

# Modélisation par éléments discrets de la compressibilité d'un sol sablo-argileux traité par une mousse en cours du temps

**Khouloud Mahmoud<sup>1,2,\*</sup>, Philippe Dubujet<sup>1</sup>, Mariem Kacem<sup>1</sup>, Mehrez Jamei<sup>2</sup>**

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

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

(\* **Auteur correspondant : khouloud.mahmoud@enise.fr**

## RÉSUMÉ

Les lubrifiants sont utilisés pour limiter les frottements du bouclier de tunnelier avec le sol, et faciliter l'extraction des sols à excaver. Les sols excavés sont généralement classés comme déchets et stockés en zone de dépôt. La maîtrise de l'évolution physico-chimique et mécanique de ces déchets, permet d'explorer des méthodes de valorisation. Dans cette étude, on s'intéresse aux sols traités par agents moussants à base de tensioactif utilisés dans la technique adoptée par les tunneliers à pression de terre. Cette étude consiste à modéliser numériquement un milieu granulaire moyennant la méthode des éléments discrets (Discret Element Method : DEM) dans le but d'étudier la compressibilité des mélanges sol-mousse durant leur évolution au cours du temps à l'échelle des grains. L'agent moussant se présente sous forme de bulles de tensioactif, constituant ainsi un deuxième milieu granulaire qui se mélange avec celui des granulats du sol. Les rigidités des grains ont été déduites d'essais triaxiaux. La modélisation est réalisée pour des résultats issus d'essais œdométriques. Une différence de 14 % entre les valeurs expérimentales et numériques est constatée. Par ailleurs, le modèle décrit la diminution du coefficient de compressibilité au cours du temps pour retrouver celle du sol non traité, trouvée expérimentalement.

## MOTS-CLÉS :

tunneliers à pression de terre, agent tensioactif, méthode des éléments discrets, vieillissement, essais œdométriques

## ABSTRACT

Lubricants are used to limit the tunneling shield's impact with the soil, also to facilitate the extraction of excavated soil. In this study, we are interested in the technique adopted by earth pressure tunneling machines (EPB) where surfactant foaming agents are used. Excavated soil is generally classified as waste and stored in the disposal area. The mastery of the physicochemical and mechanical evolution of these wastes makes it possible to explore methods of valorization. The aim of this study is to numerically model a granular medium using the Discret Element Method DEM method in order to study the compressibility of soil-foam mixtures during their evolution over time at the grain scale. The foaming agent is in the form of surfactant bubbles, thus constituting a second granular medium which mixed with that of the soil aggregates. The rigidities of the grains were deduced from the triaxial tests. The modeling is carried out for results oedometric tests. A difference of 14% between experimental and numerical values was founded. Furthermore, the model describes the reduction of the compressibility coefficient of the conditioned soil over time to find the coefficient of the unconditioned soil found experimentally.

**KEYWORDS:** tunneling, foam, DEM, aging, oedometric test

## Modélisation par éléments discrets de la compressibilité d'un sol sablo-argileux traité par une mousse en cours du temps

Khouloud Mahmoud, Philippe Dubujet, Mariem Kacem, Mehrez Jamei

### Introduction

La lubrification est une technique fréquemment utilisée dans le secteur de creusement des tunnels. Les lubrifiants sont utilisés pour limiter les frottements du bouclier avec le sol, et faciliter l'extraction des sols (Jancsecz *et al.*, 2005). Ces additifs permettent d'atténuer les inconvénients des boues lourdes. Ils confèrent aux déblais une fluidité qui améliore leur évacuation.

Dans ce travail, on s'intéresse aux tunneliers à pression de terre (EPB : Earth Pressure Balance Shields) utilisés particulièrement dans des terrains meubles. Dans ce cas, on utilise généralement des additifs de type agents moussants ou polymères. La matière excavée devient un déchet et est stockée. Son éventuelle utilisation dépend de la maîtrise des propriétés mécaniques mais aussi physiques et chimiques du milieu. Ces propriétés sont liées en grande partie au devenir de la mousse dans le matériau. Plusieurs études antérieures ont montré l'aspect évolutif de la mousse au cours du temps. Elles se sont intéressées à décrire la modification du volume de la mousse au cours du temps par coalescence, murissement et drainage (Koehler *et al.*, 1999 ; Hohler et Cohen-Addad, 2005 ; Wu *et al.*, 2018). Quelques travaux se sont intéressés à étudier l'évolution du système sol-mousse avec une approche expérimentale (Psomas et Houlsby, 2001 ; Pedraza *et al.*, 2015).

La modélisation de l'évolution du système sol-mousse au cours du temps permet de comprendre les effets de chaque paramètre du modèle sur le devenir du système et ainsi prédire cette évolution. Pour modéliser le comportement des sols, différentes méthodes ont été proposées dans la littérature. Une première consiste à représenter le sol comme un milieu continu moyennant la méthode des éléments finis (Mahboubi *et al.*, 1996 ; Borio et Peila, 2010). En réalité la structure granulaire confère aux sols une nature discrète. Les modèles continus adoptés ne permettent pas de détecter tous les phénomènes se produisant localement (à l'échelle microscopique du grain). Elles présentent plusieurs limitations lorsque le milieu est discontinu ou présente de multiples fissurations (Cundall et Strack, 1979). Pour faire face à ces limitations on utilise la méthode des éléments discrets (DEM : Discret Element Method) introduite par Cundall et Strack (1979). Il s'agit d'une approche qui considère le sol

comme un assemblage granulaire discret. L'intérêt de cette méthode tient à la facilité d'accès des données comme la vitesse à l'intérieur de l'empilement de grains, ou encore la compacité locale dans le milieu granulaire, paramètres qui sont difficilement mesurables dans l'expérience (Mahboubi *et al.*, 1996). Traditionnellement cette méthode est utilisée pour des particules uniquement de sol homogène. Ce travail s'intéresse à étudier numériquement moyennant la DEM les mélanges sol-mousse ainsi que le phénomène de vieillissement de la mousse dans le sol en se basant sur les résultats expérimentaux obtenus dans notre laboratoire dans les travaux de Pedraza *et al.*, (2015) et Selmi *et al.*, (2016).

### Matériels et méthodes

#### Méthode numérique

La méthode des éléments discrets, initialement développée par (Cundall et Strack., 1979) pour simuler la réponse macroscopique des matériaux granulaires secs, est une technique principalement Lagrangienne basée sur le calcul des mouvements de grains et leurs forces d'interactions.

Il est important de noter que l'élément (sphérique ou autre) peut simuler un grain réel comme il peut simuler un ensemble de grains ce qui confère à cette méthode une souplesse dans la modélisation des matériaux granulaires. Cette approche numérique permet, à partir de l'échelle locale des grains, de remonter au comportement phénoménologique du matériau.

La réponse macroscopique du matériau est simulée en associant des modèles de rigidité simples (relatif) à la composante normale de la force de contact ( $F_i^n$  et  $F_i^s$ ) à la distance inter granulaire et l'incrément de la composante tangentielle à l'incrément du déplacement tangentiel grâce respectivement aux raideurs normale  $k^n$  et tangentielle  $k^s$ , selon les équations (1) et (2).

$$F_i^n = K^n u^n n_i \quad (1)$$

$$\Delta F_i^s = -k^s \Delta u_i^s \quad (2)$$

où  $u^n$  est le déplacement relatif normal entre les deux éléments, est l'incrément de déplacement tangentiel,  $n_i$  est le vec-

teur normal au plan de contact.

Cette étude consiste à comprendre l'influence de l'agent moussant sur les propriétés mécaniques du sol ainsi traité. Dans cet objectif, l'étude propose une modélisation numérique du sol non traité à partir de la méthode des éléments discrets. L'agent moussant incorporé dans le sol se présente en effet sous forme de bulles de tensioactif, constituant ainsi un milieu granulaire. Le mélange entre le milieu sol non traité et le milieu agent moussant constitue un troisième milieu celui du sol traité sujet de cette étude.

L'étude consiste donc à étudier par l'approche DEM, à partir des paramètres numériques obtenus à partir de la modélisation d'essais triaxiaux sur les deux milieux, sol non traité et agent moussant, et en déduire les propriétés du mélange sol traité conformément à ce qui est utilisé classiquement in situ dans le cadre d'une sollicitation eudométrique.

### Milieux numériquement constitués

Un sol modèle non traité composé de mélange de 40 % en volume de kaolin Polwhite KL et 60 % en volume de sable d'Hostun HN 31 de type AI selon la classification GTR. Il appartient à la catégorie des sols fins la courbe granulométrique

du sol modèle utilisé est donnée en figure 3.

La modélisation du sol seul par la méthode des éléments discrets exige de considérer des hypothèses simplificatrices :

1. les grains sont considérés sphériques,
2. On ne tient pas compte de l'influence de l'eau interstitielle présente dans le volume porale,
3. le sol modèle a été modélisé par des sphères de rayons compris entre  $r_{\min} = 3 \mu\text{m}$  et  $r_{\max} = 50 \mu\text{m}$ . Avec cette dernière hypothèse, la courbe granulométrique du sol de référence a été respectée comme le montre la figure 1.

Les paramètres numériques adoptés, et relatifs à l'interaction granulaire, sont tels que l'on suppose des rigidités normales  $K_n$  et tangentielles  $K_t$  égales à  $0,5 \cdot 10^9 \text{ N/m}$  déduit d'une identification inverse sur un essai triaxial de référence Selmi *et al.*, (2016). Le frottement inter granulaire  $\mu$  choisi correspond à celui des silicates, et est donc pris égal à 0,4 (Khali *et al.*, 1996). Le milieu ainsi constitué présente un indice des vides  $e = 0,75$ .

L'injection de l'agent tensioactif dans le sol-modèle modifie la structure. Cet agent se trouve ainsi sous forme de bulles insérées dans le squelette granulaire. Ces bulles ont tendance à se couvrir de particules argileuses et constituent ainsi un deuxième milieu granulaire au sein du milieu sol-modèle. La mousse est ainsi considérée dans la modélisation DEM comme un milieu granulaire. Ce milieu est évolutif. En effet, les bulles

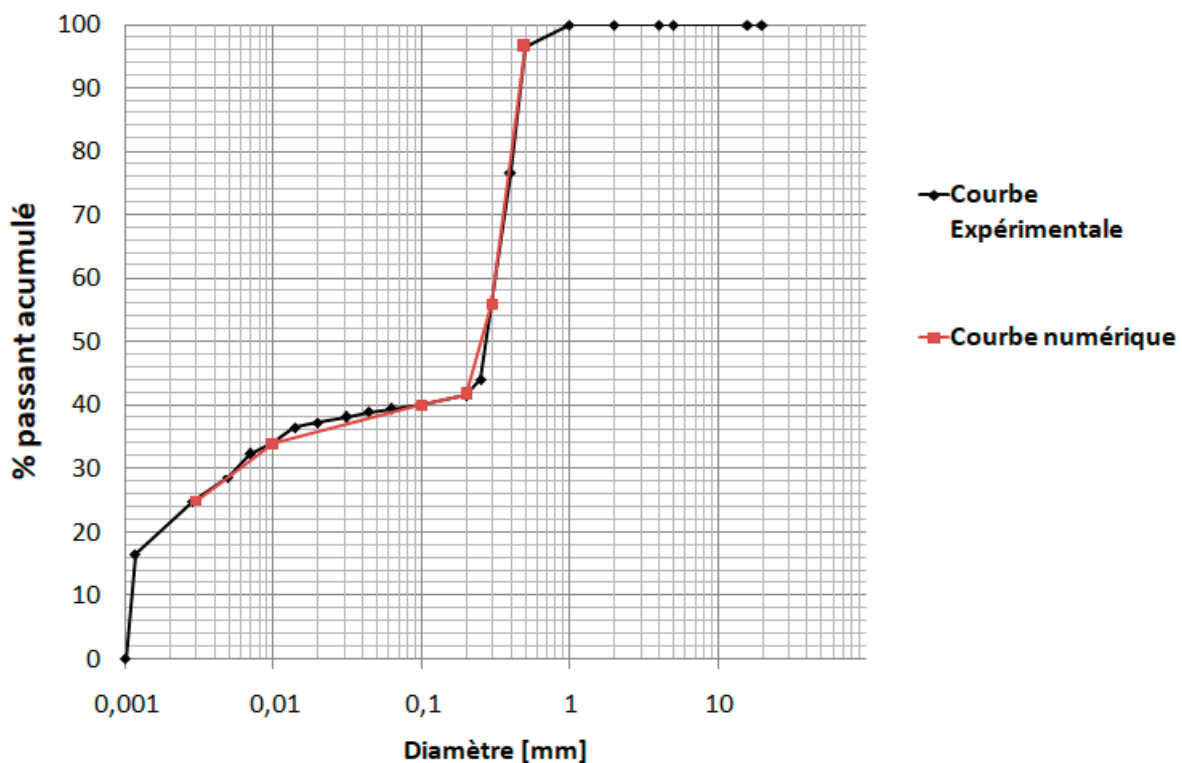


Figure 1. Courbe granulométrique du sol modèle

ont une durée de vie limitée du fait de leur vieillissement et de la sollicitation qui a pour effet de les faire éclater. Par ailleurs, ces bulles ont tendance à former des agrégations du fait de leur attractivité, ce qui n'est pas pris en compte dans cette étude. Par contre, elles consistent en des grains de grande souplesse, sans frottement inter granulaire. Les rayons des bulles sont pris dans l'intervalle  $r_{\min} = 50 \mu\text{m}$  et  $r_{\max} = 1,59 \text{ mm}$  (Borio et Peila, 2010). Pour la modélisation et pour des raisons purement numériques on s'est contenté de rayons compris entre  $r_{\min} = 50 \mu\text{m}$  et  $r_{\max} = 90 \mu\text{m}$  répartie selon une loi discrète uniforme. Les rigidités normales et tangentielles  $K_n = K_t = 10^5 \text{ N/m}$  sont déterminées à partir d'identification inverse sur un essai triaxial. Le frottement inter granulaire est pris égal à 0, sous l'hypothèse d'un frottement nul lors d'une interaction inter-bulle ou sol-bulle.

Le sol traité correspond alors à un mélange des deux matériaux définis ci-dessus.

Le mélange du sol avec la mousse est habituellement transcrit en termes de FIR dont la définition est fournie par la relation suivante :

$$\text{FIR} = \frac{V_m}{V_{\text{soil}}} (\%) \quad (3)$$

où  $V_m$  est le volume de la mousse, et  $V_{\text{soil}}$  est le volume du sol

La valeur du FIR adoptée est égale à 150 % ce qui correspond à 30 % de l'agent moussant et 70 % du sol non traité.

La figure 2 présente la simulation d'échantillons cylindriques constitués respectivement du sol seul (non traité), du milieu de bulles seules (agent tensioactif) et de mélange des deux.

## Résultats et discussion

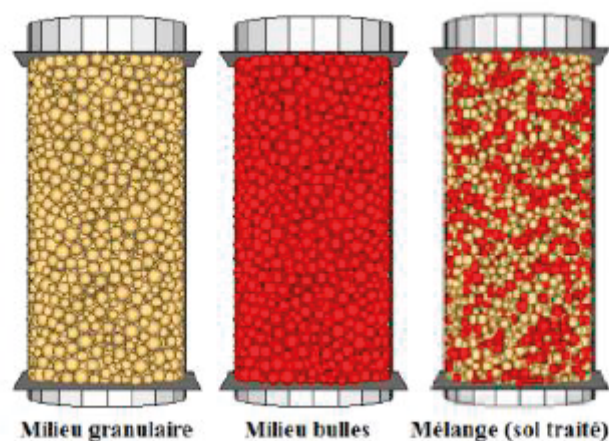


Figure 2. Echantillon généré mélange du sol et de l'agent moussant

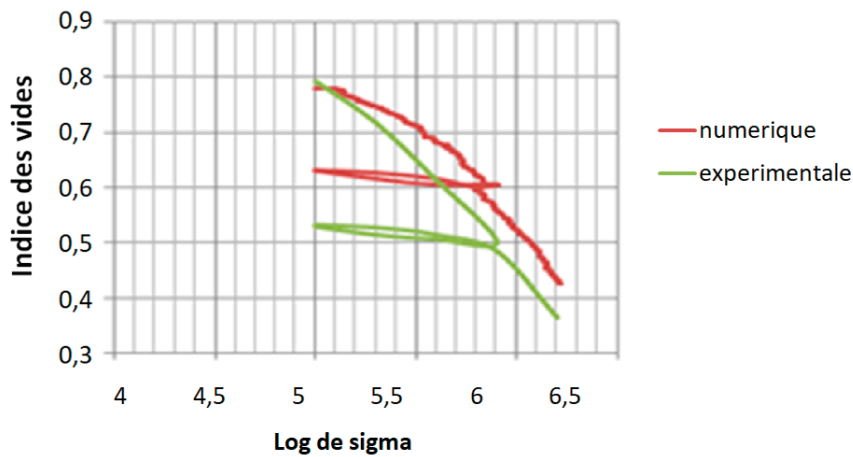
L'essai de compressibilité permet d'étudier le comportement d'un sol sous l'effet d'un chargement axial. Il s'effectue à l'aide de l'œdomètre et permet de suivre l'évolution du tassement d'un échantillon en fonction des contraintes axiales appliquées.

Cet essai permet de contrôler le tassement de l'échantillon en fonction des contraintes appliquées donc de suivre la variation de l'indice des vides.

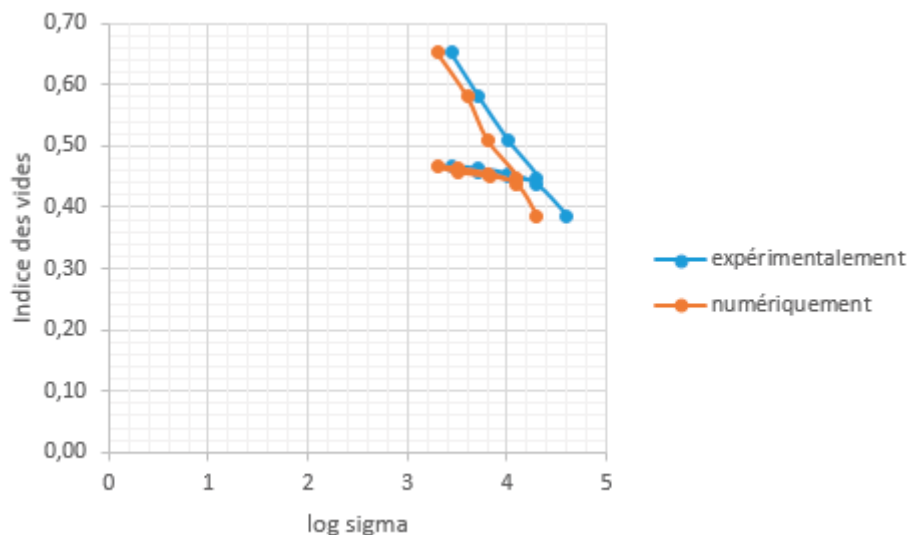
Les résultats numériques et expérimentaux Selmi *et al.*, (2016) sont fournis en figure 3 et au tableau 1. Elles montrent une forte augmentation de l'indice de compressibilité après traitement avec l'agent moussant, cette augmentation est due à la compressibilité des bulles de la mousse dans le sol traité. Pour obtenir la courbe numérique, les contraintes de pré-consolidation et finales sont considérées égales à celles obtenues expérimentalement. Entre les deux contraintes imposées, on remarque que la courbe numérique suit la même allure que celle obtenue expérimentalement, d'où le potentiel remarquable de la DEM à décrire le comportement du milieu grains-bulles. Néanmoins, un décalage de réponse dans le domaine élastique qui se conserve dans le domaine plastique est à noter. Ainsi, un ajustement et une optimisation des paramètres numériques semblent être encore nécessaires à conduire.

Un essai œdométrique sur le sol traité par un agent tensioactif, donne un coefficient de compressibilité numériquement  $C_c = 0,176$  (expérimentalement  $C_c = 0,232$ ) soit une différence de 24,1 %. Dans le cas du sol non traité  $C_c = 0,089$  (expérimentalement  $C_c = 0,108$ ) soit une différence de 17,6 %. Ces différences sont probablement dues aux paramètres du modèle ( $K^n, K^t$ , le coefficient de frottement inter granulaire) adoptés à partir de la littérature et de l'essai triaxial puis reporté sur l'essai œdométrique.

Par ailleurs cette différence est plus importante dans le cas de



**Figure 3.a Déformation dans des conditions œdométriques pour le sol modèle traité (indice des vides en fonction de log de sigma).**



**Figure 3.b. Déformation dans des conditions œdométriques pour le sol modèle traité (indice des vides en fonction de log de sigma).**

**Tableau I. Résultats du modèle et expérimentaux d'essai œdométrique pour différents sols**

	Sol modèle		Sol modèle traité	
	Modèle	Expérience	Modèle	Expérience
<b>Cc</b>	0,089	0,108	0,176	0,232

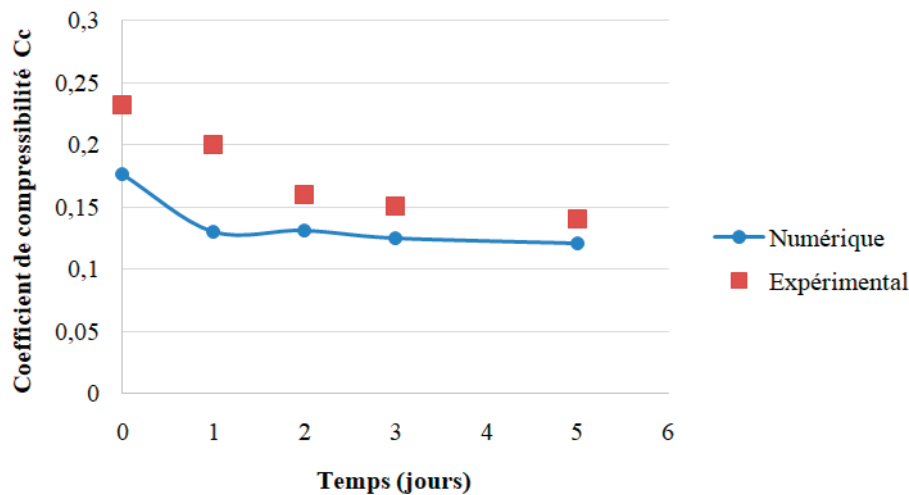
sol traité. En effet vu que les paramètres des bulles considérés dans ce modèle sont aussi issus de la littérature et des essais triaxiaux, l'erreur est alors augmentée. Il est prévu d'identifier ces paramètres à travers les résultats des essais œdométriques en particulier  $K_n$  et  $K_t$ .

L'évolution temporelle de la mousse dans le sol au cours du temps déterminée expérimentalement suit une loi exponentielle avec un temps de demi vie égale à 83 heures (Selmi et al., 2017). Afin de suivre l'évolution des caractéristiques de compressibilité et de consolidation du sol au cours du temps après traitement avec l'agent moussant, une série d'essais œdométriques est ré-

alisée. Partant d'un nombre initial de bulles égale à  $N_0 = 6788$  particules. Différentes courbes de compressibilité sont obtenues correspondants à 0 jours (mélange initiale  $N_0 = 6788$ ), 1 jour, 3 jours, et 5 jours. Ainsi 4 essais œdométriques sont modélisés à différents nombre de bulles  $N$  qui varie selon la loi exponentielle (équation 4) et qui est représenté dans la courbe de la figure 4.

$$N(T) = N_0 e^{-0,11T} \quad (4)$$

avec  $N_0$  est le nombre initial des bulles dans le sol et  $T$  est le temps en jours.



**Figure 4. Coefficient de compressibilité  $C_c$  en fonction du temps**

L'indice de compressibilité diminue au cours du temps jusqu'à rejoindre la valeur du sol non traité. En effet, le sol traité et l'indice de compressibilité dépend de la compressibilité des bulles présentes dans le mélange, cet indice diminue progressivement avec la diminution du volume des bulles en suivant la même allure de la courbe expérimentale (la modification du volume des bulles est due au nombre des bulles présent dans le milieu, la taille des bulles étant invariable par hypothèse). (Pedraza *et al.*, 2015 ; Baderna *et al.*, 2015). On note une différence entre les valeurs numériques et expérimentales obtenues par Pedraza *et al.* (2015). Elle est plus importante en début de la courbe et diminue jusqu'à 14 % à la fin de la courbe. Elle reste raisonnable vues les limitations des modèles numériques.

## Conclusion

Dans cette étude, la modélisation DEM a été utilisée pour reproduire la courbe expérimentale de l'indice de compressibilité d'un mélange sol-mousse en cours du temps. Le mélange a été modélisé au moyen de la méthode DEM dans le cadre d'essais œdométriques. Cette étude prouve, par une approche locale l'effet de vieillissement de l'agent moussant sur la compressibilité du mélange.

Les résultats numériques obtenus reproduisent les résultats expérimentaux de la diminution de l'indice de compressibilité au cours du temps jusqu'à retrouver la valeur du sol non traité. Cela est cohérent avec la variation de volume de la mousse au cours du temps et la compressibilité qui génère la présence des bulles au mélange sol traité d'où la forte sensibilité du modèle à la modification des rigidités normale et tangentielle des bulles ainsi que le coefficient inter granulaire des bulles.

Le DEM utilisée dans ce cadre doit permettre à terme de fournir des résultats pertinents à partir des caractéristiques

précises de l'agent moussant introduit pour le traitement. La prise en compte de la cohésion du milieu bulle, et son évolution temporelle permettra de prédire d'autres caractéristiques mécaniques et physiques du sol traité tels que l'angle de frottement interne, le module d'Young, le coefficient de Poisson ou encore l'angle de dilatance dans le cadre des essais triaxiaux et œdométriques.

Ce travail a été financé par le programme Partenariat Hubert Curien UTIQUE, du Ministère français des affaires étrangères, du Ministère français de l'enseignement supérieur et de la recherche et du ministère tunisien de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique dans le projet CMCU n° 15G1116.

## Références bibliographiques

- Baderna D., Lomazzi E., Passoni A., Pogliagh 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>
- 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>
- Cundall PA, Strack O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29, pp. 7-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- Hohler R., Cohen-Addad R.H. (2005). Rheology of liquid foam. *Journal of Physics*, 17, R1041-R1069.

Jancsecz S., Krause R., Langmaack L. (2005). *Advantages of Soil Conditioning in Shield Tunneling Experiences of LRTS Izmir*. Frankfurt am Mai: Ways & Freytag AG, ISBN 90 5809 063 9.

Khati S., Shahroui I. (1996). *Etude en laboratoire du frottement dans les matériaux granulaires*. Laboratoire de Mécanique de Lille (URA 1441), Ecole centrale de Lille.

Koehler S.A., Hilgenfeldt S.H., Stone H.A. (1999). *Liquid Flow through Aqueous Foams: The Nod Dominated Foam Drainage Equation*. *Phys. Rev. Lett.*, 82, 4232. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.82.4232>

Kozicki J., Donze F.V. (2008). *A new open-source software using a discrete element method to simulate granular material*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197, pp. 4429-4443. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2008.05.023>

Mahboubi A., Ghaouti A., Cambou B. (1996). *La simulation numérique discrète du comportement du matériau granulaire*. *Géotechnique*, 76, pp. 45-61. <https://doi.org/10.1051/geotech/1996076045>

Pedraza A., Selmi C., Mesticou Z., Dubujet Ph., Kacem M., Murilo C. (2015). *Temporal analysis of side effects produced by foam agents in the soil excavated with Earth Pressure Balance (EPB)*. XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

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. <https://doi.org/10.1201/b12748-19>

Selmi M., Kacem M., Jamei M., Dubujet Ph. (2016). *Effects of an added foaming agent on hydromechanical properties of soil*. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 10 (7), pp. 805-809 <https://waset.org/publications/10005194/effects-of-an-added-foaming-agent-on-hydro-mechanical-properties-of-soil>

Selmi M., Kacem M., Jamei M., Dubujet Ph. (2017). *Degradation of the gas bubbles produced in the soil conditioned with a foaming agent and excavated by earth pressure balance TBM (EPB)*. In congress Aquaconsoil 26-30 June 2017 Lyon, France.

Wu Y., Mooney M.A., Cha M. (2018). *An experimental examination of foam stability under pressure for EPB TBM modeling*. *Tunnelling and Underground Space technology*, 77, pp. 80-93 <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.02.011>

