

IMPACT DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LE COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE À LONG TERME DE SOLS TRAITÉS

IMPACT OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE LONG-TERM HYDRO-MECHANICAL BEHAVIOR OF TREATED SOILS

Nicolas Chabrat^{1,2}, Olivier Cuisinier¹, Michel Khatib², Farimah Masrouri¹

¹ Université de Lorraine, LEMTA (UMR 7563) CNRS, Nancy, France

² Ginger CEBTP, Élancourt, France

RÉSUMÉ – Cette étude porte sur l'altération des performances des sols argileux traités à la chaux et/ou au ciment. Des essais ont été réalisés sur des sols traités prélevés dans un remblai construit en 2010. Les résultats montrent que les caractéristiques hydromécaniques diminuent du cœur vers la bordure du remblai, traduisant un impact significatif des conditions environnementales sur les performances à long terme d'un sol traité.

ABSTRACT – This paper focuses on the performance alteration of clayey soils treated with lime and/or cement. Tests were carried out on specimens of treated materials sampled from an embankment built in 2010. The results show that the hydro-mechanical characteristics decrease from the core to the edge of the fill, reflecting a significant impact of environmental conditions on the long-term performance of a treated soil.

1. Introduction

Le traitement à la chaux et/ou au ciment est une solution qui permet la valorisation de sols non réutilisables en l'état. Ces traitements améliorent notamment les caractéristiques mécaniques comme la résistance et le module élastique du sol (par ex. Bell, 1996). Ils limitent également le retrait-gonflement des sols argileux (par ex. Nalbantoglu et Tuncer, 2011 ; Stoltz et al., 2012). Dans tous les cas, il est nécessaire d'évaluer la durabilité de la performance du sol traité au sein de l'ouvrage.

De nombreuses études en laboratoire ont permis de mettre en évidence l'effet d'une exposition prolongée aux sollicitations climatiques sur le comportement à long terme des sols traités. Certains auteurs ont montré que l'alternance de périodes sèches et humides avait un effet néfaste sur les caractéristiques d'un sol traité. Ainsi, par exemple, Liu et al. (2019) ont étudié l'impact de cycles d'immersion dans l'eau puis d'étuvage sur un sable traité à l'aide d'une précipitation de calcite. L'imposition de ces cycles, dont le protocole expérimental est décrit dans la norme ASTM D559-03, induit une baisse jusqu'à 80% de la résistance à la compression pour des éprouvettes traitées. D'autres études (Mehenni et al., 2020 ; Stoltz et al., 2012) ont adapté les procédures de simulation des cycles hydriques par le contrôle de la succion dans les éprouvettes. Dans chaque cas, l'amplitude du cycle hydrique contrôle l'intensité de la dégradation des effets du traitement.

Cependant la question de la représentabilité des résultats en laboratoire reste ouverte, car peu d'études se sont intéressées au suivi de l'évolution in situ des caractéristiques de sols traités. Quelques investigations réalisées à partir de prélèvements sur site ont tenté d'évaluer la performance des matériaux traités plusieurs années après la construction de l'infrastructure (par ex. Gutschick, 1978 ; Rosone et al., 2018). Dans le cas du canal Friant-Kern construit dans les années 70 en Californie, Akula et al. (2020) ont évalué la durabilité

à long terme d'un limon traité à 4 % de chaux. L'analyse physico-chimique des matériaux récupérés 40 ans après la construction de l'ouvrage, a permis de conclure que le dosage en traitement était approprié afin de durer dans cette période de temps, malgré une baisse sensible des performances du sol. Cuisinier et al. (2012) ont également étudié l'évolution temporelle des propriétés d'un sol traité dans le cas d'un remblai, 7 ans après sa construction. Une série d'essais triaxiaux a mis en évidence une forte hétérogénéité principalement due à la nature des sols utilisés, mais également à l'altération de certaines zones de l'ouvrage. Dans chaque cas, les conclusions des auteurs appellent à de nouvelles études visant à évaluer l'évolution potentielle des propriétés des sols traités.

Ainsi, la bibliographie montre que la majorité des études de durabilité des sols traités a été réalisée à partir d'essais en laboratoire. Actuellement il n'existe que peu d'investigations in situ permettant d'évaluer la durabilité des performances des sols traités employés en remblai. Ce constat est d'autant plus vrai pour les sols argileux. Dans ce contexte, l'objectif principal de l'étude est d'évaluer à partir d'investigations menées sur des ouvrages réels, l'évolution des performances dans le temps des sols traités. L'article présente des résultats obtenus à partir de prélèvements réalisés dans un remblai en sol argileux traité à la chaux et/ou au ciment construit en 2010. Dans un premier temps, les caractéristiques des sols employés ainsi que la mise en œuvre du remblai sont détaillées. Par la suite, la phase de prélèvements des matériaux est précisée. Enfin, les résultats des essais de compressibilité des matériaux prélevés seront comparés aux performances des sols traités initiaux.

2. Présentation du site d'étude et des matériaux

L'ouvrage retenu dans le cadre de ce travail est un remblai situé le long de la RN19 à Héricourt (70). Cet ouvrage expérimental a été construit dans le cadre du projet ANR TerDOUEST (2008-2012). Le remblai fait 112 m de long et 5 m de hauteur. La pente du talus est de 2H/1V, la largeur du remblai est de 25 m en pied et 5 m en tête. Cet ouvrage a fait l'objet d'un suivi important au moment de sa construction (Froumentin et Boussafir, 2013), et après (par ex. An et al., 2017 ; Bicalho et al., 2018). De nombreuses études sur les matériaux mis en œuvre ont aussi été réalisées (par ex. Dong, 2013 ; Razakamanantsoa et al., 2012).

2.1 Matériaux employés

Le remblai a été construit en deux parties, la première avec une argile F4 et l'autre avec un limon F2 (selon la classification française). Cette étude se concentre sur la partie du remblai réalisée avec l'argile F4 dont les caractéristiques principales sont données dans le Tableau 1.

Le Tableau 2 rappelle les caractéristiques de compactage de l'argile de Héricourt à l'optimum Proctor et pour différents dosages. Ces caractéristiques ont été déterminées suite à une campagne d'essais de laboratoire préalables à la construction (Froumentin et Boussafir, 2013). Des données complémentaires comme la minéralogie ou la microstructure de l'argile de Héricourt sont également disponible dans Stoltz et al. (2014).

Tableau 1. Propriétés géotechniques de l'argile de Héricourt (Stoltz et al., 2012).

Passant à 80 μm (%)	Passant à 2 μm (%)	Gs (-)	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	VBS (-)
90	70	2,67	71	29	42	4,2 à 6,3

Tableau 2. Caractéristiques de compactage de l'argile de Héricourt (Froumentin et Boussafir, 2013).

Dosage	0 %	2 % CaO	5% CaO	2 % CaO + 3 % CEM II
$\rho_{d,OPN}$ (Mg.m-3)	1,45	1,34	1,20	1,34
w_{OPN} (%)	26,5	32,0	37,0	32,5
e_i (-)	0,84	1,00	1,23	1,00

2.2 Structure de l'ouvrage

La structure de la partie de l'ouvrage en argile F4 est donnée sur la Figure 1. Trois casiers principaux ont été réalisés dans la partie inférieure du remblai. La partie supérieure reproduit une structure d'assise de chaussée avec deux modalités de traitement. Un enduit bicouche a également été mis en œuvre afin d'imperméabiliser la couche d'assise. Pour chaque partie de l'ouvrage, différents dosages de traitement ont été utilisés. Le corps du remblai, est constitué de 3 différents casiers, chacun avec un traitement spécifique.

- Le casier n°1 est en argile non traitée, mais l'utilisation d'un traitement d'appoint de 4 % de chaux vive afin d'assurer la traficabilité sur chantier a été nécessaire pour les couches R08 à R11.
- Le casier n°2 a été traité à 4 % de chaux vive.
- Le casier n°3 a été traité à 2 % de chaux vive et 3 % de ciment CEM II.

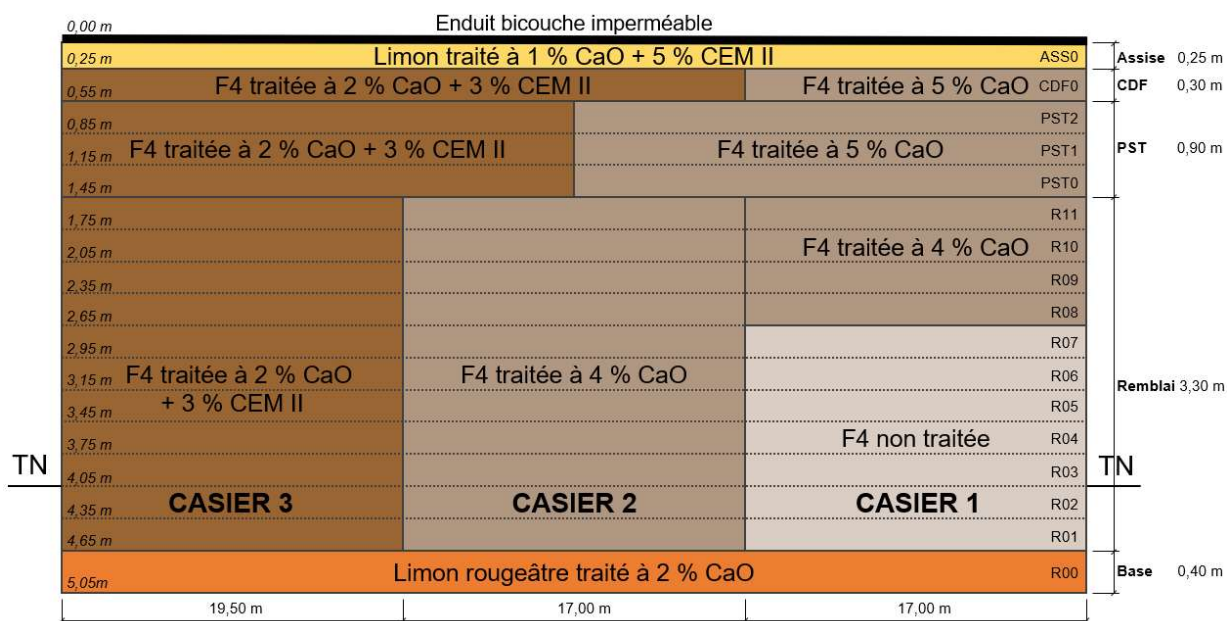


Figure 1. Coupe longitudinale du remblai de Héricourt (Froumentin et Boussafir, 2013).

La construction du remblai, de la définition des dosages aux modalités de mise en place, est détaillée par Froumentin et Boussafir (2013). L'argile F4 provient des déblais du chantier de la RD438, route construite au même moment que le remblai. Chaque couche a été traitée sur place par épandage, puis malaxée et enfin compactée à l'aide d'un compacteur vibrant à pied dameur (VP5). Pour les couches de remblai et de partie supérieure de terrassement

(PST), l'objectif de densification a été fixé à Q4, tandis que la couche de forme a pour objectif de compactage Q3.

Enfin, le remblai a été construit suivant la méthode excédentaire avec une largeur de 1 m par rapport à la côte horizontale du talus fini. Cette méthode permet de garantir les objectifs de compactage, ainsi que l'homogénéité au niveau des bordures du remblai. Une couche de terre végétale d'environ 0,10 m a également été rajoutée sur le talus à la fin de la construction.

2.3 Prélèvements

La campagne de prélèvements a été effectuée en novembre 2020. Des carottages horizontaux ont été réalisés dans les trois casiers du remblai, à environ 1,80 m au-dessus du terrain naturel. La profondeur des carottages est de 4,50 m, afin de prélever jusqu'au cœur du remblai (Figure 2). Un carottage par rotation avec de l'eau comme fluide de forage a été choisi afin de pouvoir garantir la qualité des prélèvements. Ainsi, un taux de récupération de 97% a été constaté sur les carottages horizontaux.

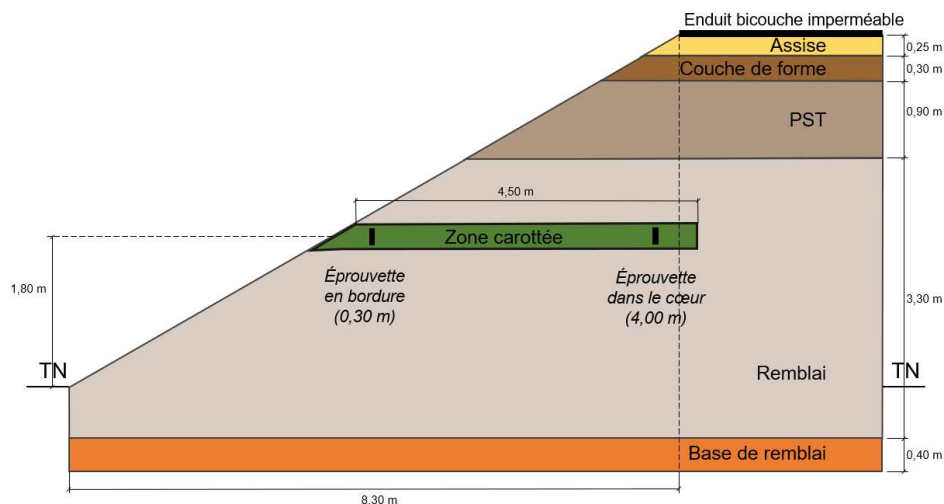


Figure 2. Zone de carottage dans le remblai.

3. Approche expérimentale

Dans le cadre de cette étude, le comportement du sol prélevé à proximité de la bordure a été comparé à celui du sol issu de la partie la plus interne du remblai afin de mettre en évidence l'impact des conditions environnementales. Des essais œdométriques ont été réalisés avec pour objectif de quantifier explicitement les effets du traitement. Cette approche consiste à comparer le comportement du sol traité à celui du même sol dans un état remanié en se basant sur la détermination du facteur de sensibilité S_σ (Burland et al., 1996 ; Gasparre et Coop, 2008). Ce paramètre est défini comme le rapport entre la contrainte de préconsolidation d'un sol compacté et la contrainte verticale déterminée sur la courbe vierge du sol pour le même indice des vides.

Ainsi, pour les casiers n°2 et n°3, deux éprouvettes de sols ont été préparées : la première au niveau de la bordure du remblai à environ 0,30 m de la surface, la seconde dans le cœur du remblai à environ 4,00 m de la surface. Pour le casier n°1, seule une éprouvette extraite dans la bordure du remblai a été préparée. Ces 5 éprouvettes de sols ont été tout d'abord coupées dans la carotte à l'aide d'une scie à lame diamantée, puis ajustées à un diamètre de 70 mm. Après transfert dans l'œdomètre, la hauteur initiale des éprouvettes est de l'ordre de 15 mm. Ensuite, les éprouvettes ont été saturées puis soumises à un chargement par paliers jusqu'à 3,9 MPa.

Deux autres essais ont également été réalisés sur la même argile F4 non traitée, prélevée lors de la construction et conservée depuis en laboratoire. La première éprouvette a été compactée à l'optimum Proctor normal de manière statique. Pour la deuxième, une pâte d'argile a été préparée à 1,5 fois la limite de liquidité afin d'établir la courbe vierge du sol (Burland, 1990). Dans les deux cas, la hauteur de l'éprouvette est de 10 mm et le diamètre est de 70 mm. Ces essais serviront par la suite de point de comparaison avec les autres essais prélevés dans le remblai. Enfin à l'aide d'un potentiomètre (WP4C®) la succion totale initiale des éprouvettes a été déterminée.

4. Résultats

Les résultats obtenus pour tous les essais sont répertoriés dans le Tableau 3.

La Figure 3a présente la courbe de compressibilité de l'éprouvette extraite dans la bordure du casier n°1 traité dans une zone à 4 % de chaux (notée SCH1 Bordure). Un gonflement inférieur à 1 % est observé durant la phase de saturation, valeur très inférieure à celle du sol non traité reconstitué en laboratoire pour lequel le gonflement est de 14,1 %. Toutefois, après la phase de saturation, les indices des vides du sol non traité et du sol prélevé à proximité de la surface du remblai coïncident. Cette similitude des comportements de l'éprouvette SCH1 Bordure et de l'éprouvette non traitée se confirme tout au long du chargement. C'est la raison pour laquelle les indices de gonflement C_G et de compression C_C des deux éprouvettes ainsi que les contraintes de préconsolidation σ'_p sont très proches.

La Figure 3b permet d'évaluer le rôle de la position de prélèvement au sein du remblai sur la compressibilité de l'argile traitée à 4 % de chaux. Les caractéristiques mécaniques de l'éprouvette prélevée en bordure du casier n°2 sont équivalentes à ce qui a été observé sur la bordure du casier n°1. Néanmoins, la courbe de compressibilité du sol prélevée en cœur de remblai est très différente : deux ordres de grandeurs séparent ainsi les contraintes de préconsolidation de ce même matériau, prélevé à deux endroits distincts du remblai. Le gonflement du sol lors de la phase de saturation est cependant toujours très restreint (inférieur à 1%).

Tableau 3. Caractéristiques mécaniques des essais.

Éprouvette	SCH1* Bordure	SCH2* Bordure	SCH2* Cœur	SCH3* Bordure	SCH3* Cœur	Non Traité WOPN
Traitement	4 % Cao	4 % Cao	4 % Cao	2 % CaO + 3 % CEM II	2 % CaO + 3 % CEM II	/
e_0 (-)	1,027	1,019	1,16	0,999	1,134	0,845
$\rho_{d,i}$ (Mg.m ⁻³)	1,32	1,33	1,24	1,34	1,25	1,45
w_i (%)	34,0	35,1	40,1	30,9	31,1	26,5
$S_{r,i}$ (%)	88,6	92,1	92,5	82,7	73,4	83,9
s_i (MPa)	0,34	0,32	0,09	0,36	0,12	1,40
σ'_p (kPa)	28	23	1447	20	849	49
C_C (-)	0,21	0,23	0,34	0,19	0,32	0,25
C_G (-)	0,04	0,05	0,05	0,05	0,09	0,03
S_σ (-)	0,1	0,1	5,7	0,1	2,8	0,2

* Sondage carotté horizontal effectués dans le casier n°1, 2 ou 3

Les résultats œdométriques obtenus dans le casier n°3 (traité à 2 % de chaux et 3 % de CEM II) sont présentés dans la Figure 3c. Dans le cas du prélèvement à la proximité de la surface du remblai, l'indice des vides initial est similaire aux indices des vides déterminés expérimentalement pour le même dosage (environ 1,00). Néanmoins, après la phase de

gonflement, la courbe de consolidation s'approche de celle du sol non traité. Les caractéristiques du sol prélevé en bordure du remblai sont à nouveau comparables aux caractéristiques d'un sol non traité à l'optimum Proctor. Dans le cas de l'éprouvette SCH3 Cœur, la phase de saturation est marquée par un très faible gonflement de l'éprouvette. Le rapport entre la contrainte σ'_p au cœur du remblai et en bordure est de l'ordre de 42, ce qui montre que la partie à proximité de la surface du remblai a été fortement dégradée.

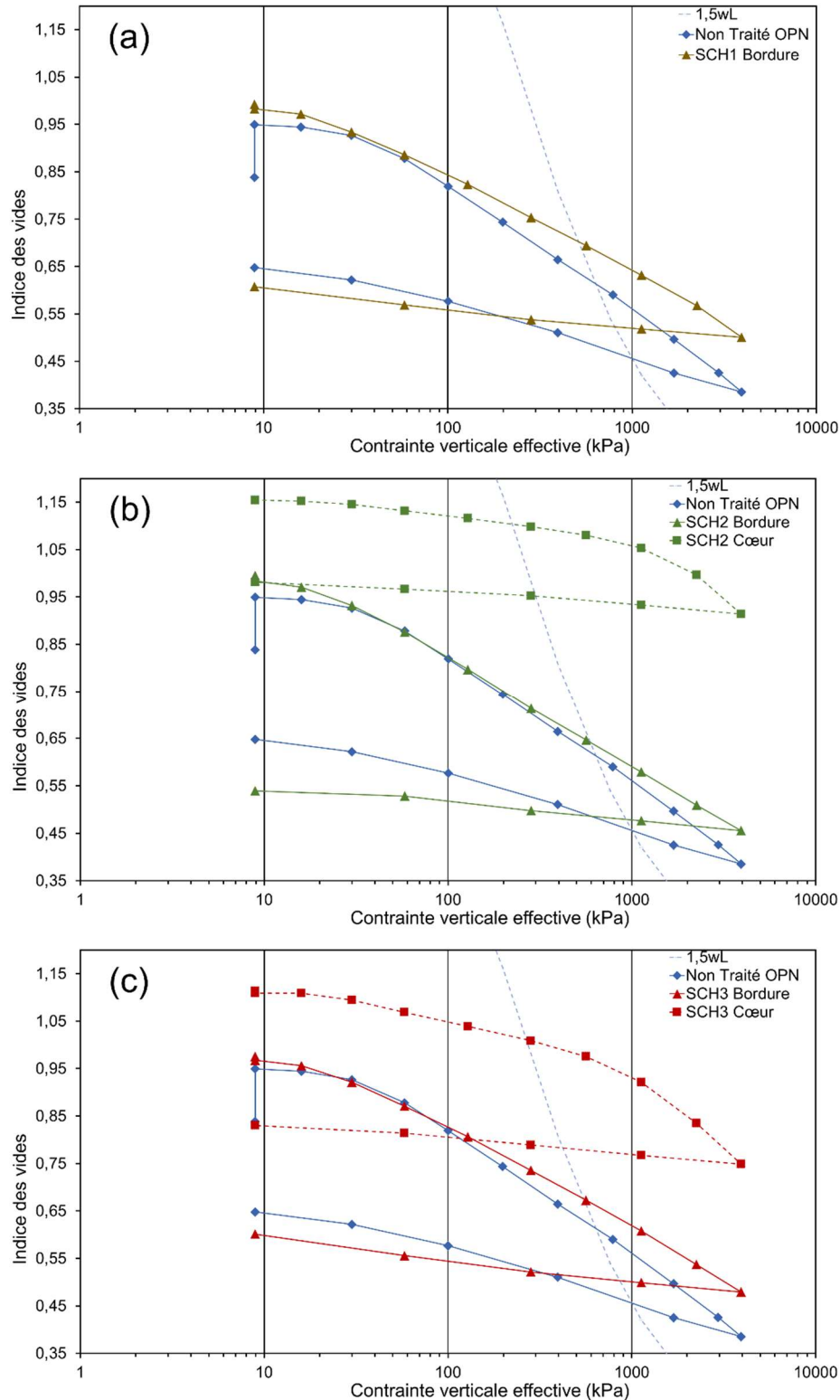


Figure 3. Effet de la position dans le remblai sur les courbes de compressibilité d'éprouvettes prélevées dans le casier n°1 (a), le casier n°2 (b) et le casier n°3 (c).

5. Discussion

Les résultats obtenus durant cette étude permettent d'évaluer l'état du traitement dans chaque casier en argile, 11 années après la construction de l'ouvrage. Une série d'essais œdométriques (Figure 3) a mis en évidence une différence de comportement entre les éprouvettes de sol prélevées à proximité de la surface du remblai de celles provenant de la partie interne de l'ouvrage. Cet écart entre les résistances mécaniques de la bordure et du cœur du remblai est observable dans les mêmes proportions pour chaque casier étudié. Ces résultats montrent que les sols prélevés en bordure de remblai ont subi une dégradation de leurs caractéristiques mécaniques.

L'impact du traitement sur le comportement mécanique peut être quantifié pour chaque essai à l'aide du facteur de sensibilité S_σ (tableau 3). On constate ainsi que le facteur de sensibilité dépend de la position du prélèvement. Ce paramètre peut être comparé aux résultats obtenus par Stoltz et al. (2014) sur des éprouvettes après 28 jours de cure. Dans le cas des éprouvettes prélevées en cœur de remblai, le facteur de sensibilité est du même ordre de grandeur que les valeurs déterminées par Stoltz et al., (2014) ($S_\sigma = 3,7$ pour une éprouvette à 2 % de chaux et $S_\sigma = 10,2$ pour une éprouvette à 5 % de chaux). Pour les éprouvettes prélevées en bordure du remblai, le facteur de sensibilité de chaque éprouvette est très faible (aux alentours de 0,1 dans les trois cas), et est comparable au facteur de sensibilité d'un sol non traité (égal à 0,2). Ces observations laissent à penser que le traitement a été fortement dégradé dans le temps à proximité de la surface du remblai.

6. Conclusion et perspectives

Les essais effectués sur des sols prélevés dans le remblai de Héricourt, ouvrage construit en 2010, ont permis d'évaluer les performances dans le temps de sols argileux traités en conditions réelles. Ces résultats mettent en évidence une forte disparité de comportement entre les éprouvettes prélevées en bordure et les éprouvettes prélevées dans la partie interne du remblai. Dans le cœur de l'ouvrage, la comparaison des facteurs de sensibilité entre éprouvettes prélevées et éprouvettes préparées en laboratoire a permis d'évaluer la quantité de produits cimentaires dans le sol. Cependant, le nombre d'essais effectués ne permet pas encore de conclure quant à la possible altération de la partie interne du remblai. À proximité de la surface de l'ouvrage, les résistances mécaniques du sol sont faibles et comparable à la résistance obtenue pour un sol non traité. La différence de comportement entre la partie interne et la bordure sont ainsi très marquées. Ces observations tendent à remettre en question la durabilité du traitement à proximité de la surface du remblai.

Toutefois, ces résultats doivent être approfondis par de nouveaux essais mécaniques entre la bordure et le cœur de l'ouvrage, afin de déterminer l'influence de la profondeur dans le remblai. Ces résultats seront précisés par l'analyse microstructurale (porosimétrie par intrusion de mercure) et physico-chimique (analyse thermogravimétrique) des échantillons du remblai. Cette approche multi échelle permettra d'obtenir une méthodologie concrète pour prédire la durabilité des ouvrages en sol traité.

7. Remerciements

Ce travail a été réalisé en partie dans le cadre du projet MSCA-RISE GEORES financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne à travers l'accord de subvention n°778120.

8. Références bibliographiques

- Akula, P., Hariharan, N., Little, D.N., Lesueur, D., Herrier, G., 2020. Evaluating the Long-Term Durability of Lime Treatment in Hydraulic Structures: Case Study on the Friant-Kern Canal. *Transportation Research Record* 2674, 431–443.
- An, N., Hemmati, S., Cui, Y., 2017. Numerical analysis of soil volumetric water content and temperature variations in an embankment due to soil-atmosphere interaction. *Computers and Geotechnics* 83, 40–51.
- ASTM D559-03, 1995. Standard Tests Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures.
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42, 223–237.
- Bicalho, K.V., Boussafir, Y., Cui, Y.-J., 2018. Performance of an instrumented embankment constructed with lime-treated silty clay during four-years in the Northeast of France. *Transportation Geotechnics* 17, 100–116.
- Burland, J.B., 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique* 40, 329–378.
- Burland, J.B., Rampello, S., Georgiannou, V.N., Calabresi, G., 1996. A laboratory study of the strength of four stiff clays. *Géotechnique* 46, 491–514.
- Cuisinier, O., Gandille, D., Robinet, A., Stoltz, G., Mehenni, A., Robin, V., 2012. Long term behaviour of treated soils—case study of a lime and cement stabilized backfill, in: *Proceedings of the 3rd International Seminar on Earthworks*, Technische Universität München, Berlin, Germany. pp. 189–200.
- Dong, J., 2013. Étude de l'effet de la taille d'agrégats sur la raideur des sols fins traités à la chaux et/ou au ciment : des conditions de laboratoire aux conditions in situ (These de doctorat). Paris Est.
- Froumentin, M., Boussafir, Y., 2013. La construction d'un remblai expérimental unique en France en sols fins traités hors spécification. *Colloque TerDOUEST*.
- Gasparre, A., Coop, M., 2008. Quantification of the effects of structure on the compression of a stiff clay. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Gutschick, K.A., 1978. Lime stabilization under hydraulic conditions. 4th Lime Congress. pp. 1-20.
- Liu, S., Wen, K., Armwood, C., Bu, C., Li, C., Amini, F., Li, L., 2019. Enhancement of MICP-Treated Sandy Soils against Environmental Deterioration. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31.
- Mehenni, A., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2020. Alteration of the Hydromechanical Performances of a Stabilized Compacted Soil Exposed to Successive Wetting–Drying Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering* 32.
- Nalbantoglu, Z., Tuncer, E.R., 2011. Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Razakamanantsoa, A., David, J.P., Rayssac, E., 2012. Influence des modalités de préparation de l'argile d'Héricourt traitées à la chaux et au ciment sur leur comportement mécanique. *JNGG 2012*
- Rosone, M., Ferrari, A., Celauro, C., 2018. On the hydro-mechanical behaviour of a lime-treated embankment during wetting and drying cycles. *Geomechanics for Energy and the Environment* 14, 48–60.
- Stoltz, G., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2014. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles. *Engineering Geology* 9.
- Stoltz, G., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2012. Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil. *Applied Clay Science* 61, 44–51.