

Analyse du comportement du sol réel traité, excavé par tunnelier à pression de terre

Analysis of real conditioned soil behavior excavated by Earth Pressure Balance Machine

Nour EL SOUWAISSI^{1,2}, Irini DJERAN-MAIGRE¹, Laurence BOULANGE², Jean-Luc TROTTIN²

¹ Univ Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, F-69621 Villeurbanne, France
nour.elsouwaissi@insa-lyon.fr, irini.djeran-maigre@insa-lyon.fr

² Eiffage Génie Civil Travaux Souterrains, 78140 Vélizy-Villacoubay, France
*nour.elsouwaissi@eiffage.com, laurence.boulangue@eiffage.com,
jean-luc.trottin@eiffage.com*

RÉSUMÉ – Pour le bon fonctionnement d'un tunnelier à pression de terre, dans différents types de terrains, des agents moussants sont mélangés au sol à excaver. Dans ce travail, l'impact direct de la mousse sur le comportement mécanique du sol est étudié. De plus, l'analyse de l'évolution des paramètres mécaniques du mélange sol/mousse, en fonction de la dégradation de la mousse, est présentée.

ABSTRACT – For an optimized excavation by an Earth Pressure Balance Machine, in different types of soils, foaming agents are mixed with the soil. In this work, the direct impact of the foam on the mechanical behavior of the treated soil is studied. In addition, the variation of the mechanical parameters of the soil/foam mixture, due to foam degradation, as a function of time, is also presented.

1. Introduction

Le Tunnelier à Pression de Terre, (EPBM Earth Pressure Balance Machine en anglais) permet une technique innovante de creusement de tunnel, initiée au cours de l'année 1974, par les Japonais (Quebaud, 1996). Le principe de fonctionnement est basé sur la capacité du sol excavé, présent dans la chambre d'excavation située derrière la roue de coupe, d'exercer une pression de soutènement qui équilibre les contraintes du terrain au front de taille du tunnelier (Psomas, 2001).

Comme mentionné par Milligan (2000), cette technique d'excavation par tunnelier à pression de terre a été initialement utilisée pour excaver les argiles molles, les limons et les sables fins. De nos jours, le domaine d'utilisation du tunnelier à pression de terre a été étendu au creusement des sols très argileux ou grenus (sable et gravier).

Pour élargir la gamme des sols pouvant être excavée, par un tunnelier à pression de terre, l'effet des additifs chimiques sur l'avancement du tunnelier présente une importance primordiale. Des agents moussants (agents de conditionnement ou additifs) ont commencé à être ajoutés aux sols à excaver de différentes constitutions, afin d'altérer leur caractéristiques mécaniques et physiques, facilitant ainsi leur creusement. Ces additifs, modifient les propriétés hydromécaniques du sol lui conférant une texture pâteuse compressible ayant une faible perméabilité, répondant ainsi aux exigences d'excavation à l'aide du tunnelier à pression de terre.

Afin de fixer les paramètres du traitement adéquats, qui inclut le choix d'additif et la détermination des quantités optimales à ajouter au sol, la réalisation des différents essais sur l'additif seul et sur le sol traité, s'avère indispensable.

Par exemple, Djeran-Maigre et al. (2018) et Thewes et al. (2010) explorent les mécanismes de dégradation physique de la mousse et mesurent le temps de drainage de celle-ci respectivement. Psomas (2001), Pedraza et al. (2015) et Djeran-Maigre et al.

(2018) ont travaillé sur des sols modèles, reconstitués au laboratoire, afin de s'affranchir des problèmes d'hétérogénéité des sols réels et afin de conduire des essais reproductibles.

Après la recherche du bon choix de l'agent mousse et de ces quantités optimales qui offrent des conditions d'excavations favorables, il faut se préoccuper du devenir des grands volumes des sols traités excavés considérés actuellement comme des déchets stockés dans les centres de stockage.

Des articles peu nombreux, (Djeran-Maigre et al. (2018) ; Pedraza et al. (2015)) présentent des études d'évolution des paramètres hydromécaniques des sols traités (sols modèles) en fonction du temps, dans le but d'identifier la durée du vieillissement de la mousse, ce qui permet de recouvrir les paramètres initiaux du sol non traité. Des filières de valorisation adéquates peuvent être ainsi proposées pour ces sols traités.

Cet article présente les essais réalisés sur l'additif seul qui est une mousse, ainsi que les essais mécaniques réalisés sur le sol traité avec la mousse. Les résultats des essais permettent d'étudier la qualité de la mousse et d'analyser son effet sur le sol lors du traitement ainsi qu'en fonction du temps.

2. Matériaux

Le traitement d'un sol avec un agent moussant nécessite de choisir le bon additif en fonction du sol à excaver. Le choix d'additif est basé sur le type de sol rencontré au chantier. La caractérisation approfondie du sol et la connaissance des caractéristiques de la mousse sont donc indispensables pour produire le mélange de sol traité le plus adéquat pour l'excavation.

2.1. Sol

Des échantillons du sol (réel mais enrichi par un coulis) sont prélevés du chantier de l'extension de la ligne 14 du métro parisien (projet du Grand Paris Express), à environ 17 m de profondeur ayant une teneur en eau d'environ 21%. D'après les essais d'identification, ce sol est classifié en tant que B2, sable argileux. Ce sol enrichi sera, de plus, traité à l'aide d'un agent moussant au sein du laboratoire.

2.2. Additif : mousse tensioactive

L'additif utilisé dans ce travail est une mousse. Elle est formée d'un liquide (eau), du gaz et d'un agent tensioactif. Les agents tensioactifs (surfactants) stabilisent les bulles d'air en les transformant en cellule de mousse.

Guillermic (2011) a décrit en détail l'interaction chimique de la mousse et du tensioactif. Un tensioactif, surfactant, ou encore agent de surface, il est l'ensemble des molécules modifiant les propriétés des interfaces. Ces composés sont qualifiés d'amphiphiles : les molécules comportent une partie hydrophile (ayant une affinité pour l'eau) et une autre hydrophobe (sans affinité pour l'eau). Ces molécules s'adsorbent aux interfaces fluides (liquide/gaz ou liquide/liquide). A partir de la saturation en tensioactifs de la surface du liquide, les molécules s'assemblent en micelles, de manière à minimiser le contact des parties hydrophobes avec l'eau (figure 1).

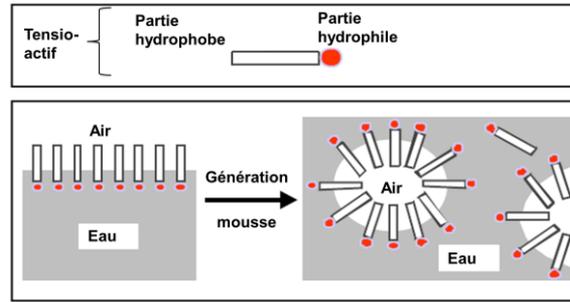


Figure 1 : Génération de mousse à partir d'un tensioactif – (Langmaack, 2000)

2.3. Mélange sol/mousse

La génération de la mousse et la production du mélange sol/mousse doit suivre des étapes particulières, définies par des paramètres décrits dans la littérature (Quebaud, 1996 ; Langmaack, 2000 ; EFNARC, 2005) (figure 2) :

Dosage de surfactant C_f (%)

$$C_f = \frac{\text{masse du tensioactif (surfactant) dans la solution moussante}}{\text{masse de la solution moussante}} \quad (1)$$

Le C_f représente la quantité du tensioactif dans la mousse.

Taux d'expansion de la mousse FER

$$FER = \frac{\text{volume de la mousse}}{\text{volume de la solution moussante}} \quad (2)$$

Le FER caractérise la quantité d'air injectée dans la solution moussante qui forme la mousse.

Taux d'injection de la mousse FIR (%)

$$FIR = \frac{\text{volume de la mousse}}{\text{volume de sol in situ à excaver}} \quad (3)$$

Le FIR exprime la quantité (volume) de mousse injectée au niveau de la roue de coupe, dans la chambre d'excavation et/ou dans la vis d'extraction. C'est un indicateur du volume de mousse utilisé par 1 m³ de sol.

Dans ce travail expérimental, le sol est mélangé à la mousse, à l'aide d'un malaxeur, avec les proportions suivantes : $C_f = 2,5 \%$ – $FER = 12$ – $FIR = 65 \%$, qui correspondent à l'excavation optimisée du sol du chantier de la ligne 14.

3. Comportement de l'additif

La mousse est générée avec les paramètres $C_f = 2,5 \%$ et $FER = 12$, à l'aide d'un agitateur mécanique, comme indiqué précédemment. La mousse ne reste pas stable au cours du temps, mais elle se dégrade. La mesure de sa dégradation physique est faite par la variation de son volume en fonction du temps et par sa stabilité suite au drainage.

Dans le but d'avoir plus d'informations sur le comportement de la mousse, des essais rhéologiques sont également réalisés.



Figure 2 : Schéma descriptif des étapes de la génération du mélange sol/mousse

3.1. Dégradation de la mousse

Guillermic (2011) a décrit la dégradation de la mousse en la liant à la destruction des bulles d'air. Les bulles grossissent au cours du temps (mûrissement). A cause de la gravité, le liquide s'écoule du haut vers le bas (drainage). Lorsque les films localisés entre les bulles sont très minces, ils se brisent, les bulles s'effondrent et la mousse occupe un volume moindre (collapse).

Diminution du volume de la mousse

La dégradation du volume de la mousse en fonction du temps est mesurée à l'aide d'une éprouvette graduée de 2000 ml. La mousse ne se dégrade pas instantanément, sa densité diminue petit à petit en fonction du temps (figure 3a). Lors de sa dégradation deux phases une dense et une autre bien moins dense sont observées. A l'aide du volume mesuré de la partie dense, la variation du volume de la mousse, normalisé par son volume initial, est tracé durant 24h (figure 3b).

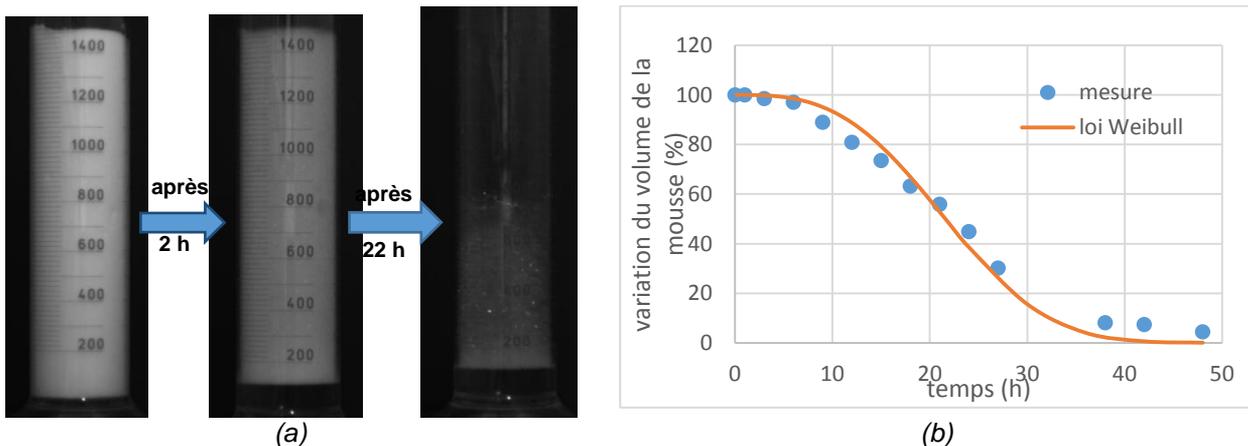


Figure 3 : Variation du volume de la mousse en fonction du temps a) photographies de la variation b) graphe du pourcentage de variation de volume de la mousse en fonction du temps

La dégradation du volume de la mousse suit la loi de Weibull:

$$f(t) = \exp [(-\lambda t)^\beta] \text{ avec les paramètres } \beta = 3 ; \lambda = 0.041$$

Cette loi nous permet de calculer la demi-vie de la mousse par la relation temporelle suivante : $t_{(\frac{1}{2})} = (\ln 2)^{1/\beta} / \lambda$ ce qui donne une demi-vie égale à 22 h, pour la mousse étudiée.

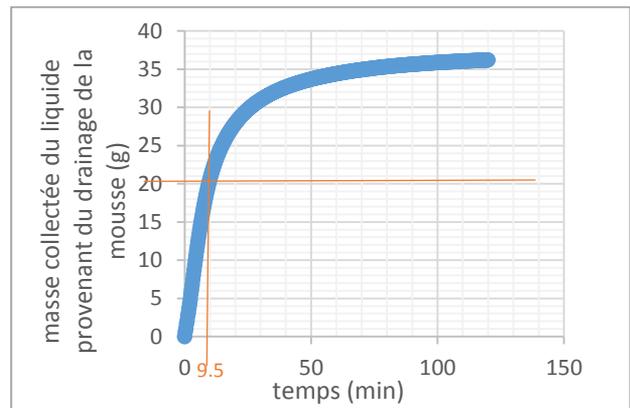
Cette demi-vie est inférieure à celle obtenue par Djeran-Maigre et al. 2018 ; ces auteurs ont utilisé une concentration de l'agent moussant C_f plus élevée (=3%) avec un FER plus faible (=10), ce qui produit une mousse plus concentrée en tensioactifs et donc plus stable. Cette observation est corroborée par les résultats de Peña Duarte (2007).

Stabilité de la mousse par drainage

La mousse avec les mêmes paramètres de génération est filtrée afin d'étudier sa stabilité (EFNARC, 2005). Une masse de 40 g de mousse est placée dans un entonnoir filtrant fixé sur un trépied (figure 4a). Une bouteille graduée sous l'entonnoir et placée sur une balance enregistre la masse collectée du liquide provenant du drainage de la mousse. Le temps de drainage nécessaire pour collecter 50% de la masse totale de la mousse (dans notre cas, égale à 20 ml) est de 9,5 min, valeur proche de celle mesurée par Thewes et al. (2010).



(a)



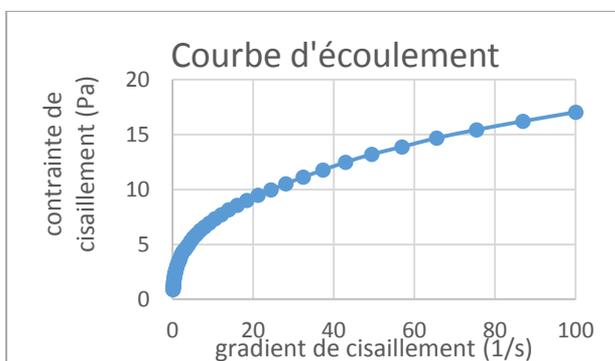
(b)

Figure 4 : Mesure de la stabilité de la mousse : a) entonnoir filtrant rempli de la mousse b) drainage de la mousse en fonction du temps.

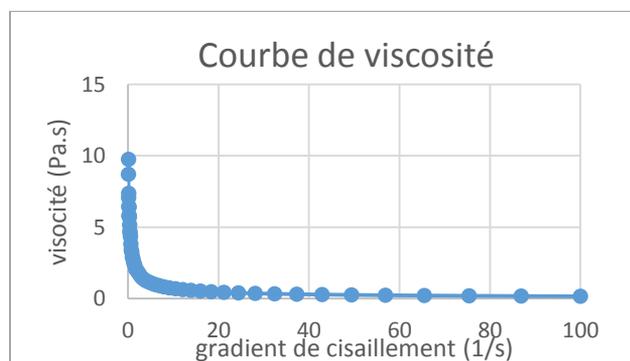
3.2. Rhéologie de la mousse

La rhéologie permet de décrire et d'analyser les propriétés de déformation et d'écoulement des matériaux (Galli, 2016 ; Özarmut, 2018). Le comportement rhéologique de la mousse est analysé à l'aide d'un rhéomètre Anton Paar MCR52 en utilisant le système de mesure cylindre concentrique CC27. La mousse est générée avec les mêmes paramètres de C_f et de FER que précédemment et elle placée délicatement dans le cylindre du rhéomètre. Un gradient de cisaillement de 0.1 à 100 s^{-1} est appliqué.

D'après les courbes d'écoulement et de viscosité, la contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation du gradient de cisaillement (figure 5a). Tandis que la viscosité diminue quand le gradient de cisaillement augmente (figure 5b). Ainsi, le comportement rhéologique de la mousse s'apparente à un comportement de fluidification par cisaillement ; la mousse devient de plus en plus fluide lorsque la vitesse de rotation augmente.



(a)



(b)

Figure 5 : Comportement rhéologique de la mousse : a) courbe d'écoulement, b) courbe de viscosité

4. Effet de la mousse sur le sol à court et long termes

Dans un tunnelier à pression de terre, la mousse sera mélangée avec le sol aux différentes parties du tunnelier : roue de coupe, chambre d'excavation et/ou vis d'extraction. Le but de ce traitement est d'obtenir un mélange homogène et compressible, de perméabilité réduite, de frottement interne réduit et de faible potentiel de colmatage.

Les essais géotechniques standards comme les essais de compressibilité et les essais de résistance à la rupture, réalisés avant et après le traitement du sol, permettent de mettre en évidence l'effet de la mousse sur le comportement du sol. Le comportement du sol traité évolue avec la dégradation de la mousse, présentée au paragraphe précédent. Afin de connaître l'effet de la mousse sur le sol traité à long terme, les essais géotechniques sont répétés à plusieurs jours d'intervalle, ce qui permet de vérifier si le sol recouvre ses caractéristiques initiales et devient apte à être valorisé.

Les résultats à court terme sont ceux du jour 0 ; jour du traitement du sol avec mousse. Les résultats à long terme couvrent des temps allant du jour 1 au jour 26 correspondant à l'âge du traitement du sol avec la mousse.

Compressibilité du sol traité

Des essais œdométriques réalisés sur des échantillons du sol, avant et après le traitement avec mousse, sont menés à différents âges du sol traité et sont finalisés en 24h. Cela permet de connaître l'évolution de la compressibilité du mélange en fonction du temps. Ces échantillons ont 70 mm de diamètre et 20 mm d'hauteur.

L'indice des vides du sol traité avec la mousse augmente immédiatement, ce qui est recherché (jour 0 – figure 6a). En fonction du temps, l'indice des vides diminue (jours 1 à 23 – figure 6a) et atteint une valeur proche de l'état initial non traité. De même, le sol traité devient moins compressible lorsque la mousse vieillit. Sur la figure 6b, on peut remarquer que les variations du tassement du sol traité pour un palier donné (54 kPa p.e.) sont bien ordonnées en fonction du temps. Ce résultat est attendu puisque le mélange du sol avec la mousse piège des bulles d'air. Avec le temps, les bulles se réduisent en dimension, ce qui donne pour le sol traité, un indice des vides réduit.

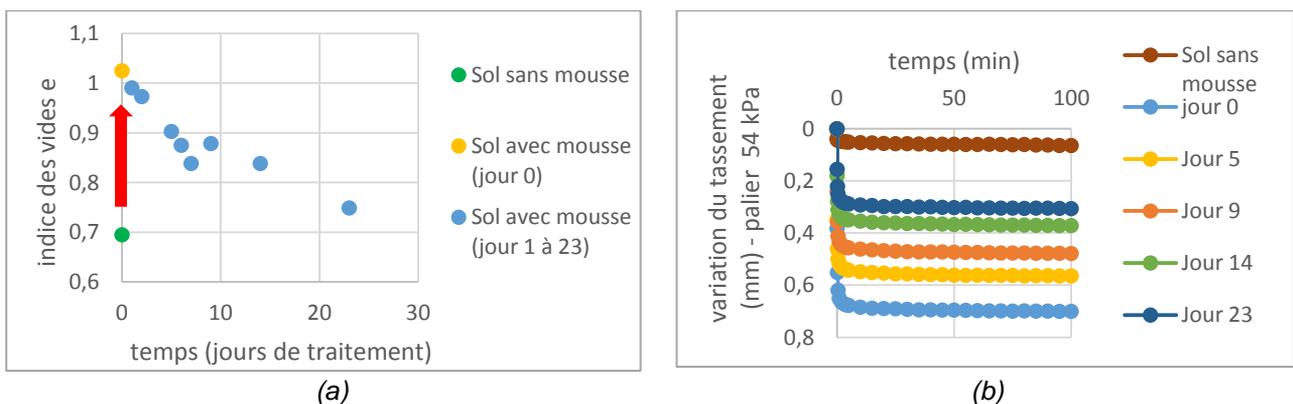


Figure 6 : Compressibilité du sol traité : a) évolution de l'indice des vides initial, b) variation du tassement pour le palier 54 kPa, en fonction des jours de traitement du sol avec la mousse

Résistance à la rupture du sol traité

Afin d'étudier l'évolution de la cohésion et de l'angle de frottement interne du mélange sol/mousse, des essais de cisaillement rectiligne sont conduits sur le sol de référence, ainsi que sur celui traité par la mousse.

Les différentes lignes intrinsèques sur le plan Mohr-Coulomb coïncident (figure 7), ce qui montre le faible effet du traitement sur les caractéristiques de rupture du sol traité.

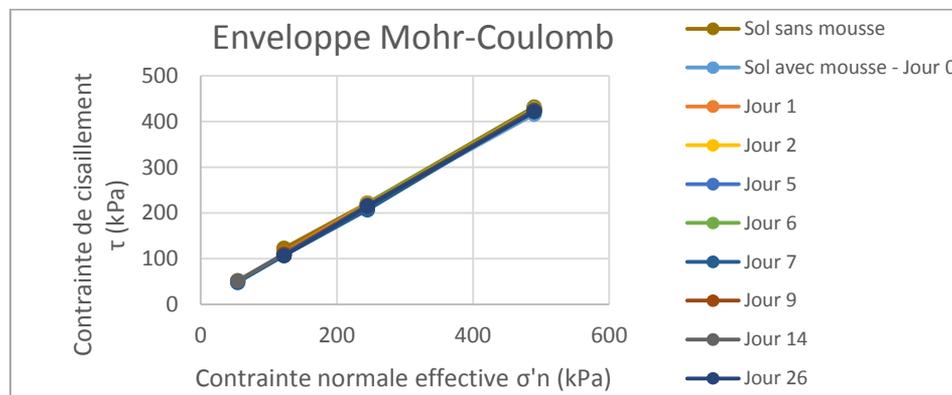


Figure 7 : Critère de rupture de Mohr-Coulomb pour le sol non traité et traité en différents temps

D'après ces courbes, l'effet de la mousse sur la cohésion et l'angle de frottement interne du sol est analysé (figure 8).

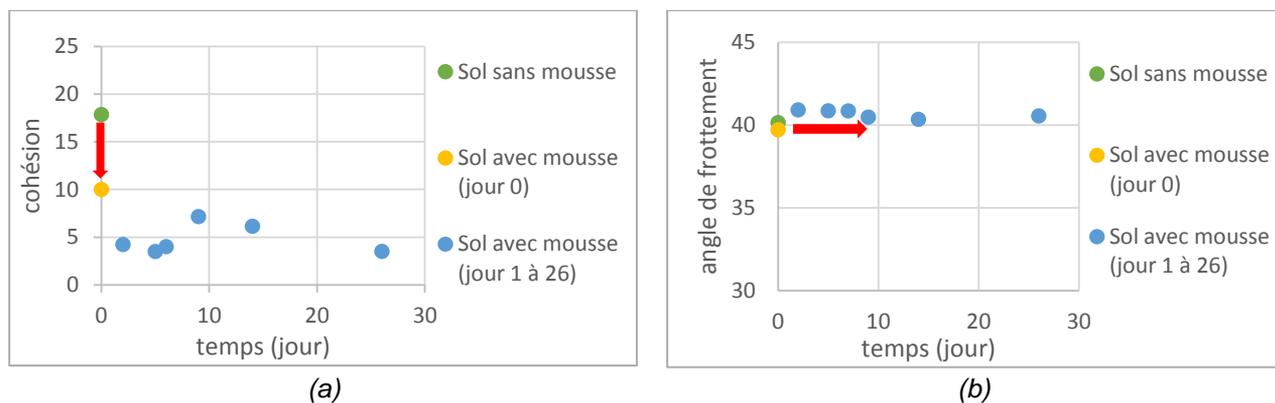


Figure 8 : Effet de la mousse à court et long termes sur les paramètres de rupture du sol traité: a) la cohésion, b) l'angle de frottement.

Les résultats montrent que la cohésion du sol diminue lors de l'ajout de la mousse et reste toujours inférieure à la cohésion initiale du sol non traité (figure 8a). L'angle de frottement quant à lui semble non affecté par le traitement du sol (figure 8b). Cette non variation de l'angle de frottement du sol traité, peut être attribuée à la présence du coulis stabilisateur, dans le sol utilisé.

5. Conclusion

Les résultats du comportement mécanique du sol réel traité montrent une dispersion forcément plus importante comparée à la dispersion des résultats d'un sol modèle reconstitué traité, compte tenu de l'hétérogénéité naturelle du sol réel. Travailler avec le sol réel provenant du chantier est pourtant le seul moyen pour mener des comparaisons valables entre les résultats expérimentaux du laboratoire et les résultats enregistrés au chantier.

Les objectifs atteints de ce travail se résument comme suit : (i) explorer le comportement de la mousse seule (ii) étudier l'effet de la mousse à court terme sur le comportement mécanique du sol réel et (iii) analyser l'évolution des paramètres mécaniques du sol traité, en fonction de la dégradation de la mousse, à long terme.

S'agissant du comportement de la mousse, on peut conclure que :

- la mousse ne reste pas stable en fonction du temps, elle se dégrade. Cette dégradation est mesurée par la diminution de son volume en fonction du temps, qui suit la loi Weibull, et par la mesure du temps de drainage ;

- son comportement rhéologique s'apparente à un comportement de fluidification par cisaillement.

Concernant les résultats des essais mécaniques du sol traité, on peut déduire que :

- l'indice des vides initial augmente lors du traitement du sol avec la mousse ce qui est attendu et dû à l'injection des bulles d'air dans le sol. Les bulles d'air se réduisent en taille, ce qui a comme effet la diminution de la valeur de l'indice des vides en fonction du temps, mesurée à l'aide d'essais œdométriques, à différents temps de traitement ;
- concernant les paramètres de la résistance à la rupture : la cohésion diminue lors de l'injection de la mousse (jour 0), ce qui est l'objectif du traitement. De plus, cette cohésion (jour 1 à jour 23) reste toujours inférieure à celle du sol à son état initial avant traitement. Contrairement à la cohésion, l'angle de frottement interne n'évolue pas, ni au début du traitement, ni dans le temps, ce qui est peut-être dû à un effet résiduel du coulis.

Références bibliographiques

- Djeran-Maigre, I., Dubujet, P. and Vogel, TM., 2018. Variation over time of excavated soil properties treated with surfactants, *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, 3, n° 67.
- EFNARC (ed.) 2005. Specifications and guidelines for the use of specialist products for mechanized tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock. 40 p.
- Galli M., 2016. Rheological characterisation of Earth-Pressure-Balance (EPB) support medium composed of non-cohesive soils and foam. *PhD thesis*, Ruhr-University Bochum, Germany, 383 p.
- Guillermic R.M., 2011. Propriétés physico-chimiques des mousses : Études approfondies sur des mousses modèles et études exploratoires sur de nouvelles mousses. *PhD thesis*, Université de Rennes, Rennes, France, 213 p.
- Langmaack, L., 2000. Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling. *North American Tunneling Conf. on Underground Construction*, Boston 525–542.
- Milligan, G.W.E., 2000. Lubrication and soil conditioning in tunnelling, pipe jacking and micro-tunnelling: a state-of-the-art review. Geotechnical Consulting Group, London, 46 p.
- Özarmut, A. Ö., 2018. Rheological investigation of particle-foam mixtures. *PhD thesis*, Ruhr-University Bochum, Germany, 383 p.
- Pedraza, A., Selmi, M., Mesticou, Z., Dubujet, P., Kacem, M. and Murillo, C., 2015. Temporal analysis of side effects produced by foam agents in the soil excavated with Earth Pressure Balance (EPB), *Proceeding paper: From fundamentals to applications in geotechnics*, 712-721.
- Peña Duarte, M.A., 2007. Foam as a soil conditioner in tunnelling: physical and mechanical properties of conditioned sands. PhD thesis, University of Oxford, UK, 339 p.
- Psomas, S., 2001. Properties of foam/sand mixtures for tunneling applications. *Master's thesis*, University of Oxford, Oxford, UK, 150 p.
- Quebaud, S., 1996, Contribution à l'étude du percement de galeries par boucliers à pression de terre : amélioration du creusement par l'utilisation des produits moussants, *PhD thesis*, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 177 p.
- Thewes, M. and Budach, C., 2010. Soil conditioning with foam during EPB tunnelling. *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 3, issue 3, p. 256–267.