

Modélisation par éléments discrets du comportement d'un sol traité par un agent tensioactif

Khouloud MAHMOUD^{1,2}, Philippe DUBUJET¹, Mariem KACEM¹, Mehrez JAMEI²

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

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

RÉSUMÉ.

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 excavés. Dans cette étude, on s'intéresse à la technique adoptée par les tunneliers à pression de terre (EPB) utilisés particulièrement dans des terrains meubles. Dans ce cas, pour faciliter les opérations de creusement et l'excavation des déchets, on utilise des additifs de type agents moussants à base de tensioactif.

Cette étude consiste à modéliser numériquement des milieux granulaires moyennant la méthode des éléments discrets dans le but d'étudier les mélanges sol-agent tensioactif. Le but de ces travaux est d'étudier l'effet des agents moussants sur le comportement mécanique des sols traités par un agent tensioactif à l'échelle microscopique des grains à travers les essais triaxiaux.

La comparaison entre les essais expérimentaux et numériques permet d'évaluer la pertinence de la modélisation par éléments discrets pour décrire le comportement des milieux granulaires.

ABSTRACT.

This study concerns the use of additives to facilitate the tunneling operation in difficult terrain, to thin soil structure and mitigate the difficulties excavation and transportation of soil. These additives affect the physical and mechanical behavior of the conditioned soil. In this study, we are interested by the earth pressure balance tunneling machines EPB-TBM used especially in soft ground. In this case, to facilitate the digging operations and the excavation of the waste, additives (composed of foaming agent (based of the surfactant)) are used. A three-dimensional numerical model based on the method of discrete elements DEM with simple shapes was developed. A calibration procedure of the parameters was done in order to study the effect of foaming agents on the mechanical behavior of soils conditioned with a surfactant under tri axial stresses. The comparison between experimental and numerical tests makes it possible to evaluate the relevance of discrete element modeling to describe the behavior of granular media.

MOTS-CLÉS : Tunnelier EPB, propriétés mécaniques, Modélisation par éléments discrets, essai triaxial, milieu granulaire, agent tensioactif.

KEY WORDS: EPB tunnelling, mechanical properties, DEM, tri axial test, granular, surfactant.

1. 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 excavés [JAN 2005].

Ces additifs sous forme de tensio-actif ou polymère sont donc 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 [MOR 2018].

Dans ce travail, on s'intéresse aux tunneliers à pression de terre (EPB : Earth Pressure Balance Shields) utilisés particulièrement dans des terrains meubles [MOR 2018]. Dans ce cas, on utilise généralement des additifs de type agents moussants et polymères pour faciliter les opérations de creusement et l'excavation des déchets.

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de traitement des sols par les agents tensioactifs sur les propriétés mécaniques du sol [VEN 2007, THE 2010]. La plupart de ces études se sont intéressés à valoriser la méthode d'injection de la mousse pour résoudre les problèmes de creusement. Le traitement du sol par les agents

moussants affecte en premier temps la structure du sol à travers la modification du terme porosité et la création des bulles discrètes de faible rigidité qui occupent le volume poral du sol [MOR 2018, JAN 2005].

Sur le plan numérique, les sols en général ont été longuement traités en tant que milieux continus, alors que leur structure granulaire leur confère une nature discrète. Les modèles continus adoptés ne permettent pas de détecter tous les phénomènes se produisant localement (à l'échelle microscopique du grain) et présentent plusieurs limitations lorsque le milieu est discontinu, ou présente de multiples fissurations [CUN 79]. Particulièrement pour étudier le comportement mécanique 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. Et, une seconde approche consiste à considérer le sol comme un assemblage granulaire discret. Plusieurs techniques ont vu le jour telles que la « dynamique des contacts » par [CAM 95] et notamment la méthode des éléments discrets par [CUN 79]. L'intérêt de cette dernière 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 [Mah 96].

Dans cette étude on a abordé le sujet numériquement moyennant la méthode des éléments discrets afin d'étudier le comportement mécanique des sols traités par des agents moussants, traditionnellement cette méthode pour des particules uniquement de sol dans le but d'étudier l'impact de ce procédé de lubrification sur l'évolution de la structure du sol traité et ses propriétés mécaniques. est nouvelle vu la nature du mélange sol-mousse (traditionnellement c'est appliqué pour des particules uniquement de sol).

Le sol de référence modélisé est un mélange de 40% de kaolin et 60% de sable de type A1 selon la classification GTR [SEL 2016] Le choix de ces pourcentages correspond à un sol meuble dont les caractéristiques se rapprochent aux sols creusé par les tunneliers de type EPB. Ce sol est modélisé numériquement par un assemblage granulaire de sphères. De même, l'agent moussant qui se trouve sous forme de bulles de gaz est modélisé par un assemblage de grains à faibles rigidités. Dans le cadre d'une sollicitation triaxiale, ces deux milieux sont d'abord construits et étudiés séparément. Enfin le mélange de ces deux milieux est envisagé pour modéliser le sol traité.

2. Matériels et Méthodes

1.1. Choix du sol modèle

Le choix du sol modèle a été fait par [SEL 2016], dans le but de se rapprocher aux sols des terrains meubles. Le sol de référence est un mélange de sable et de kaolin type A1 selon la classification GTR [SEL 2016], dont les pourcentages sont les suivantes :

- Sable d'Hostun HN 31 (60 %) : issu des carrières des usines SIKA implantées à Hostun (Drome). Il est couramment utilisé en France et au niveau international comme un matériau modèle dans le domaine de la mécanique des sols;
- La kaolinite Polwhite KL (40 %) : Ce type d'argile est couramment utilisé dans les laboratoires et représente une grande partie des sols rencontrés dans la nature.

Le choix d'un mélange sable- kaolin est dû aux plusieurs recherches existants sur ces matériaux. Ils font l'objet de la plupart de sols de références utilisés dans les domaines de la recherche [BOU 2005].

La courbe granulométrique du sol modèle numériquement constitué est utilisé est présenté en figure 1 :

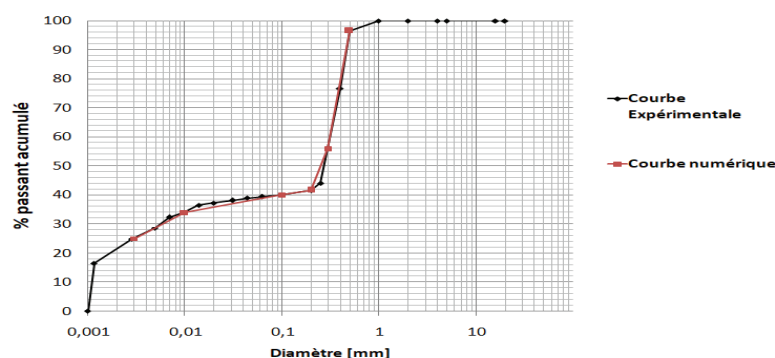


Figure 1. Courbe granulométrique du sol modèle

1.2. Approche numérique

1.2.1. Milieu des grains de sable

Le sol de référence est modélisé numériquement par un assemblage granulaire de sphères caractérisé par leur rigidité élevée.

Les particules sont de forme circulaire qui ne génère pas de fortes forces tangentielles de contact, et de masse volumique $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$. L'assemblage granulaire est constitué de particules de rayons compris entre $R_{\min}=0,00001\text{m}$ $R_{\max}=0,001\text{m}$ discrétisés sur des petits intervalles, les particules sont réparties sur chaque intervalle suivant une loi discrète uniforme. Le modèle de contact adopté se compose de deux parties : une partie élastique linéaire avec des rigidités normale kn et tangentielle kt ($kn = kt = 0,5e9\text{N/m}$) et un critère de frottement de Coulomb de coefficient de frottement $\mu = 0,4$ correspondant à celui de silice [JAN 2005]. Ces paramètres micromécaniques correspondent à des contacts moyennement rigides. On a également utilisé lors de génération des échantillons la porosité initiale de l'ordre de 0.45 [SEL 2016] qui correspond à un milieu mi dense ne posant pas de problèmes au niveau de convergence du modèle numérique.

1.2.2. Milieu des bulles

En second lieu on a essayé de constituer le milieu des bulles qui correspond dans ce cas à l'agent moussant, les particules sont toujours de forme sphérique, et de masse volumique $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ [XIA 2012]. L'assemblage granulaire est constitué de particules de rayons compris entre $R_{\min}=0,00091\text{m}$ $R_{\max}=0,00159\text{m}$. Le modèle de contact adopté ici se caractérise par des rigidités normale kn et tangentielle kt faibles ($kn = kt = 1e5\text{N/m}$) et un coefficient de frottement inter granulaire nul. Ces paramètres micromécaniques correspondent à des contacts de rigidité faible et non frottant. La porosité initiale est maintenue égale 0.45.

1.2.3. Mélange correspondant à un sol traité par un agent tensioactif

De la même manière qu'un échantillon réel peut être composé de divers matériaux, l'échantillon numérique dans cette partie est composé de deux familles d'éléments sphériques qui sont les grains de sables en proportion égale à 60% et l'agent moussant avec un pourcentage de 40 %. Le mélange de ces deux milieux est envisagé pour modéliser le sol traité par l'agent tensioactif.

Les différents milieux modélisés numériquement sont représentés en figure 2 :

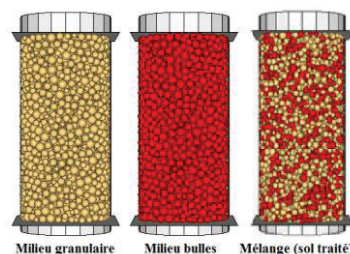


Figure 2. Milieux numériques constitués

1.3. Principe des essais triaxiaux numériques

Pour simuler l'essai triaxial, on impose à l'échantillon cylindrique une vitesse de compression (suivant l'axe Z) en maintenant la contrainte de confinement constante. La contrainte de confinement est régulée par des déplacements simultanés des parois latérales pendant les simulations. La contrainte σ_1 est mesurée sur les parois horizontales. Tous les essais numériques ont été effectués sur un échantillon cylindrique de hauteur 800 mm et de diamètre 400mm, avec 3 contraintes de confinements égales à 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa pour reproduire les mêmes conditions expérimentales de [SEL 2016].

Les caractéristiques mécaniques à la rupture du milieu sont déterminées à partir de 3 essais effectués en utilisant le critère de Mohr Coulomb :

$$\tau = C + \sigma \tan(\phi) \quad [1]$$

Où τ est la contrainte de cisaillement [Pa], σ est la contrainte normale [Pa], C la cohésion interne [-], et ϕ est l'angle de frottement inter granulaire [°].

3. Résultats et discussion

1.4. Essai triaxial sur le sol avant et après le traitement

Le milieu sol non traité est représenté par des particules homogènes de même rigidité, tant dis que le milieu qui représente le sol traité ait la particularité d'assembler deux familles de particules avec des rigidités très différentes et des caractéristiques microscopiques adaptées pour chaque famille, d'où la complexité de simulation de ce milieu complexe.

Afin de déterminer la cohésion C et l'angle de frottement il faut étudier l'évolution du déviateur des contraintes en fonction du déplacement vertical. Des essais triaxiaux ont été effectués sur le sol modèle avant et après le traitement avec l'agent tensioactif. Les résultats des essais obtenus sont représentés en figure 3(a).

Pour visualiser les phénomènes de contractance et de dilatance on a tracé la courbe de déformation volumique en fonction de la déformation axiale. Les résultats correspondants sont représentés en figure 3(b).

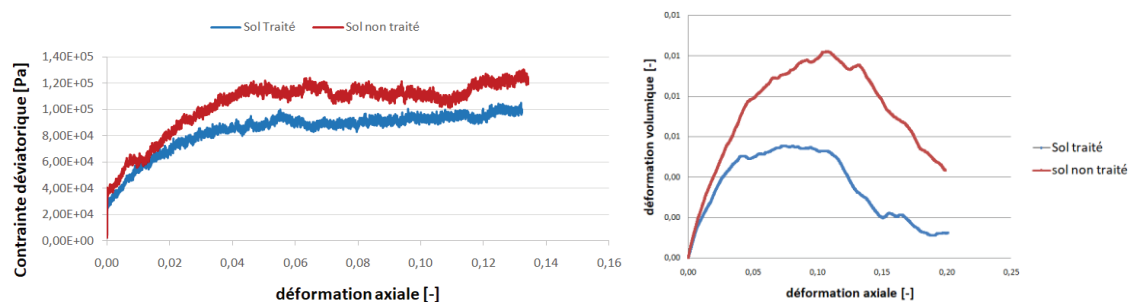


Figure 3. (a). Déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale pour la contrainte 100 kPa
(b). Déformation volumique en fonction de la déformation axiale pour la contrainte 100 kPa

L'angle de frottement interne obtenu égal à $22,53^\circ$ pour le sol non traité (expérimentalement [SEL2016] a trouvé $21,3^\circ$), et une cohésion nulle. Pour le sol traité on a trouvé un angle de frottement $\phi = 15,52^\circ$ (expérimentalement $17,76^\circ$ [SEL 2016]), avec une valeur de cohésion nulle. La réponse présentée par le milieu sol traité est globalement similaire à celui du sol propre à faible niveau de contrainte, avec un angle de frottement bien inférieur.

. On remarque également que le matériau présente une phase de contractance (phase de diminution du volume de l'échantillon : $dev / dt < 0$, la déformation volumique sera comptée négativement) qui résulte du fait granulaire, suivit par une phase de dilatance, Il s'agit en fait d'un résultat classique dans la littérature.

Le sol traité présente une dilatance considérablement plus importante que celle du sol propre. On peut expliquer ce comportement par l'effet adhésif de l'agent moussant entre particules qui change les conditions de frottement entre particules et celle qui a provoqué la dilatance du mélange.

1.5. Essai triaxial sur le milieu des bulles (l'agent tensioactif)

Le milieu des bulles constitué numériquement se caractérise par des rigidités normales et tangentielles faibles et ne présente pas de cohésion locale entre les grains (coefficient de frottement interne $\mu = 0$). L'essai triaxial effectué sur ce milieu permet de déterminer respectivement la courbe de la contrainte déviatorique en fonction de la déformation axiale et la courbe de déformation volumique en fonction de la déformation axiale pour la contrainte de confinement 100 kPa (représentées en figures 5 et 6).

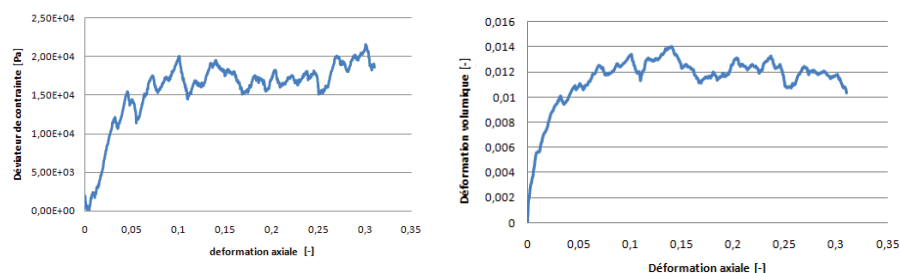


Figure 4. (a). Déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale pour la contrainte 100 kPa
(b). Déformation volumique en fonction de la déformation axiale pour la contrainte 100 kPa

L'angle de frottement interne correspondant au milieu bulles $\phi = 11,21^\circ$. On constate que la valeur de l'angle de frottement est proche de celle des bulles de savon dans la littérature qui est égale à 12 degré [XIA 2012]. On constate également que le milieu bulle est principalement contractant, absence de la phase de la dilatance.

4. Conclusion

L'outil de simulation par la Méthode des Eléments Discrets donne de bons résultats qualitatifs, en accord avec l'expérience. Si la puissance de calcul des ordinateurs limite la précision des résultats, et malgré le nombre élevé de paramètres de simulation à contrôler, les résultats quantitatifs obtenus sont également en accord avec ceux obtenus expérimentalement.

Les différents résultats des essais réalisés sur le sol traité par des agents tensioactifs montrent un changement considérable des propriétés mécaniques du sol :

- Une réduction de l'angle de frottement a été observée au niveau de l'essai triaxial, cette diminution est due au frottement nulle des bulles de l'agent moussant ce qui diminue la résistance au cisaillement.
- En outre, on a observé le sol traité présente une dilatance considérablement plus importante que celle dans le sol propre. On peut expliquer ce comportement par l'effet adhésif de l'agent moussant entre particules qui change les conditions de frottement entre particules et celle qui a provoqué la dilatance du mélange.

5. Bibliographie

- [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 Vol. 71 , 2018, p.454-465.
- [Mah 96]. Mahboubi A., Ghaouti A., Cambou B., « La simulation numérique discrète du comportement du matériau granulaire », Géotechnique. Vol. 76, 1996, p.45-61.
- [JAN 2005] Jancsecz, S., Krause, R. et Langmaack, L. *Advantages of Soil Conditioning in Shield Tunneling Experiences of LRTS Izmir. Frankfurt am Main :Wayss& Freytag AG*, ISBN 90 5809 063 9, 2005.
- [BOR 2010] Borio, L. and Peila, D., « Study of the Permeability of Foam Conditioned Soils with Laboratory Tests », American Journal of Environmental Sciences, Vol. 6, n° 4, 2010, p. 365-370.
- [CUN 79] CUNDALL P.A, STRACK, O.D.L, « A discrete numerical model for granular assemblies », Géotechnique, vol 29, 1979, p. 7-65.
- [CAM 95] CAMBOU, B., DUBUJET, P., EMERIAULT, F., SIDOROFF, F., « Homogenization for granular materials », European Journal of Mechanics, A/Solids, Vol. 14, n°2,1995, p.223-244.
- [SEL 2016] Selmi M, Kacem M, Jamei M, Dubujet Ph., « Effects of an added foaming agent on hydromechanical properties of soil », Int J Environ Chem Geol Geophys Eng Vol. 10, n°7, 2016, p.773-777.
- [BOU 2005] Boussaid K., Sols intermédiaires pour la modélisation physique : application aux fondations superficielles, Thèse de doctorat, Université de Nantes,2005.
- [XIA 2012] XianglinY., Fuxin L, Jiguang L, Yunfeng L, Zhenzhong Y., « Mesoporous hollow spheres from soap bubbling», Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 367, 2012, p. 531-536.