

Vieillissement d'une mousse à base de tensioactif dans un sol sableux-argileux modèle

Moez Selmi^{1,2}, Mariem Kacem¹, Mehrez Jamaï², Philippe Dubujet¹

(1) Université de Lyon, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Saint-Etienne, France.

(2) National Engineering School of Tunis, Civil Engineering Department, Tunis El Manar University, Tunisia

Auteurs correspondants : moez.selmi@enise.fr; mariem.kacem@enise.fr; Philippe.dubujet@enise.fr

RÉSUMÉ

Des lubrifiants à base de tensioactif sont utilisés dans la procédure d'excavation par les tunneliers à pressions de terre (EPB). Ils permettent de fluidifier la structure du sol et d'éviter ainsi le collage de l'argile sur la tête de coupe. Les sols excavés sont généralement classés comme déchets et stockés en zones de dépôt. Une réutilisation de ce type de sol dépend de leur état après l'excavation et leurs évolutions au cours du temps. Les agents moussants se caractérisent par un vieillissement qui se traduit par une évolution de l'état physique de la mousse. Le but de cette étude est d'analyser le vieillissement d'un mousse liquide à base de tensio-actif CLB F5™ mélangée avec un sol sableux argileux. Des essais de suivi de l'évolution du volume de la mousse au cours du temps montrent une dégradation rapide des bulles qui le constituent. La dégradation physique de la mousse dans le sol prend plus de temps comparée à la mousse à l'air libre grâce à la protection des bulles dans le milieu poreux. Un essai de drainage sur colonne a été effectué afin d'identifier l'évolution de la mousse dans le mélange à travers son effet sur la pression interstitielle. Ces essais montrent que la présence de la mousse dans le sol favorise le phénomène de drainage comparé au drainage sur sol propre.

MOTS-CLÉS : tunneliers, mousse, vieillissement, essai colonne

ABSTRACT

Lubricants are used in the excavation procedure by earth pressure tunneling machines (EPBs). They help to fluidize the soil structure and thus prevent the clay from sticking to the cutting head. Excavated soil is classified as waste and stored in the disposal area. Reuse of this type of soil depends on their state after excavation and their evolution over time. To identify and understand the physical and mechanical evolution of excavated soil, a first step is to analyze physical evolution of foam on the soil. The foaming agents are characterized by aging which results in a physical modification of the foam. The aim of this study is to analyze the aging of CLB F5™ surfactant based liquid foam mixed with clayey sandy soil. The evolution of the volume of the foam over time shows a rapid degradation of the bubbles that constitute it. The physical degradation of the foam in the soil takes more time compared to the foam in the open cell thanks to the protection of bubbles by porous media. A column drainage test was performed to identify the evolution of the foam in the mixture through its effect on interstitial pressure. These tests show that the presence of the foam in the mixture promotes the drainage phenomenon compared to the case of unconditioned soil.

KEYWORDS: tunneling, foam, aging, column test

Vieillissement d'une mousse à base de tensioactif dans un sol sableux-argileux modèle

Moez Selmi, Mariem Kacem, Mehrez Jamaï, Philippe Dubujet

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 de tunneliers, des problèmes de collage de l'argile sur l'outil se produisent. Des additifs sous forme de tensio-actif sont généralement utilisés pour résoudre ces problèmes. Les mousses produites à partir de ces tensio-actifs sont composées d'une dispersion de bulles d'air dans une solution liquide. 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 (Peila *et al.*, 2016 ; Langmaack, 2000 ; Langmaack and Feng, 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 (Psomas et Houlby, 2002 ; Mori *et al.*, 2018 ; Selmi *et al.*, 2016). Mori (Mori *et al.*, 2018) a montré l'augmentation du volume d'air dans le sol traité en fonction de du taux d'injection de la mousse.

Une fois formée, une mousse ne reste pas indéfiniment statique et stable dans le temps. Elle vieillit, mise à l'épreuve par divers phénomènes qui interviennent, et qui peuvent se coupler les uns avec les autres. En dépit de cette complexité du vieillissement, on peut distinguer trois phénomènes qui déstabilisent la mousse : la coalescence, le mûrissement et le drainage (Carman, 1937 ; Koehler *et al.*, 1999 ; Cohen-Addad, 2005). La coalescence correspond à la rupture des films minces entre les bulles, aboutissant à une diminution de leur nombre, et à terme, à leur disparition. Elle témoigne de la fragilité des films. Le mûrissement résulte de la dispersion de petites bulles au profit des grosses sous l'effet de la différence de pressions. Alors que le drainage est un effet de la gravité sur le liquide constituant les films de la mousse. Celui-ci s'écoule invariablement vers le bas. Ces trois phénomènes sont liés et définissent la vitesse de stabilité des mousses liquides. Plusieurs études de la littérature se sont déjà intéressées à décrire la stabilité des mousses liquides au cours du temps (Ying *et al.*, 2018 ; Zhao *et al.*, 2018 ; Sanshez *et al.*, 2017). Mais rares sont les études qui ont été intéressées à étudier l'évolution de la mousse dans un sol. Baderna *et al.* (2015) ont

montré le caractère biodégradable de trois agents tensioactifs qui sont utilisés couramment dans la procédure d'excavation par EPB.

Ce travail s'intéresse à étudier le vieillissement de la mousse dans le sol. Des essais de mesure de l'évolution naturelle de la mousse seule et injectée dans le sol ont été effectués pour comparer l'évolution de la mousse à l'air libre et dans un système fermé. Des essais de drainage gravitaire et des mesures de l'évolution de la pression interstitielle ont été effectués dans le but de suivre l'évolution de la mousse dans le sol.

I. Matériels et méthodes

Dans le cadre de notre étude, un sol sableux-argileux modèle constitué de 60 % de sable ($D_{50} = 0,38$ mm) et du Kaolin ($D_{50} = 0,01$ mm) a été choisi pour s'adapter au type de sol pour lequel le mode de creusement par les tunneliers EPB est utilisé. Ce type de sol correspond à un sol de type AI selon la classification GTR. L'agent moussant (CLB F5™) 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 formulation de ce type de tensio-actifs comprend de l'alkyl éthoxylate de sodium (10–20 %), l'éther monobutylique du triéthylène glycol (5–10 %) et de l'eau (Baderna *et al.*, 2015). Le domaine d'application de ce type d'agent tensio-actif est défini par la norme EFNARC, 2015 (figure 1).

Les paramètres de « traitement optimal » du sol choisis (Peila and Picchio, 2011 ; Borio and Peila, 2011) ont été déterminés en utilisant l'essai de mini-cône d'Abrams avec un affaissement de 4 cm. Dans notre cas, une concentration de l'agent tensioactif est $C_f = 3$ %, un taux d'expansion de la mousse (le rapport entre le volume du gaz et le volume du liquide qui constituent la mousse) $FER = 10$ % et un taux d'injection de la mousse (le rapport du volume de la mousse et du volume de sol) $FIR = 150$ % ont été utilisés pour satisfaire cette condition.

L'essai de drainage de la mousse consiste à introduire 80 g de mousse liquide dans une éprouvette et suivre l'évolution du volume de liquide récupéré au cours du temps (figure 2).

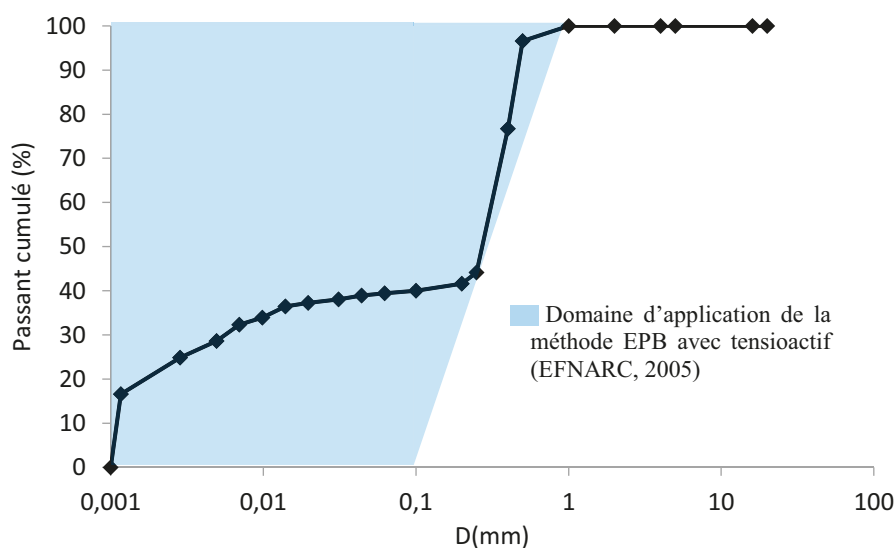


Figure 1. Distribution granulométrique du mélange choisi et domaine d'application de la méthode EPB

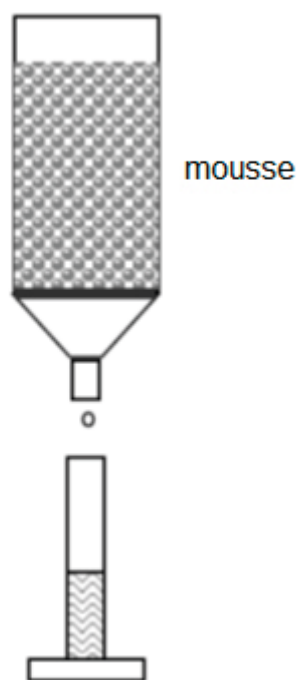


Figure 2. Essai de drainage de la mousse liquide selon (EFNAC, 2005)

Cet essai permet de déterminer le temps de demi-vie de la mousse. Ce temps correspond à la récupération de 40 ml de liquide qui correspond à 50 % du liquide continue dans la mousse (la masse volumique de la mousse est égale à celle de la masse volumique d'eau) (EFNARC, 2005).

Les essais d'évolution du volume de la mousse consistent à étudier l'évolution de la mousse seule dans une éprouvette ouverte et une autre fermée ainsi que l'évolution son évolution dans un échantillon de sol. Dans les éprouvettes, le volume de la mousse « V_t » est déduit par lecture directe à un temps t . Le rapport V_t par le volume initial de la mousse

« V_i » est calculé en fonction du temps. Dans le cas du sol, un échantillon cylindrique (diamètre 5 cm et de hauteur 5 cm) est préparé et est soumis à une charge faible de 1,3 kPa pendant 2 h afin d'assurer le tassement du sol uniquement sous son propre poids et d'éviter le tassement dû à la dégradation des bulles. Le volume de la porosité est considéré égal à V_i . Le comparateur de déplacement permet par la suite de mesurer la variation du volume due à la dégradation de la mousse.

L'essai de lessivage sur la colonne consiste à analyser l'évolution de la pression inertielle au cours du drainage de la mousse. Le dispositif est composé d'une colonne de 9,2 cm de diamètre intérieur et de 1 m de hauteur, dans laquelle des tensiomètres T5 (Sols Mesures) ont été installés aux niveaux de -4 cm, -41 cm et -79 cm (figure 3). Ces capteurs de pression mesurent les suctions positives créées au cours du temps sous l'effet du phénomène de drainage gravitaire de l'eau dans le milieu poreux. L'échantillon de sol traité présente une teneur en eau de 23 %, qui reste inférieure à la teneur en eau de saturation ($w_s = 28,5 \%$). Les pressions mesurées dans le cas du sol traité montrent l'effet de la mousse sur la désaturation du sol suite à l'évolution de stabilité de la mousse au cours du temps.

2. Résultats et discussion

L'essai de drainage réalisé sur la mousse liquide montre un temps de demi-vie égale à 21 min (figure 4). Ce temps de demi-vie montre l'évolution rapide de la mousse. Le phénomène de drainage dans le sol va forcément être différent du drainage de la mousse seule grâce à la perméabilité faible qui caractérise le sol. Cette perméabilité est égale à $3,32 \cdot 10^{-9}$ m/s dans le cas du sol non traité et plus faible de l'ordre de $5 \cdot 10^{-11}$ m/s pour le cas du sol traité (Selmi et al, 2016).

Le suivi de l'évolution du volume de la mousse seule ou mélangée avec le sol décrit la dégradation physique de celle-ci. Cette

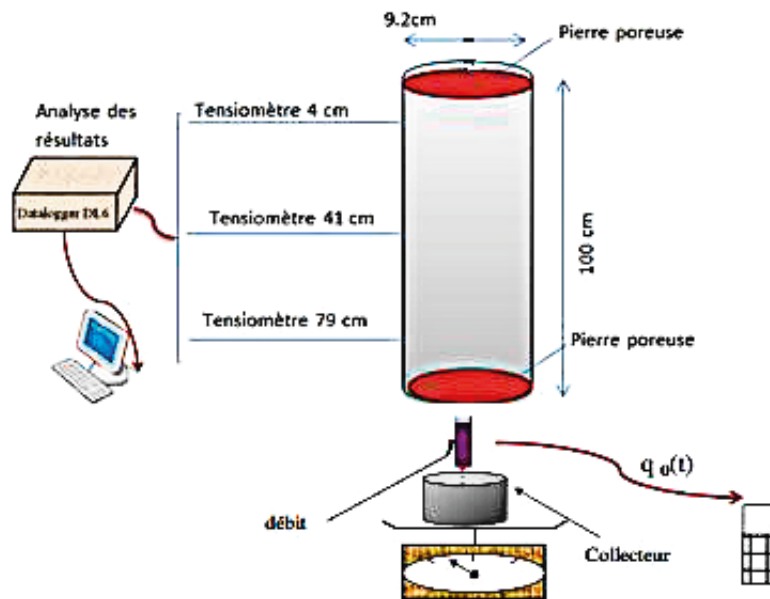


Figure 3. Dispositif expérimentale de l'essai en colonne

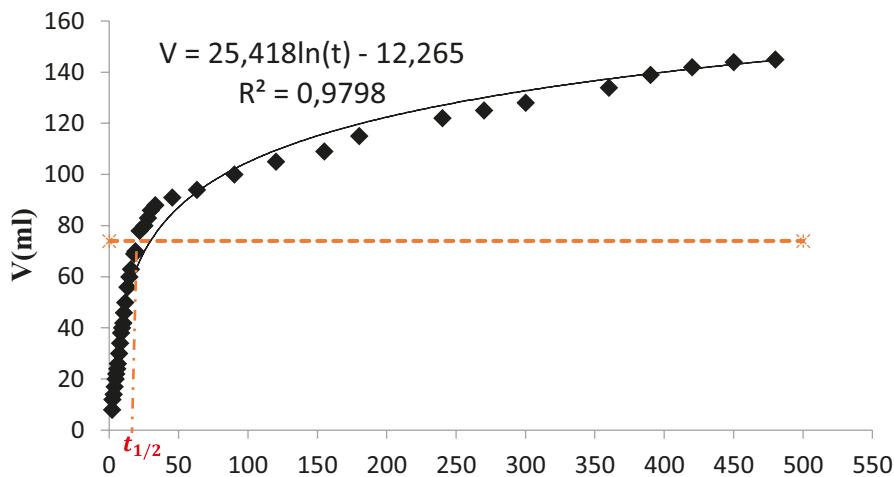


Figure 4. Evolution du drainage de la mousse liquide repense

dégradation se traduit par un écrasement progressif des bulles qui constitue la mousse au cours de son vieillissement. La figure 5 montre la variation du volume de la mousse au cours du temps. Les essais montrent une allure de variation similaire du volume de la mousse dans les deux conditions mousse dans le sol et mousse dans une éprouvette ouverte. La dégradation complète dans le premier cas nécessite sept jours. Alors que dans le cas où la mousse est exposée à l'air libre (éprouvette ouverte) la dégradation complète nécessite 6 h. Cette différence est due au phénomène d'évaporation du film entourant les bulles et en contact avec l'air dans le cas de l'éprouvette ouverte ce qui accélère la dégradation. Le milieu poreux constitue ainsi un système fermé dans lequel la mousse évolue. Quatre zones sont identifiées sur ces courbes :

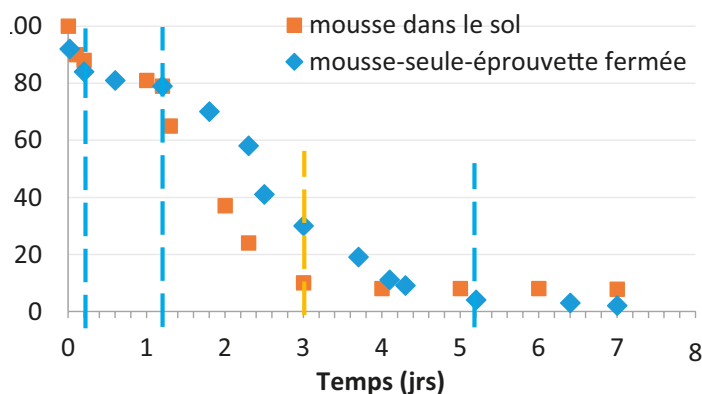
- zone 1 entre 0 et 0,2 jrs caractérisée par une diminution importante du volume de la mousse (entre 12 et 16 % en 0,2 jrs) ; cette variation est due au phénomène de drainage qui évolue rapidement au cours du

temps dans le cas de mousse seul (figure 6.a). Dans le sol, l'écrasement des bulles d'air qui les constituent est due aux interactions des bulles de gaz avec les particules solides ainsi que le poids propres de l'échantillon du sol traité ;

- zone 2 entre 0,2 jrs et 1,2 jrs une stabilisation du volume pendant 24 h ; cette stabilisation peut être due aux phénomènes de coalescence et murissement de la mousse qui permettent l'augmentation de la taille des bulles avant leurs écrasement ;
- zone 3 entre 1,2 jrs et 5 jrs pour la mousse seule et entre 1,2 et 3 jrs pour l'échantillon mousse + sol ou le volume diminue d'une manière importante. Dans cette zone la vitesse de dégradation de la mousse est plus importante pour l'échantillon mousse + sol par rapport à l'échantillon mousse seule (respectivement 70 % et 40 % en 1,8 jrs). En effet le phénomène de

drainage dans le sol est beaucoup moins rapide grâce à l'imperméabilité du sol traité. Les bulles de la mousse sont protégées par les particules d'argile dans le milieu poreux. Une augmentation de taille des bulles et une redistribution dans le milieu poreux peuvent être observées au bout de quelques jours (figure 6.b).

- zone 4 (après 3 jrs pour sol + mousse et après 5 jrs pour mousse seule) où le volume de la mousse diminue



avec une vitesse faible ; la tendance s'inverse à 4 jours, le volume des bulles dans le sol se dégrade d'une manière moins importante que pour la mousse seule. La présence du milieu poreux retarde la dégradation.

Cette stabilité physique de la mousse au cours du temps est accompagnée par la dégradation chimique de la molécule du tensio-actif. Des essais de caractérisation chimique à partir

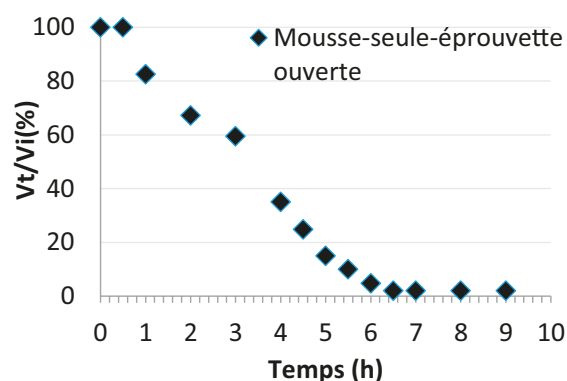


Figure 5. Evolution volumique de la mousse au cours du temps : (a) dans une éprouvette fermée et dans le sol, (b) dans une éprouvette ouverte

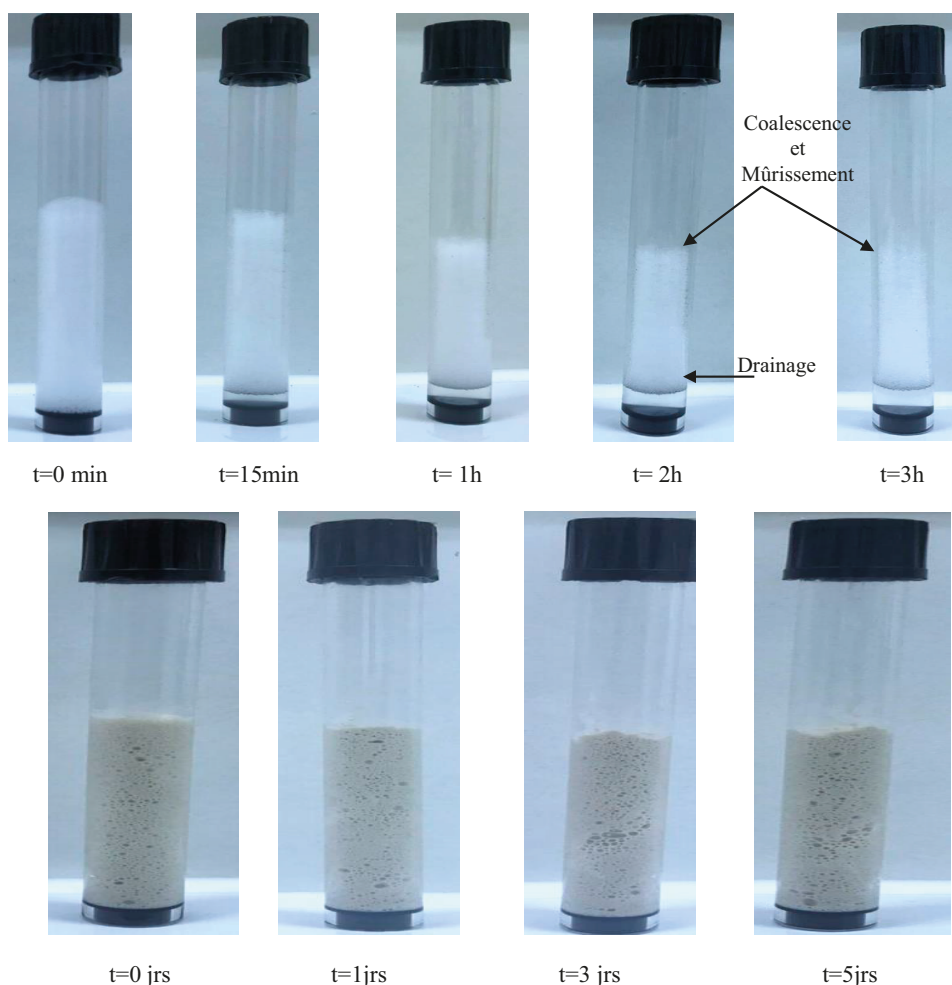


Figure 6. Illustration de l'évolution de la structure de la mousse seul et dans le sol au court du temps : a. Evolution à court terme de la structure de la mousse liquide. b. Evolution à long terme de la structure du sol traité

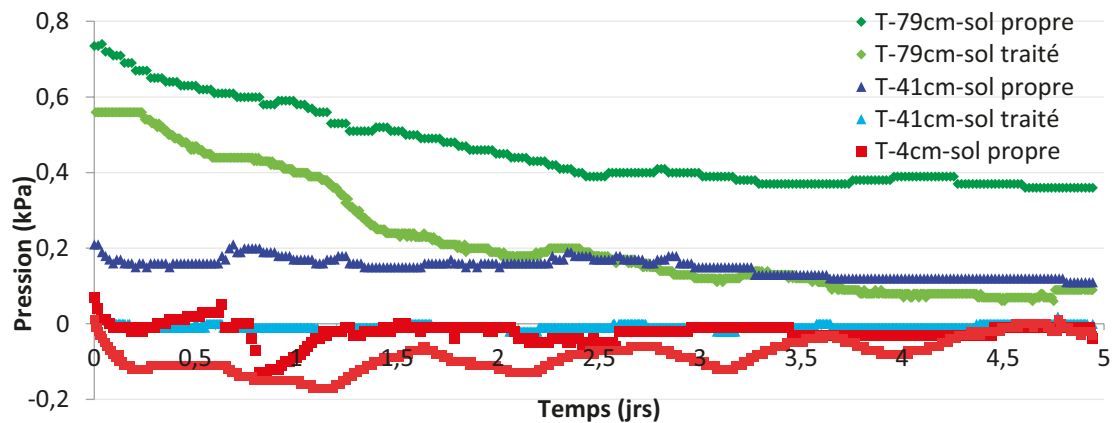


Figure 7. Variation de la pression dans la colonne du sol traité et sol propre

une analyse HPLC (chromatographie en phase liquide à haute performance) réalisés par Baderna (Baderna et al., 2015) sur ce type de mousse montrent leur dégradation au cours de quelques jours. L'évolution de la dégradation des constituants chimiques de ces mousses présente la même allure que l'évolution des phénomènes qui caractérisent la stabilité physique de la mousse (drainage, coalescence et murissement) (Baderna et al., 2015).

L'évolution de la pression interstitielle dans la colonne du mélange sol-mousse au cours du temps montre une instabilité de la pression mesurée avec les tensiomètres. Cette instabilité est due au mouvement des bulles de la mousse dans le mélange. La mousse peut être en contact avec les tensiomètres au niveau de la partie film ou de la partie air. Les pressions à différents niveaux de l'échantillon montrent des pressions interstitielles dans le mélange traité inférieures à celles dans le sol propre (figure 7). Ce qui montre une désaturation plus rapide du mélange sol mousse comparé au sol non traité. La vitesse de désaturation due au drainage dans le mélange sol mousse est plus rapide que celle du sol propre. Ceci est dû au phénomène de drainage qui caractérise les mousses liquides et qui est additionné au drainage gravitaire de l'eau.

On remarque au niveau -79 cm, une diminution de la pression jusqu'à devenir constante au passage de l'état quasi saturé à l'état non saturé. Au niveau -41 cm et au niveau -4 cm, le sol passe rapidement à un état de non saturation avec une légère variation de la pression interstitielle pour les deux niveaux. Ceci peut être expliqué par le fait que la partie supérieure de la colonne est moins affectée par le drainage comparé de la partie inférieure.

Conclusion

Cette étude a été consacrée à la caractérisation de l'évolution de vieillissement de la mousse dans un sol sableux argileux modèle traité par un agent tensio-actif. Les essais de suivi de l'évolution du volume de la mousse au cours du temps

montrent une dégradation des bulles qui le constitue. Elle prend plus de temps lorsque la mousse est dans le sol comparé la dégradation de la mousse à l'air libre. Ceci est dû à la protection des bulles par le milieu preux. L'essai de lessivage sur colonne montre que la présence de la mousse favorise le drainage. Ce travail montre que dans les conditions de nos expériences les bulles se dégradent dans le sol et le système passe d'un état quasi-saturé à un état non saturé au bout de quelques jours.

Références bibliographiques

- Baderna D., Lomazzi E., Passoni A., Pogliaghi A., Petoumenou M. I., Bagnati R., Lodi M., Viagrenco A., Sforzini S., Benfenati E., Fanelli, R. (2015). Chemical characterization and ecotoxicity of three soil foaming agents used in mechanized tunneling. *Journal of hazardous materials*, 296, pp. 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.04.040>
- Balerin C., Aymard P., Ducept F., Vaslin S., Cuvelier G. (2007). Effect of formulation and processing factors on the properties of liquid food foams. *Journal of Food Engineering*, 78(7), pp. 802-809. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.11.021>
- Borio L., Peila D. (2010). Study of the Permeability of Foam Conditioned Soils with Laboratory Tests. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(4), pp. 365-370. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2010.365.370>
- Carman P.C. (1937). Fluid flow through granular beds. *Transaction of the American Institute of Chemical Engineers*, 15, pp. 150-166.
- Cohen-Addad S., Höhler R. (2005). Rheology of liquid foam. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17(41), R1041-R1069.
- Delgado-Sánchez C., Fierro V., Li S., Pasc A., Pizzi A., Celzard A. (2017). Stability analysis of tannin-based foams using multiple light-scattering measurements. *European Polymer Journal*, 87, pp. 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.12.036>

EFNARC (2005). Specification and guidelines for the use of the specialist products for Mechanised tunneling (TBM) in soft ground and hard rock. <http://www.efnarc.org/pdf/TBMGuidelinesApril05.pdf>

Koehler S.A., Hilgenfeldt S., Stone, H.A. (1999.) Liquid Flow through Aqueous Foams: The Node-Dominated Foam Drainage Equation. *Physical review letters*, 82(21), p. 4232. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.82.4232>

Langmaack L. (2000). Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling. *Proceedings of North American tunneling*, Boston, pp. 525-542.

Langmaack L., Feng Q. (2005). Soil conditioning for EPB machines: balance of functional and ecological properties. In *Underground space use: analyses of the past and lessons for the future. Two Volume Set*, Erdem, Solak (eds). <https://doi.org/10.1201/noc0415374521>

Milligan G. (2000). Lubrication and soil conditioning in tunneling, pipejacking and microtunneling. A state of the art review. Technical report, Geotechnical-consulting group, 46 p.

Mori L., Mooney M., Cha M. (2018). Characterizing the influence of stress on foam conditioned sand for EPB tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, pp. 454-465. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.09.018>

Peila D., Picchio A. (2011). 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.

Peila D., Picchio A., Martinelli D., Dal Negro E. (2016). Laboratory tests on soil conditioning of clayey soil. *Acta Geotechnica*, 11(5), pp. 1061-1074.

Peng Y.Y., Lu F., Tong Q.X. (2018). One-step synthesis, wettability and foaming properties of high-performance non-ionic hydro-fluorocarbon hybrid surfactants. *Applied Surface Science*, 433, pp. 264–270. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.012>

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*, Kastner, Emeriault, Dias, Guilloux (Eds), Lyon, pp. 215-220.

Rakowska J., Radwan K., Porycka B., Prochaska K. (2017). Experimental study on surface activity of surfactants on their ability to cleaning oil contaminations. *Journal of cleaner production*, 144, pp. 437-447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.158>

Selmi M., Kacem M., Jamei M., Dubujet P. (2016). Effects of an Added Foaming Agent on Hydro-Mechanical Properties of Soil. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 10(7), pp. 805-809.

Zhao W., Che, W., Zhao K. (2018). Laboratory test on foamed concrete-rock joints in direct shear. *Construction and Building Materials*, 173, pp. 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.006>

