
Caractérisation de l'effet d'un agent tensio-actif sur la perméabilité et la rétention d'eau dans un sol

Moez SELMI^{1,2}, Mariem KACEM¹, Mehrez JAMEI², Philippe DUBUJET¹

¹ Université de Lyon, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Saint Etienne, France (moez.selmi@enise.fr , mariem.kacem@enise.fr , Philippe.dubujet@enise.fr)

² National Engineering School of Tunis, Civil Engineering Department, Tunis El Manar University, Tunisia (moez.selmi@enise.fr, mehjamei@yahoo.fr)

RÉSUMÉ.

Les tunneliers à pressions de terre (EPBM, Earth Pressure Balance Machine) sont conçus pour le creusement des tunnels en terrain meuble. Dans le cas des sols fins, des additifs sont utilisés pour augmenter les performances et faciliter le creusement. Ces additifs sont classiquement formés par des mousses à base de tensio-actif. Au cours du traitement la mousse s'intègre dans le sol en modifiant sa structure à partir de la création des porosités fermées formées par des bulles de gaz discrètes. La présence de la mousse dans le sol modifie les propriétés hydromécaniques du sol. Cette étude s'intéresse à étudier l'effet d'un agent moussant (CLBF5 TM) sur la perméabilité et la rétention d'eau dans un sol sableux argileux. Des essais de perméabilité à charge variable montrent que l'injection de la mousse dans le sol conduit à la diminution de la perméabilité du mélange. Sous l'effet de la consolidation la perméabilité du sol traité tend vers celle du sol propre grâce à la dégradation de la mousse. La courbe de rétention d'eau est affectée par la présence de la mousse dans le sol et agit sur la succion dans le sol. La mousse provoque une désaturation rapide de l'échantillon et modifie les paramètres de drainage du sol. La connaissance de ces deux paramètres valorise la maîtrise des sols excavés et traités par des agents moussants. Ces sols sont généralement classés comme déchets polluant et placés dans des zones de dépôt.

ABSTRACT.

Earth Pressure Balance Machine (EPBM) is designed for digging tunnels in grinding ground. In the case of fine soils, additives are used to increase performance and facilitate digging. These additives are conventionally formed by surfactant-based foams. During the treatment the foam mixed with the soil modify the soil structure which results in the creation of closed porosity formed by discrete gas bubbles. The presence of the foam in the soil modifies the hydro-mechanical properties of the soil. This study investigates the effect of a foaming agent (CLBF5TM) on permeability and water retention in sandy clay soil. Permeability tests with variable load show that the injection of the foam into the soil leads to the decrease of the permeability of the mixture. The water retention curve is affected by the presence of the foam in the soil and acts on the suction in the soil. The knowledge of these two parameters enhances the control of excavated soils and treated with foaming agents. These soils are generally classified as polluting waste and placed in disposal areas.

MOTS-CLÉS : sol fin, propriétés hydrauliques, mousse, perméabilité, rétention d'eau

KEY WORDS: fine soil, hydraulic properties, foam, permeability, retention curve

1. Introduction

Les machines EPB (Earth Pressure Balance Machine) sont destinées à creuser dans les sols fins argileux. Pendant le creusement des sols argileux par ce type tunneliers, des problèmes de collage de l'argile sur l'outil se produisent. Ces problèmes se traduisent par des blocages et réduction des performances dans la tête de coupe et le convoyeur à vis qui assure l'extraction du sol en dehors du tunnelier [MIL 2000, PEN 2007, PEI 2011]. Des additifs sous forme de tensio-actif sont généralement utilisés pour résoudre ces problèmes. Ces additifs permettent d'atténuer les inconvénients des boues lourdes. Ils confèrent aux déblais une fluidité qui améliore leur évacuation ainsi que leur imperméabilité à l'eau [PIC 2015, LAN 2000, LAN 2005].

Le traitement du sol par les agents moussants affecte en premier temps la structure du sol traité à travers la modification de la porosité et la création des bulles discrètes [PSO 2002, BEZ 2012, MOR 2018]. Mori, 2018 [MOR 2018] montre l'augmentation du volume d'air dans le mélange sol mousse en fonction du taux d'injection de la mousse dans le sol (FIR). Ce volume d'air introduit dans le sol sous forme de porosité fermée conduit à une modification des propriétés hydromécaniques du sol (consolidation, cisaillement, perméabilité... Etc). Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de la mousse sur les propriétés mécanique et hydraulique du sol [VEN 2007, THE 2010]. Les résultats montrent une diminution de la perméabilité, de l'angle de frottement et une augmentation de la compressibilité du sol traité. Par ailleurs, l'état de la mousse dans le sol est non stable, il peut être dû à plusieurs causes : état de contrainte du sol, état de saturation et vieillissement de la mousse au cours du temps.

Le but de cette étude est d'étudier l'effet de l'instabilité de la mousse sous l'effet de la consolidation sur la perméabilité et la rétention d'eau dans le sol. Le sol étudié est un sol sableux-argileux traité avec l'agent moussant CLB F5TM. Des essais de perméabilité à charge variable ont été réalisés afin d'étudier l'effet de la mousse sur la perméabilité. Les essais sont ensuite réalisés sous différentes charges de consolidation afin de déduire l'effet de l'état de consolidation du mélange sol-mousse sur la perméabilité. L'effet de la mousse sur le chemin de dessaturation du sol a été aussi étudié. La courbe de rétention d'eau a été réalisée à partir de la cellule à pas de pression multiple. Les deux courbes de rétention d'eau du sol traité et sol non traité ont été étudiées afin d'analyser l'effet de la mousse. L'effet de la variation du pourcentage volumique de la mousse injectée dans le sol (FIR) sur la perméabilité et la rétention d'eau a été aussi étudié.

1. Matériel et méthodes

Dans le cadre de notre étude, un sol sableux-argileux constitué de 60% de sable ($D_{50} = 0,38 \text{ mm}$) et du Kaolin ($D_{50} = 0,01 \text{ mm}$) a été choisi pour s'adapter au mode de creusement par les tunneliers EPB. Ce type de sol nécessite un traitement par des agents moussants pour réduire l'aspect collant de l'argile il correspond à un sol de type A1 selon la classification GTR.

L'agent moussant (CLB F5TM) utilisé est fourni par l'entreprise CONDAT. Ce tensioactif de type anionique est utilisé principalement dans les terrains imperméables ou les terrains avec une forte teneur en fines comme les limons et les argiles.

La procédure de traitement du sol par la mousse est définie par trois paramètres essentiels :

- Concentration de l'agent tensio-actif : $C_f(\%)$: $C_f = m_{at}/m_{dm}$ [1]
- Taux d'expansion de la mousse : FER (%) : $FER = V_m/V_{dm}$ [2]
- Taux d'injection de la mousse : FIR (%) : $FIR = V_m/V_{sol}$ [3]

avec m_{at} représente la masse de l'agent tensio-actif, m_{dm} la masse de la dissolution de l'agent moussant dans l'eau, V_{dm} le volume de la dissolution de l'agent moussant dans l'eau, V_m le volume de la mousse expansée et V_{sol} le volume de la dissolution de l'agent moussant dans l'eau.

Les paramètres de traitement optimal du sol choisis ont été déterminés en utilisant l'essai de mini-cône d'Abrams. Cette méthode a été utilisée par plusieurs chercheurs pour déduire les paramètres permettant une consistance adéquate du sol excavé et qui se traduit par un affaissement au mini-cône de 4 cm [BOR 2010; PEI 2009; QUE 1998 ; ZUM 2017]. Dans notre cas, un $C_f=3\%$, $FER=10\%$ et $FIR=150\%$ ont été utilisés pour satisfaire cette condition.

Les mesures de perméabilité à charge variable sont effectuées en utilisant la cellule œdométrique. Cette méthode est conçue pour les sols argileux afin d'appliquer des charges hydrauliques variables et faibles. Les échantillons des sols dans la cellule sont caractérisés par un diamètre de 7,2 cm et une hauteur de 2 cm. La méthode de perméabilité à charge variable consiste à créer une différence de charge entre le bas et le haut de l'échantillon (Norme NF X30-422). La perméabilité de l'échantillon est déduite par l'équation 4.

$$K=(\alpha L/S \Delta t) \ln[h_1/h_2] \quad [4]$$

avec α , S et L représentent respectivement la section du tube d'eau relié à l'échantillon, la section et la hauteur de l'échantillon du sol, Δt est l'intervalle du temps entre un temps t_1 et t_2 , h_1 et h_2 représentent les différences de charge à t_1 et t_2 respectivement. L'essai de perméabilité est réalisé sur un sol propre et un sol traité préparé à la même teneur en eau initiale et consolidé à une charge identique afin de déduire l'effet de la mousse.

La courbe de rétention d'eau dans le sol est établie en utilisant la cellule à pas de pression multiple. Les deux paramètres : pression et teneur en eau volumique (ψ, θ_w) définissent la courbe de rétention d'eau. L'essai est réalisé sur un sol non traité et un autre traité avec une teneur en eau volumique initiale identique afin de déduire l'effet de la mousse sur la rétention d'eau dans le sol. Les paramètres de l'équation de van Genuchten sont déduits à partir de la courbe de rétention [MUA 1976, VAN 1980]. Ces paramètres sont nécessaires pour modéliser l'écoulement d'eau dans un sol non saturé. L'équation de van Genuchten relie la teneur en eau à la succion dans le sol par l'éq 5:

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(1 + |\alpha\psi|^{\frac{1}{1-m}}\right)^{-m} & \text{si } \psi > \psi_s \\ \theta_s & \text{si } \psi < \psi_s \end{cases} \quad [5]$$

avec, θ_r la teneur en eau résiduelle (%), θ_s la teneur en eau à saturation (%) ψ est la succion du sol (KPa), α est un paramètre empirique égale à l'inverse de la charge capillaire critique et m un paramètre empirique déterminé à partir du logiciel RETC (REtention Curve program for unsaturated soils) [VAN 1991].

2. Résultats et discussions

La perméabilité du sol est affectée par la mousse injectée ainsi que l'état de consolidation des échantillons. Les résultats trouvés montrent la diminution de la perméabilité du sol traité comparé au sol non traité pour des échantillons soumis à des contraintes de consolidation faible (inférieur à 50 kPa). En effet, la mousse s'intègre dans le sol comme un milieu granulaire équivalent qui se rajoute à l'initial en changeant les chemins d'écoulement d'eau dans le mélange sol mousse [GUI 2011]. Soumis à des contraintes de consolidation la mousse se dégrade et le volume des bulles générés dans l'échantillon se réduit [MOR 2018, SEL 2016]. La perméabilité du sol traité tend alors vers la perméabilité du sol propre (figure 1.a). En effet, la consolidation affecte le volume d'air créés par la mousse dans le sol (n_f). Ce paramètre est estimé expérimentalement en mesurant le pourcentage volumique d'air généré par la mousse dans le mélange du sol traité. L'échantillon est saturé, mis à l'étuve pour déduire déterminer le volume solide et volume d'eau et déduire après le volume des bulles. L'évolution de ce paramètre en fonction de la pression de consolidation (σ) est illustrée dans la figure 1.b. Elle montre une réduction considérable du volume de la mousse dans le sol sous effet de la consolidation. Ce qui explique l'effet de la dégradation de la mousse sur la récupération de perméabilité du sol propre. Ces résultats sont confirmés par MOR [2018] qui a confirmé que la porosité du sol traité tend vers la porosité du sol propre sous une pression de consolidation inférieure à 200 kPa. Les résultats de mesure de perméabilité en fonction du FIR montrent une diminution de la perméabilité (figure 2). Ils confirment l'effet de la mousse injectée dans le sol sur la diminution de la perméabilité. Ce dernier résultat est similaire à celui trouvé dans d'autres travaux (VEN 2007, THE 2010, LAN 2000).

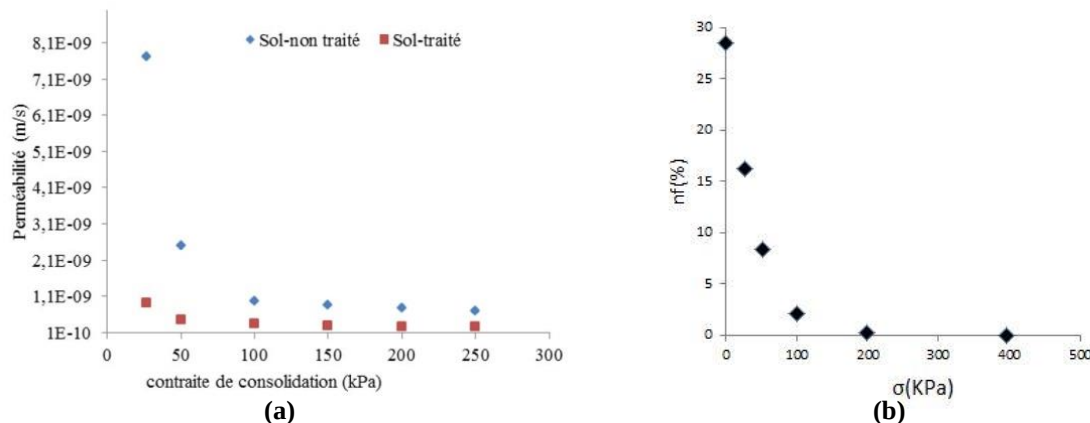


Figure 1. Effet de la consolidation sur la perméabilité et n_f (a) Evolution de la perméabilité sous effet de la consolidation (b) évolution de n_f en fonction de la pression de consolidation

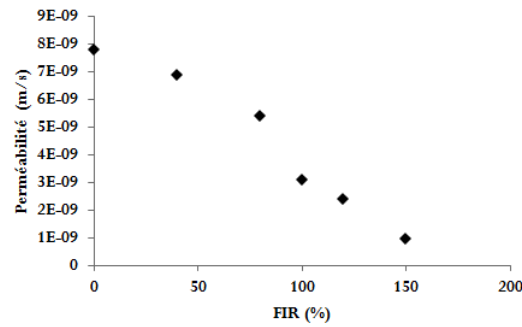


Figure 2. Evolution de la perméabilité en fonction de FIR

Les courbes de rétention d'eau établies pour les deux types de sol (traité et non traité) montrent que pour des pressions appliquées inférieures à 100 kPa, la teneur en eau volumique dans l'échantillon traité évolue plus rapidement qu'un sol non traité en fonction de la succion (figure 3). Cette évolution de teneur en eau conduit à une dessaturation plus rapide de l'échantillon du sol. Cet effet est dû au drainage de la mousse avec l'eau contenue dans les pores du sol qui favorise ainsi la dessaturation des échantillons traités. Pour des pressions fortes ($\psi > 100$ kPa), la mousse commence à se dégrader et les volumes et tailles des bulles dans le mélange se réduisent considérablement [MOR 2018, SEL 2016]. Une faible quantité de bulles de la mousse reste piégée entre les grains du sol et le comportement du mélange tend vers le comportement du sol propre. A partir de ces résultats de la courbe de rétention, des paramètres de drainage d'eau dans le milieu non saturé sont déduits. L'évolution de la courbe de rétention en fonction du FIR montre que le drainage est affecté par les bulles d'air créées dans le mélange qui augmente en augmentant le paramètre de traitement FIR.

Les paramètres trouvés pour simuler les trois courbes de rétention montrent une diminution de la teneur en eau résiduelle θ_r et de saturation dans le cas du sol traité. Les paramètres m et α du mélange sol-mousse sont supérieurs à ceux du sol non traité (Tableau 1). Cela est dû à une évolution plus rapide de la teneur en eau volumique en fonction de la pression pour le sol traité. En effet, les bulles de la mousse occupent une partie de l'espace poreux qui a été occupé par l'eau dans le cas du sol non traité.

Tableau 1. Comparaison de paramètres van Genuchten pour un sol non-traité et sols traités

Paramètre	Sol non-traité	Sol-traité-FIR-100	Sol traité-FIR-150
θ_s	0,0438	0,0431	0,0426
θ_r	0,041	0,025	0,011
α	0,024	0,035	0,03
m	0,64	0,52	0,40

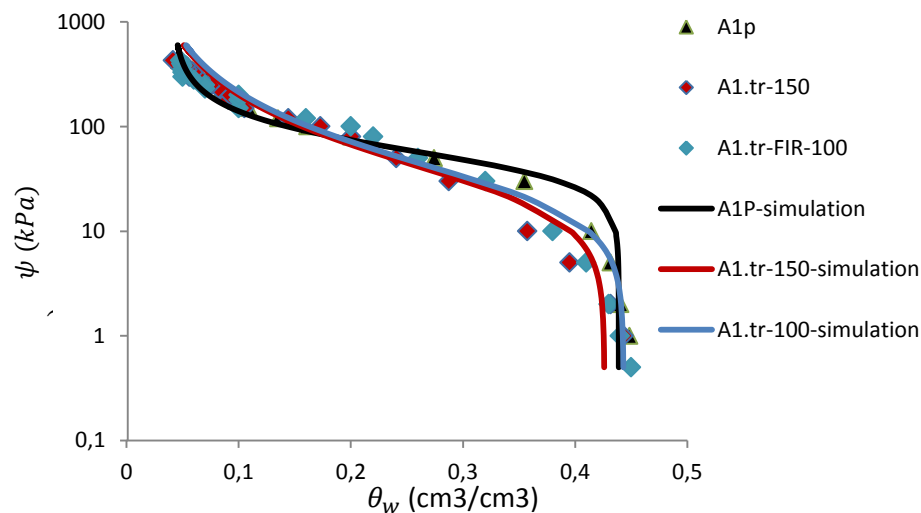


Figure 4. Comparaison de la courbe de rétention d'eau entre un sol traité et un sol non traité (A1P : sol modèle non traité ; A1.tr : sol modèle traité)

3. Conclusions

Cette étude a été consacrée à la caractérisation des propriétés hydrauliques d'un sol sableux argileux traité par un agent tensio-actif. Les essais expérimentaux effectués permettent d'analyser l'effet de la mousse sur la perméabilité et la rétention d'eau du sol. Ces deux paramètres sont affectés par la réduction du pourcentage volumique la mousse dans le sol. Cette réduction se traduit par deux mécanismes qui peuvent être combinés. Un écrasement des bulles générés sous effet de la charge appliqué sur l'échantillon et le drainage de la mousse dans le milieu poreux.

Cette étude de l'évolution des propriétés hydrauliques d'un échantillon traité par un agent tensio-actif sous les conditions de pression et contrainte appliquée valorise la maîtrise et la gestion de ces types des sols qui sont considérés comme des déchets polluants.

4. Bibliographie

- [MIL 2000] Milligan G. Lubrication and soil conditioning in tunneling, pipejacking and microtunneling. A state of the art review. Technical report, Geotechnical-consulting group, 46 pages, 2000.
- [PEN 2007] Pena Duarte M.A. Foam as a soil conditioner in tunnelling : physical and mechanical properties of conditioned sands. PhD University of Oxford, 339 pages, 2007.
- [PEI 2011] Peila D., Picchio A. Influence of chemical additives used in EPB tunneling and its management. Int. Congress on Mechanized methods vs. conventional methods of tunnel construction, Warsaw, pp. 50-72, 2011.
- [PIC 2015] Picchio A., Martinelli D., Dal Negro E., Peila D., (2015). Laboratory tests on soil conditioning of clayey soil. Acta Geotechnica, First online: 30 september 2015, pp. 1– 14.
- [LAN 2000] Langmaack L (2000) Advanced technology of soil conditioning. North American Tunnelling Congress, Boston 2000, A.A Balkema, Rotterdam, Brookfeld, 2000, p 525. ISBN: 90 5809 162 7
- [LAN 2005] Langmaack L, Feng Q (2005) Soil conditioning for EPB machines: balance of functional and ecological properties. In: Erdem, Solak (eds) Underground space use: analyses of the past and lessons for the future. ISB 04 1575 452 9. 729-735
- [PSO 2002] Psomas, S., Houlsby G.T. (2002). Soil conditioning for EPBM tunnelling: compressibility behaviour of foam/sand mixtures. In 3rd International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Toulouse, pp. 215-220.
- [MOR 2018] Mori, L., Mooney, M., Cha, M. Characterizing the influence of stress on foam conditioned sand for EPB tunneling. Tunnelling and Underground Space Technology (71) pp.454-465, 2018.
- [SEL 2016] Selmi M, Kacem M, Jamei M, Dubujet Ph (2016) Effects of an added foaming agent on hydromechanical properties of soil. Int J Environ Chem Geol Geophys Eng 10(7):773–777
- [VIN 2007] Vinai, R., Oggeri, C., Peila, D., 2007. Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research. Tunn. Undergr. Space Technol. 23 (3), 308–317.
- [BEZ 2012] Bezuijen, A., 2012. Foam used during EPB tunnelling in saturated sand, parameters determining foam consumption. In: Proceedings WTC 2012. Bangkok, Thailand, pp. 267–269.
- [THE 2010] Thewes, M., Budach, C., 2010. Soil conditioning with foam during EPB tunnelling/ Konditionierung von Lockergesteinen bei Erddruckschilden. Geomech. Tunn. 3 (3), 56–267, 2010.
- [GUI 2011] Guillermic, R.-M. Propriétés physico-chimiques des mousses : études approfondies sur des mousses modèles et exploratoires sur de nouvelles mousses. Thèse de doctorat, 2011, Université de renne 1.
- [BOR 2010] Borio, L. and Peila, D.. Study of the Permeability of Foam Conditioned Soils with Laboratory Tests . American Journal of Environmental Sciences 6 (4), 365-370, 2010.
- [EFN 2005] EFNARC. Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock, vol. 44 (April). pp. 1–45, 2005.
- [VAN 1980] Van Genuchten, M.Th. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". Soil Science Society of America Journal. 44 (5): 892–898, 1980.
- [VAN 1991] van Genuchten, F. J. Leij and S. R. Yates, The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, U.S. Salinity Laboratory U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service Riverside, Manuel, California 9250, December 1991.