions (60 mm de diamètre et de 21 mm de hauteur).

3.2- Effet du ciment sur les limites de consistances

Les limites de consistances des sols non traités et des sols traités à différents pourcentages de ciment sont résumées dans la figure 1. Les résultats montrent que les limites de liquidités diminuent quel que soit le taux du stabilisant. Pour l'ajout de 9% de ciment, les limites de liquidités atteignent une réduction de 35% par rapport au témoin. Les réductions des indices de plasticités sont plus importantes. On observe que le taux de réduction de cette caractéristique peut atteindre 60% par rapport au témoin avec 9% de ciment. Ces résultats sont concordants avec ceux de la littérature [12].

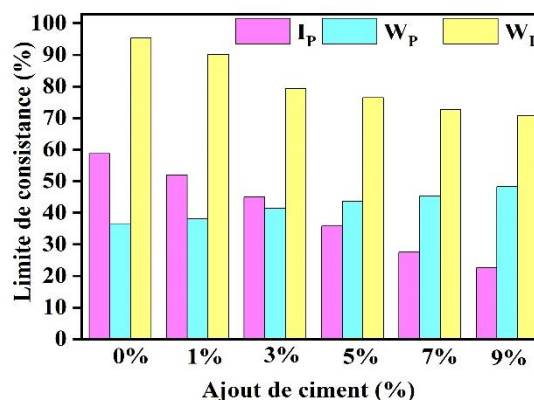


Figure 1 : L'effet du ciment sur limites d'Atterberg du sol.

3.3- Effet de l'ajout du ciment sur la cohésion et l'angle de frottement

Les résultats des essais de cisaillement direct sur la figure 2 montrent qu'à la fois la cohésion drainée consolidée C et l'angle de frottement ϕ des échantillons de sol compactés ont été modifiés par l'ajout de ciment. La cohésion C et l'angle de frottement ϕ augmentent d'abord lentement puis proportionnellement à la teneur en ciment ajoutée. Le traitement du ciment a conduit à une augmentation de la résistance au cisaillement, ce qui a entraîné une amélioration de la capacité portante. Après une augmentation progressive, la cohésion C et l'angle de frottement ϕ obtenus pour 7% et 9% de ciment ajouté ont convergé de manière significative. Ces réactions ioniques se produisent entre le calcium qui est l'élément stabilisateur et la silice et l'alumine, minéraux argileux résultant de la formation de produits à base de ciment tels que le silicate de calcium-hydrate (CSH), aluminat de calcium-hydrate (CAH) et le calcium-aluminium-silicate-hydrate (CASH).

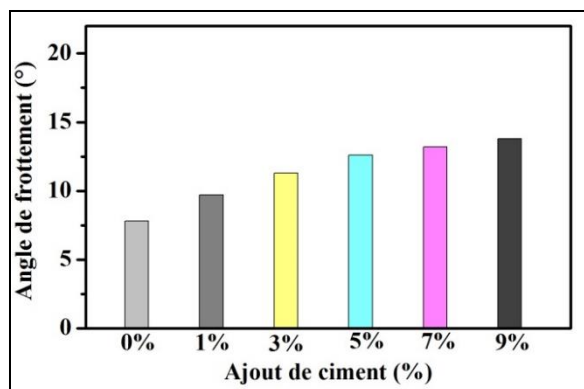


Figure 2 : Effet du ciment sur l'angle de frottement

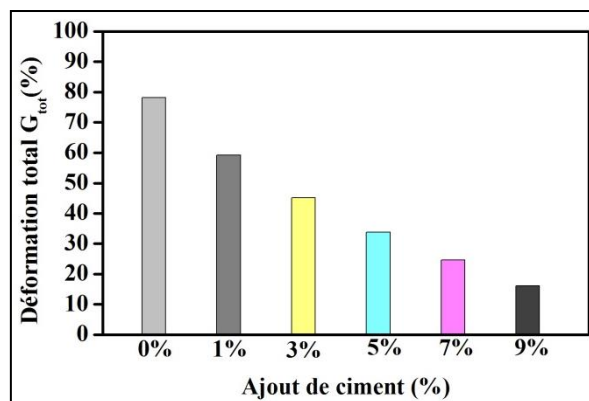


Figure 4 : Effet du ciment sur déformation totale

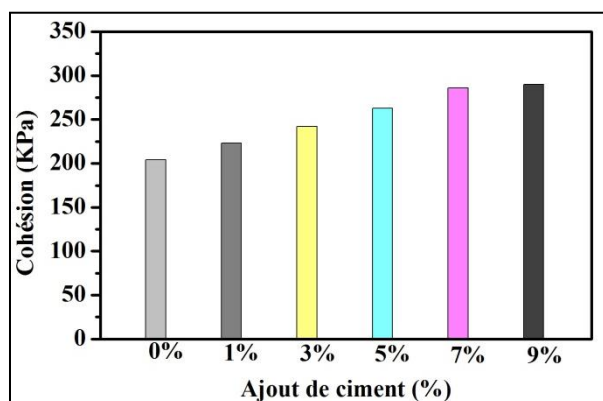


Figure 3 : L'effet du ciment sur la cohésion

3.4- Effet de l'ajout du ciment sur le gonflement et le retrait du sol

La déformation totale

$$G_{tot} (\%) = \Delta V_{tot} / V_0 \quad (1)$$

correspond à la déformation de retrait volumétrique entre W_{max} (après gonflement) à l'état sec. Une telle caractéristique peut être considérée comme un paramètre intrinsèque du sol contrairement aux potentiels de gonflement ou de retrait qui varient avec la teneur en eau initiale de l'échantillon testé. Sur la figure 3a la déformation totale G_{tot} (%) a chuté avec une teneur en ciment plus élevée (figure 4). On constate que la limite de retrait a augmenté de 20.4% à une teneur de 9% de ciment (Figure 5).

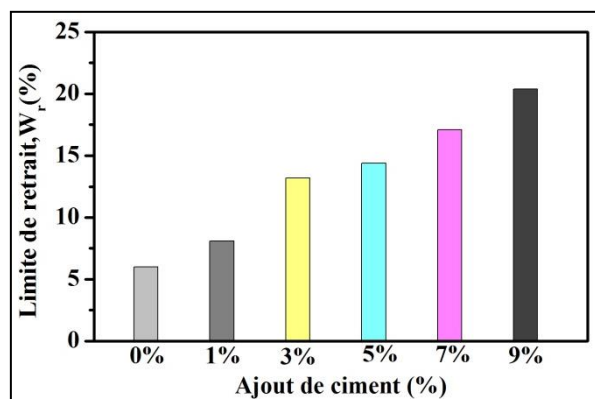


Figure 5 : L'effet du ciment sur limite de retrait

3.5- Effet du traitement du ciment sur la microstructure et la porosité

La microstructure de l'échantillon compacté statiquement (sol naturel) a été observée d'abord à faible grossissement à l'aide du MEB environnemental. La surface fracturée du sol ST perpendiculaire à la direction de compactage a montré une structure en couches compactes, de grosses particules ont été détectées dans une matrice fine ainsi qu'une légère macroporosité a également été détectée localement (figure 4a). Ceci est lié à la fraction d'argile la plus élevée et à la teneur en montmorillonite du sol ST. Les particules d'argile agrégées en petites grappes expansives, créant une surface rugueuse dans le sol non traité, ont disparu après le traitement du ciment avec une surface plus compacte et rigide avec des microfissures typiques probablement induites par immersion dans l'azote liquide avant la lyophilisation (figure 4b). Le réseau de fissures minces a été observé dans le sol traité au ciment, mais pas dans l'échantillon non traité. Une structure ciment-argile a été observée comme décrit par [12] et [14].

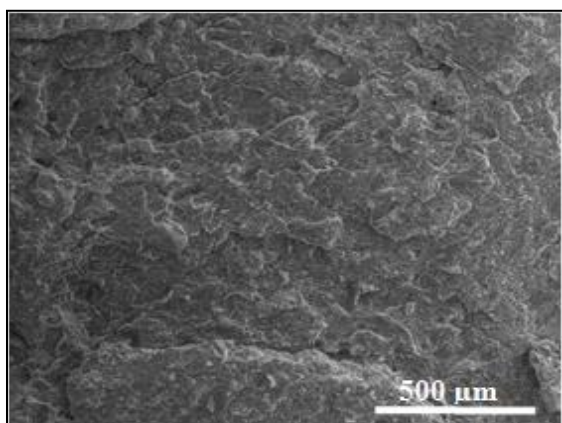


Figure 6: Photos MEB du sol sans traitement

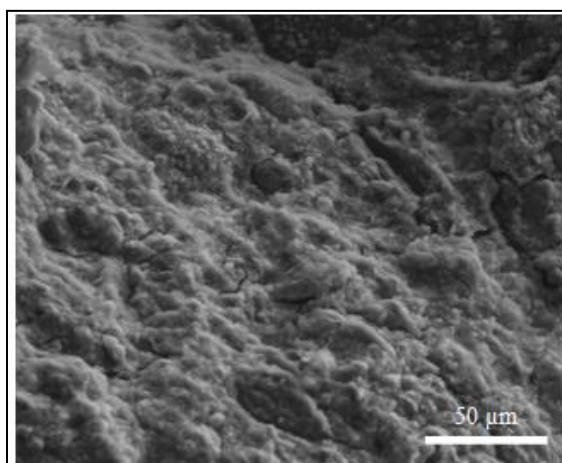


Figure 7 : Photos MEB du sol après traitement

Pour compléter l'observation, une étude quantitative de l'effet du traitement par le ciment est réalisée au moyen de la porosimétrie à intrusion de mercure (MIP). La porosimétrie par intrusion de mercure (PIM) dans la figure 8 a démontré la présence de deux familles de pores principaux dans l'échantillon de sol alors que la porosité totale est 42,1%. Des nanopores d'une valeur de 30,7 nm et des micropores de 4,6 μm sont visibles. Le PSD du sol traité avec 9% de ciment était vraiment similaire, avec des micropores et des nanopores évidents. Comparé aux échantillons initiaux, la microporosité a été considérablement réduite tandis que la nanoporosité a augmenté (Figure 7). L'augmentation des nanopores les plus petits autour de 10-20 nm peut être liée à la présence de composés cimentaires [2]. La présence d'argiles mélangées à du C-S-H est probablement à l'origine de

l'augmentation et du déplacement des petits nanopores vers des tailles plus grandes jusqu'à 80 nm.

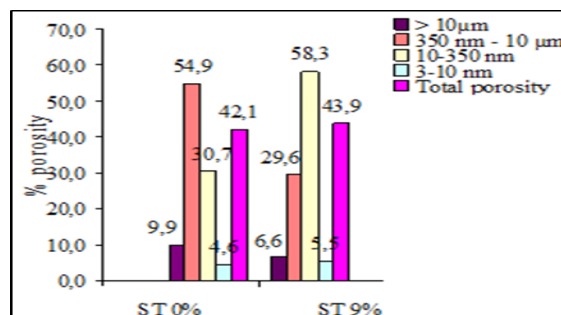


Figure 8 : L'effet du ciment sur la porosité

5- Conclusion

Les conclusions tirées par cette étude expérimentale sont les suivantes :

- Les résultats obtenus ont bien illustré que le traitement par le ciment améliore les caractéristiques géotechniques et mécaniques du sol, notamment la limite de plasticité et la limite de retrait ont été augmentées avec les différents teneurs en ciment ajoutées. Par contre, la limite de liquidité et l'indice de plasticité diminuent. Donc, l'étude confirme que le ciment améliore la maniabilité des sols gonflants ;
- Le potentiel de gonflement ainsi que la déformation totale ont été réduits après l'ajout du ciment à différents dosages. Cependant, un traitement de ciment à 9% réduit le potentiel de gonflement de 75% pour le sol testé, ce qui correspond à une diminution de la déformation totale de 80% ;
- Le traitement du ciment a conduit à une augmentation de la résistance au cisaillement de tous les sols, ce qui a entraîné une amélioration de la capacité portante des sols. Après une augmentation progressive, la cohésion C et l'angle de frottement ϕ obtenus pour 7% et 9% de ciment ajouté ont convergé de manière significative.

Références bibliographiques

- [1] Bekhouche .H, Abbeche .K,Bahloul .O Duc M. Delage.P The Swelling and Shrinkage Properties of Clay-Rich Soils after Cement Treatment A Microstructural Approach Italian Journal of Engineering Geology and Environment (2018)

- [2] Khemissa, M., Mahamedi, A., : *Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay*, 95, pp104-110 *Applied Clay Science*, (2014)
- [3] Louafi, B., Bahar, R.: *Sand: an additive for stabilization of swelling clay soils*, *International Journal of Geoscience*, 3, 719–725(2012)
- [4] Bahloul.O , Abbeche.K , Bahloul.A *Microstructure and geotechnical characteristics of a highly plastic clay treated by magnesium chloride* Vol. 26 pp249--262 *Mining Science* (2019)
- [5] Bekkouche, A., Djedid, A., Mamoune S.M., Zoubir A. : *Esquisse de la carte géotechnique du groupement Tlemcen-Mansourah-Chetouane*, Implication de la géotechnique dans le développement Marrakech, Maroc(2003).
- [6] Lemaire, K., Dennele, D., Bonnet, S., Legret, M.: *Effects of lime and cement treatment on the physico-chemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt*, *Engineering Geology*, 166, 2455-261(2013)
- [7] AFNOR NF P11-300 : *Classification of materials for use in the construction of embankments and capping layers of road infrastructures*, *Earthworks* (1992)
- [8] Seed, H.B., Woodward, R.J., Lundgren, R.: *Prediction of swelling potential for compacted clays*, vol 88, pp53-87 *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, (1962)
- [9] Williams, A.B., Donaldson, G.W.: *Developments related to building on expansive soils in South Africa*, *Proceeding of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp 834–844, Denver, (1980)
- [10] Sneath, D. R., Johnson, L. D., Patrick, D. M.: *A Model for Predicting Expansive Soil Behavior*, *Proceedings of the Fifth International Conference on Expansive Soils*, pp 22–26, Adelaide, (1980)
- [11] Chen, F.H.: *Foundations on expansive soils*. p 463 *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier, (1988)
- [12] Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., suddepong, A. - *Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations*, vol 24 pp 2011–2021 *Construction and Building Material*, (2010)
- [13] Khemissa M., Mahamedi A., Mekki L. : *Laboratory investigation of the treatment effects by hydraulic binders on the physical and mechanical properties of an overconsolidated expansive clay*, pp 1-14 *International Journal of Geotechnical Engineering*, (2017)
- [14] Chew, S. H., Kamruzzaman, A.H.M., LEE, F.H., : *Physico-chemical and engineering behavior of cement treated clays*, vol 130, 7, pp 696-706 *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (2004)
- [15] DI sante M., Fratolocchi E., Mazzieri F. & Pasqualini E. - *Time of reaction in lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour*, *Applied Clay Science*, vol 99, pp100-109(2014).