

Study of the microstructure of collapsible soil treated with the potassium chloride

Étude de la microstructure d'un sol affaissable traité par le chlorure de potassium

Ouassila Bahloul ^{1✉}, Khelifa Abbeche ¹, Azeddine Bahloul ²

¹ Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée, LRHYA, Département de Génie Civil, Université Hadj Lakhdar Batna

² CGI Technical Services, 1612 Wedding, Redding, California, 96003USA, M. ASCE, P.E

The present paper was presented at:
'Le 3ème Colloque International sur
les sols non saturés. UNSAT Batna,
16-17 November 2015

Published online: 7 August 2016

Keywords

Collapsible soil
Compaction energy
Chemical treatment
Oedometer

Abstract: The collapse of soils is a very complex phenomenon that involves a large number of intrinsic and environment parameters. This research aims to try to better understand the causes of collapse of soils and propose solutions to improve them and limit subsidence at least to an acceptable level. From a soil sample reconstituted in the laboratory, composed of a mixture (80% sand and 20% kaolin), we have shown the benefit of additions of salt solutions such as KCl. Analyses with scanning electron microscope and spectroscopy energy dispersive X-ray revealed microstructural changes and a significant interaction between clay particles and potassium chloride. The K^+ cation is easily embedded in the pores and promotes the formation of a dense and compact material.

© 2016 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

Résumé: L'effondrement des sols est un phénomène très complexe qui fait intervenir un grand nombre de paramètres intrinsèques et environnants. La présente recherche a pour but de tenter de mieux comprendre les causes des affaissements des sols et de proposer des solutions pour les consolider et limiter l'affaissement au moins à un niveau acceptable. À partir d'un sol reconstitué au laboratoire, formé à partir d'un mélange (80% du sable et 20% du kaolin), cette étude a montré l'intérêt des ajouts de solutions salines tel que KCl. Les analyses au microscope électronique à balayage et spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie ont révélé des transformations microstructurales et une interaction notable entre les particules argileuses et le chlorure de potassium. Le cation K^+ s'incruste facilement dans les pores et favorise la formation d'un matériau dense et compacte.

Mots clés : Sol affaissable; Énergie de compactage; Traitement chimique; Oedomètre.

1. Introduction

Les sols à effondrement brusque sont des sols non saturés qui présentent des déformations potentielles importantes et un réarrangement radical de leurs particules après mouillage avec ou sans chargement. Ces sols sont caractérisés par des structures lâches formées souvent de grains allant du limon au sable fin. Ils sont localisés particulièrement dans les zones arides et semi-arides (Lawton 1989; Delage et al.1996). Ces régions sont devenues de nos jours vitales à cause de l'évolution démographique et technologique. L'occupation de ces régions conduit forcément à l'utilisation de grandes quantités d'eau favorisant un milieu idéal pour l'effondrement des sols et par conséquent la ruine des constructions. La stabilisation des sols collapse a été étudiée par un grand nombre de chercheurs (Abbeche et al. 2010; Abbeche et al. 2009; Ayadat et Gherabli1995; Karol 2003). Afin d'expliquer physiquement et chimiquement pourquoi le potentiel d'affaissement diminue en présence de la solution saline KCl, nous nous sommes appuyés sur une étude microstructurale, cette dernière comprend non

seulement les arrangements entre les pores, mais aussi les liens qui les unissent.

2. Matériaux et procédure d'essais

Les matériaux utilisés sont: sable de Liwa et kaolin de Guelma. Les essais ont été menés sur un sol reconstitué (80% sable + 20% kaolin); les caractéristiques géotechniques du sol sont représentées dans le tableau 1. Afin d'obtenir des échantillons à différents degrés de compacités, ils sont humidifiés à différentes teneurs en eau (2, 4 et 6%) ensuite ils sont soumis à différentes énergies de compactages (20, 40 et 60 coups) en utilisant un appareillage de compactage conçu au laboratoire (Ayadat et al. 1998; Bahloul et al. 2014). Les essais de compressibilité (double oedomètre) ont été effectués pour étudier l'effet du sel sur le potentiel d'affaissement. Les échantillons ont été saturés par l'eau pure et d'autres par la solution saline à différentes concentrations (0,5, 1,0, 1,5 et 2 mole/litre). Dans le but d'éclaircir l'influence des solutions salines sur la réduction du potentiel d'affaissement C_p , on a jugé utile de déterminer le taux de réduction TR comme suit:

✉ Corresponding author. E-mail address: bahouassila@gmail.com

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques des différents matériaux.

Sable	
Coefficient d'uniformité	$C_u = 3,91$
Coefficient de courbure	$C_c = 0,95$
Equivalent de sable	$E_s = 87\%$
Densité spécifique	$G_s = 2,66$
Kaolin	
Limite de liquidité	$W_l = 67\%$
Limite de plasticité	$W_p = 39\%$
Densité spécifique	$G_s = 2,40$
Sol reconstitué (sable 80% + kaolin 20%)	
Coefficient d'uniformité	$C_u = 5,13$
Coefficient de courbure	$C_c = 1,07$
Limite de liquidité	$W_l = 28\%$
Limite de plasticité	$W_p = 16\%$
Densité spécifique	$G_s = 2,65$
Densité sèche	$\gamma_d = 1,93$
Teneur en eau optimale	$W_{opt} = 10\%$

$$TR = 100 - \left(\frac{C_{pt}}{C_{pn}} \cdot 100 \right) \quad (1)$$

Avec:

C_{pn} : potentiel d'affaissement du sol non traité

C_{pt} : potentiel d'affaissement du sol traité

3. Résultats et discussions

3.1. Potentiels d'affaissement

Pour les différentes contraintes verticales σ ainsi que les différentes énergies de compactage E_c , les potentiels d'affaissement C_p varient de 0,98 à 12,40% pour une teneur en eau initiale $w_0=2\%$, et de 0,82% à 10,64% pour une teneur en eau initiale $w_0=4\%$, aussi de 0,66% à 8,79% pour une teneur en eau initiale $w_0=6\%$. Les valeurs de la présente étude correspondent aux rubriques allant de pas de risques à troubles sévères (Jennings and Knight 1975). Les figures 1 et 2 montrent que le potentiel C_p décroît quasi linéairement, lorsque la teneur en eau ou l'énergie de compactage augmentent pour une contrainte

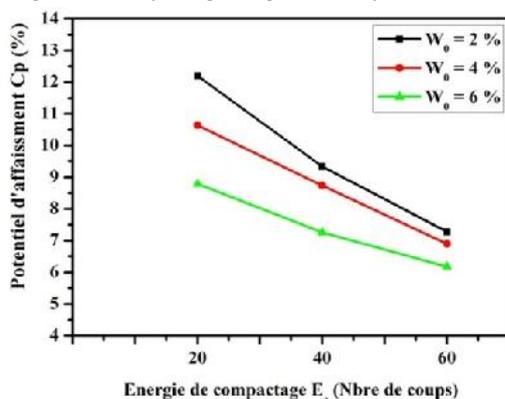


Fig. 1. Variation de C_p en fonction de l'énergie de compactage pour le sol non traité à une contrainte verticale de 400 kPa.

verticale de 400 kPa. Le sol préparé artificiellement possède un comportement analogue aux sols naturels et non remaniés (Abbeche et al. 2010; Ayadat et al. 1998).

Pour le sol traité avec la solution saline telle que le chlorure de potassium KCl, on constate des réductions substantielles du potentiel d'affaissement C_p par rapport au témoin, pour une contrainte verticale de 400 kPa le potentiel d'affaissement C_p atteint sa valeur maximale. Si on considère les C_p calculés sous une contrainte verticale de 400 kPa pour les faibles concentrations 0,5 mole/litre, le taux de réduction des C_p varie de 9% à 28%. Par ailleurs, pour les fortes concentrations 2 moles/litre, le taux de réduction des C_p varie de 72% à 82%. Le taux de réduction dans les affaissements est lié aussi à la contrainte verticale appliquée. Ainsi, pour une contrainte verticale de 200 kPa et une concentration de 0,5 mole/litre, le C_p varie de 8% à 26%. Par contre pour une concentration de 2 moles/litre, le C_p varie de 42% à 68%.

En outre, le potentiel d'affaissement C_p varie entre 18% à 70% pour une contrainte verticale de 800 kPa. Le comportement du sol traité par la solution saline KCl est influencé par la teneur en eau initiale et l'énergie de compactage d'une part et par la concentration ionique et la nature des cations adsorbés sur le complexe d'échange d'autre part (Bahloul et al. 2014; Delage et al. 1996). La structure est plus stable en présence de sel, on constate aussi le phénomène de la rétrogradation qui se manifeste pour le cation K^+ , ce dernier passe de la surface externe des argiles pour s'insinuer dans l'espace inter-foliaire de la fraction smectite contenue dans le sol.

3.2. Examen au microscope électronique à balayage (M.E.B) du sol non traité

La figure (3a) montre une structure ouverte, pauvrement cimentée entre les différents éléments du sol (sable et kaolin). L'observation au MEB met en évidence l'apparition des pores de forme et d'ouverture différente avec des zones lâches, et la présence de paillettes de kaolin et un empilement aléatoire de cristaux de quartz dans la structure, avec des cristallites ($0,01\mu m$ à $1,6\mu m$) (figure 3b). Ce type de microstructure a été rapporté par différents auteurs (Delage et al. 1996; Grabowska 1975; Halitim et al. 1984; Tessier and Berrier 1979).

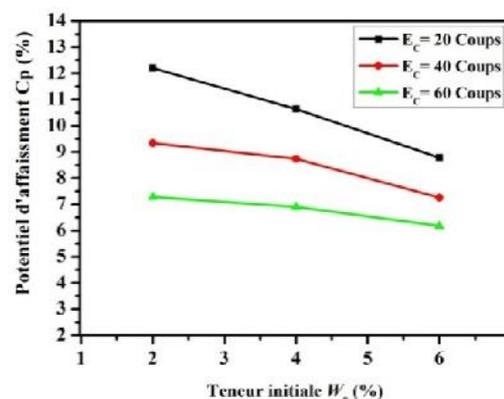


Fig. 2. Variation de C_p en fonction de la teneur en eau pour le sol non traité à une contrainte verticale de 400 kPa.

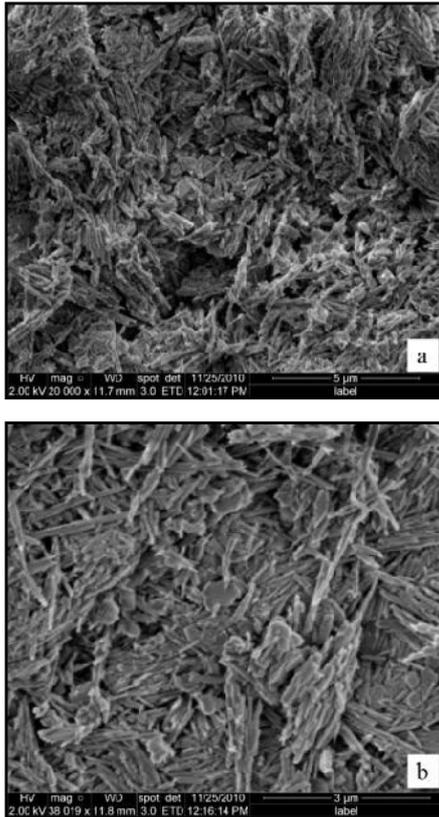


Fig.3. Observation au MEB du sol non traité.

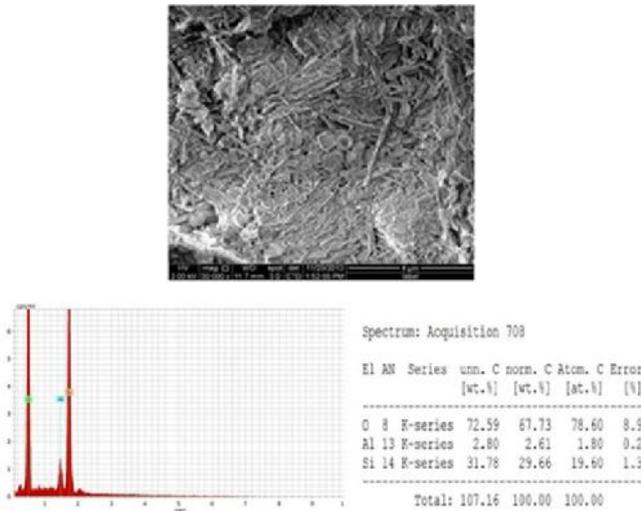


Fig.4. Analyse EDAX du sol reconstitué non traité (20000X).

Dans le cas de l'analyse dispersive en énergie de rayons X (EDAX), l'échantillon montre une concentration de Si par rapport à Al, à imputer à la présence de quartz et au kaolin et on observe aussi une matrice peu compacte et une mince couche de montmorillonite qui recouvre certaine zone du matériau (figure 4).

3.3. Examen au microscope électronique à balayage (M.E.B) du sol traité par KCl

On relève que le sel KCl précipite sous une forme cristallisée et présente une microporosité apparente avec un certain espace

entre la fraction argileuse et les cristaux de KCl et on remarque aussi une cimentation du matériau (figure 5a).

La figure 5b montre une organisation assez compacte, constituée d'agrégats argileux plus ou moins net et tassés avec apparition de cristaux de KCl, ces derniers apparaissent avec une nouvelle structuration différente par rapport à celle du sol non traité.

On constate par l'analyse dispersive en énergie de rayons X (EDAX) la présence de Si, Al (quartz et argile), Cl⁻ et K⁺ traduisant la présence de KCl avec une structure très compacte (figure 6), on remarque aussi l'effet favorable du traitement du sol reconstitué par la solution saline KCl.

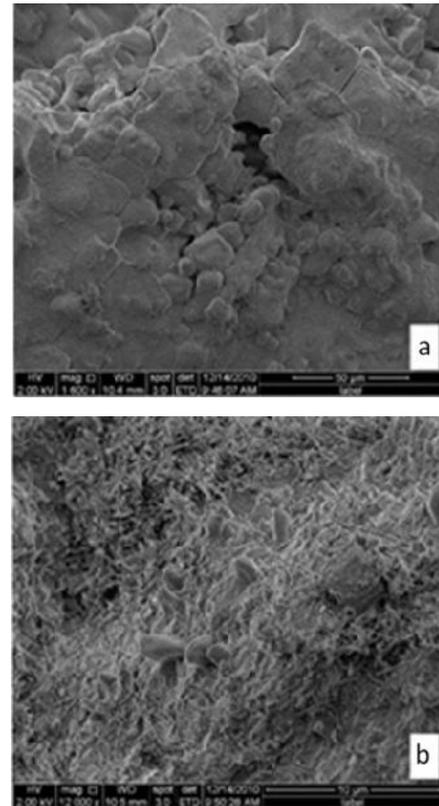


Fig.5. Observation au MEB du sol traité par KCl avec le phénomène d'adhésion.

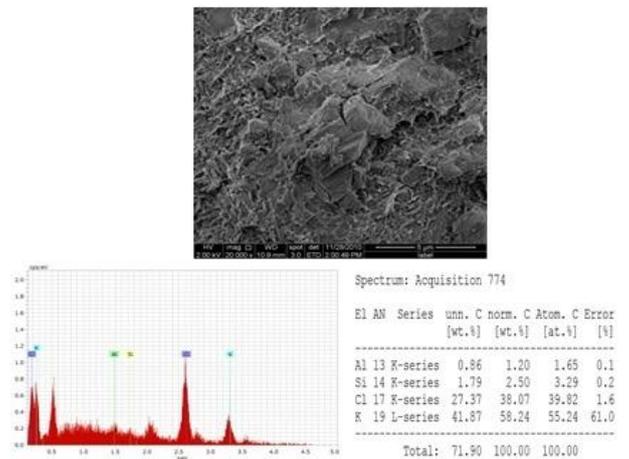


Fig.6. Analyse par EDAX du sol traité par KCl avec une structure colmatée.

4. Conclusion

Un sol affaissable peut être reconstitué au laboratoire, en mélangeant à différentes proportions le kaolin, comme particules fines, avec le sable, ramené à des teneurs en eau inférieures à l'optimum Proctor et compacté à différentes énergies de compactage. Cependant, le comportement physique et mécanique du matériau reconstitué est lié à l'énergie de compactage (E_c) et la teneur en eau initiale (w_0).

Les résultats obtenus montrent clairement que le sel minéral a une efficacité très forte sur la réduction de l'affaissement des sols. Cette efficacité est fonction de la nature du sel et de la concentration saline. En effet, les sels notamment la concentration saline et les cations jouent un grand rôle dans le comportement mécanique des matériaux argileux à travers les effets sur la double couche diffuse, leurs relations avec les matériaux argileux de nature électrostatique ont un effet important sur l'affaissement du sol. On constate des liaisons entre les deux constituants sel et sol avec une cimentation du matériau par le KCl et présence apparente du cristal vitreux sur la surface du matériau.

La présente étude a montré que l'affaissement est associé à une modification microstructurale et physico-chimique permettant d'expliquer la stabilisation efficace du sol traité par KCl. Ce traitement salin a été favorable sur la structure en provoquant un réarrangement des particules qui se traduit par la genèse d'un matériau homogène et colloïdale avec formation d'une structure stable à très faible porosité.

Références

- Abbeche, K., T. Ayadat, A. Lahmadi (2009) Traitement d'un sol à effondrement brusque par la chaux. Séminaire International Innovation et Valorisation dans le Génie Civil, pp. 161-168.
- Abbeche, K., O. Bahloul, T. Ayadat, A. Bahloul (2010) Treatment of collapsible soils by salts using the double consolidation method. *Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils*, Geotechnical Special Publications, ASCE 10.1061/41103(376)10, GeoShanghai, pp. 69-78.
- Ayadat, T., A. Gherabli (1995) Traitement d'un sol affaissable par du ciment CPA. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, France, No. 530 : 34-44.
- Ayadat, T., B. Belouahri, R. Ait Ammar (1998) La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme de l'effondrement des sols. *Revue Française de Géotechnique* 83:73-81.
- Bahloul, O., K. Abbeche, A. Bahloul, A. Halitim (2014) Effect of sodium chloride on the wetting induced collapse strain of soils. *Malaysian Journal of Civil Engineering* 26(2): 119-135.
- Delage, P., M. Audiguier, Y.J. Cui, M.D. Howat (1996) Microstructure of compacted silt *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1) : 150-158.
- Grabowska, O. (1975) SEM analysis of microstructures of loess deposits. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 11(1), 45-48.
- Halitim, A., M. Robert, D. Tessier, R. Prost (1984) Influence de Cations Exchangeables (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et de la Concentration Saline sur le Comportement Physique (Rétention en Eau et la Conductivité Hydraulique) de la Montmorillonite. *Agronomie* 4(5): 451-459.
- Jennings, J.E., K. Knight (1975) A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. *Proceedings of the 6th Regional Conf for African Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Durban, 1, pp. 99-105.
- Karol, R.H. (2003) *Chemical grouting and soil stabilization 3rd Ed.*, Dekker, New York.
- Lawton, E.C., R.J. Frigaszi, H. James (1989) Collapse of compacted clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(9) : 1252-1267.
- Tessier, D., J. Berrier (1979) Utilisation de la microstructure électronique à balayage dans l'étude des sols. *Observations des sols humides soumis à différents pF*. *Science du Sol* 1: 67-82.