
Modélisation de l'essai pressiométrique dans un sol pulvérulent

Rangeard Damien, Masson Samuel

LGCGM, INSA Rennes, 20 avenue des Buttes de Coesmes, 35043 Rennes
damien.rangeard@insa-rennes.fr, samuel.masson@insa-rennes.fr

RÉSUMÉ. On développe des modélisations semi-analytiques de l'essai pressiométrique en vue d'identifier proprement les paramètres mécaniques du sol. Dans cette communication on confronte les réponses de ces modèles à un essai pressiométrique de référence simulé par Eléments Distincts. Le matériau est un assemblage granulaire 2D constitué de particules circulaires représentatif d'un sol pulvérulent. Les paramètres mécaniques macroscopiques de ce matériau sont identifiés à partir de la simulation d'essais biaxiaux. Différentes solutions semi-analytiques de l'expansion d'une cavité cylindrique en condition de déformations planes au sein d'un milieu fini sont envisagées avec l'hypothèse du développement de petites ou de grandes déformations. L'ajustement des ces solutions avec la simulation de référence fournit par analyse inverse des paramètres mécaniques très proches de ceux identifiés sur les essais biaxiaux. De plus, pour des niveaux élevés d'expansion de la sonde l'hypothèse de grandes déformations s'avère pertinente.

ABSTRACT. Semi-analytical modeling of the pressuremeter test are developed in order to properly identify the mechanical parameters of the soil. In this paper, the responses of these models are compared to a reference pressuremeter test simulated by Distinct Elements. The material is a 2D granular assembly consisting of circular particles representative of a non cohesive soil. The macroscopic mechanical parameters of this material are identified from simulations of biaxial tests. Various semi-analytical solutions for the expansion of a cylindrical cavity under plane strain conditions in a finite medium are envisaged with the hypothesis of the development of small or large strains. The fitting of these solutions with the reference simulation provides mechanical parameters very close to those identified in the biaxial tests. Moreover, for high levels of expansion of the probe, the hypothesis of large strains proves to be relevant.

MOTS-CLÉS : un maximum de six mots significatifs : pressiomètre, éléments distincts, identification de paramètres, grandes déformations

KEY WORDS: a maximum of six significant words: pressuremeter, distinct element method, parameter identification, large strains

1. Introduction et méthodologie

L'identification des paramètres mécanique des sols est souvent réalisée à partir d'essais de laboratoire. Cependant, le prélèvement des échantillons est toujours une opération délicate qui entraîne le remaniement du matériau et qui conduit à la modification de l'état initial de l'échantillon. L'identification des paramètres à partir d'essais in-situ apparait donc pertinente mais rencontre une difficulté majeure liée à la méconnaissance des champs de contraintes et de déformations se développant dans le sol autour de l'appareil de mesure.

De nombreuses études ont montré la possibilité d'identifier des paramètres de loi de comportement à partir du résultat d'essais pressiométriques ([MON 94] [RAN 02], [SAN 14] ...). Les méthodes d'identification se basent sur des corrélations semi-empiriques, des solutions analytiques adoptant une loi de comportement simple ou bien sur des simulations numériques permettant l'utilisation de modèles de comportement plus sophistiqués.

Dans cette communication, on s'intéresse à l'identification de paramètres d'un modèle simple intégrant une élasticité linéaire et un critère de Mohr Coulomb. Les modélisations analytiques sont couramment développées en considérant une hypothèse de petites déformations. Or, dans le cas du pressiomètre, la courbe expérimentale est construite jusqu'à des niveaux de déformation élevés, pour lesquels l'hypothèse des petites déformations est discutable [YU 04]. Aussi, on prend en compte l'hypothèse des grandes déformations dans la modélisation analytique de l'essai pressiométrique, et on étudie l'influence de cette hypothèse sur les valeurs des paramètres identifiés par analyse inverse.

La validation des modèles et l'identification des paramètres mécaniques s'appuient sur un essai pressiométrique de référence simulé par Eléments Distincts. L'intérêt d'une telle approche est de parfaitement maîtriser le matériau en termes d'assemblage initial et de réponse macroscopique. On peut, en effet, à partir d'un état initial donné identifier précisément des paramètres mécaniques macroscopiques en simulant des essais homogènes.

2. Simulations discrètes par Eléments Distincts

Les simulations par Eléments Distincts sont réalisées en 2D avec la méthode numérique de Type Cundall et al. [CUN 79] implantée dans le code PFC [ITA 99]. Ce modèle est conceptuellement assez proche des massifs de rouleaux de Schneebeli. De manière à éviter des assemblages géométriques réguliers, le matériau modélisé est constitué de trois familles de particules de forme circulaire de diamètres 2, 3 et 4 mm avec les pourcentages surfaciques respectifs de 25, 50 et 25%.

Le modèle de contact interparticulaire se compose de deux parties : (i) des rigidités élastiques linéaires normale k_n et tangentielle k_t telles que : $k_n = k_t = 1.10^8$ N/m, et (ii) un critère de frottement de Coulomb de coefficient $\mu = 1$. Ces paramètres micromécaniques correspondent à des contacts moyennement rigides et assez frottants.

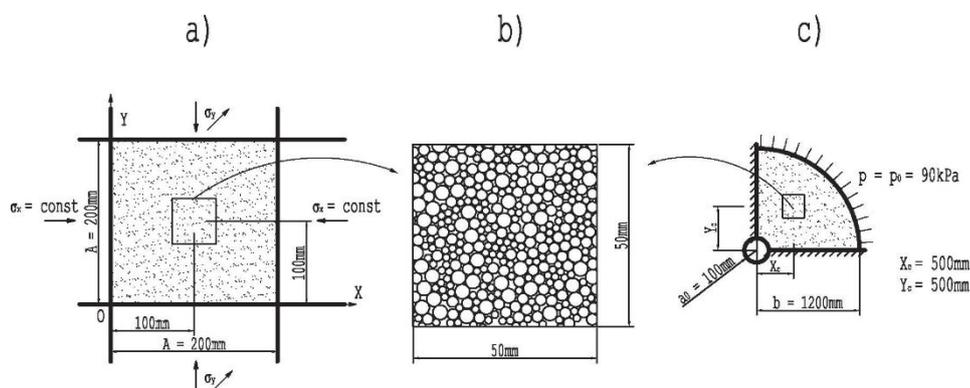


Figure 1. Echantillons pour les simulations discrètes : a) essai biaxial ; b) détail ; c) essai pressiométrique.

2.1 Essai biaxial

Les dimensions de l'échantillon (200 mm x 200 mm) (Figure 1) correspondant à un rapport entre le côté de l'échantillon et le diamètre maximal des particules égal à 50, et à un nombre total de particules égal à 5500. Ces valeurs permettent de considérer l'échantillon comme un volume élémentaire représentatif.

La Figure 2a présente les courbes d'évolution du déviateur des contraintes $\sigma_y - \sigma_x$ et de la déformation volumique ε_v , en fonction de la déformation axiale ε_y , obtenues à partir de la simulation de l'essai biaxial. A partir de ces courbes, on détermine les paramètres élastiques (module d'Young E , coefficient de Poisson ν) et les paramètres plastiques (angle de frottement ϕ et angle de dilatance ψ) comme indiqué sur la Figure 2a. Le module de cisaillement G est calculé à partir des valeurs de E et ν .

2.2 Essai pressiométrique

Les dimensions de l'échantillon sont représentées sur la Figure 1c. Le rayon initial de la sonde pressiométrique a est de 100 mm et le rayon extérieur du massif b est de 1200 mm ($b/a = 12$). D'autre part, compte tenu de la symétrie de révolution du problème et dans le but de réduire le nombre de particules (par conséquent le temps de calcul), seul un quart de disque est modélisé. Ces dimensions conduisent à un nombre de particules d'environ 150000.

En terme de conditions aux limites, on impose sur les axes x et y du milieu modélisé des déplacements nuls dans les directions respectivement verticale et horizontale. Sur la frontière extérieure ($r = b$), on maintient la pression initiale horizontale p_0 au cours de l'essai. Enfin, le chargement pressiométrique est simulé par l'augmentation du rayon a de la sonde. La pression induite par chaque incrément de déplacement est déterminée à partir des forces de contact se développant entre la sonde et les particules en contact.

La Figure 2b présente la courbe pressiométrique obtenue par la simulation discrète : on porte l'incrément de la pression Δp sur la paroi de la sonde en fonction de la déformation radiale u_a/a_0 de la sonde. On observe une allure de la courbe pressiométrique analogue à celle du déviateur produite par l'essai biaxial, soit une phase croissante suivie d'un palier.

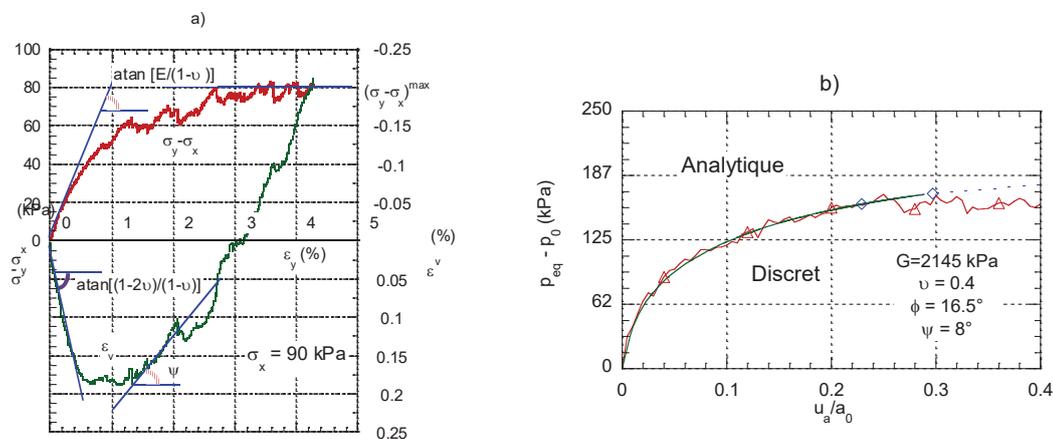


Figure 2. Evolution des grandeurs macroscopiques : a) essai biaxial ; b) essai pressiométrique

3. Modélisation analytique de l'essai pressiométrique

Le modèle continu utilisé dans cette étude consiste en une solution semi-analytique [RAN 04] de l'expansion d'une cavité cylindrique en condition de déformations planes au sein d'un milieu fini (limité par un rayon extérieur b). Un modèle de comportement élasto-plastique est adopté. La partie élastique du comportement est supposée linéaire et est caractérisée par le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν . Le comportement plastique est défini par la fonction de charge $F(\sigma)$, correspondant au critère de Mohr-Coulomb, et la fonction d'écoulement $G(\sigma)$ définies ci-dessous :

$$F(\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sin\phi(\sigma_1 - \sigma_3)$$

$$G(\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sin\psi(\sigma_1 - \sigma_3)$$

où ϕ et ψ sont respectivement l'angle de frottement macroscopique et l'angle de dilataance du matériau.

Dans cette étude, trois expressions analytiques ou semi-analytique de la courbe pressiométrique (relation $u_a/a = f(\Delta p)$) sont développées.

Les deux premières expressions analytiques sont obtenues en considérant une hypothèse des petites déformations. Dans le premier cas, l'expression est obtenue en supposant négligeable les déformations élastiques dans la zone plastique du sol, alors qu'elles sont prises en compte dans le deuxième cas.

Le troisième développement correspond à l'établissement de la courbe pressiométrique en adoptant l'hypothèse des grandes déformations. Dans ce cas, il n'est pas possible d'obtenir analytiquement la relation $u_a/a = f(\Delta p)$. Le recours à une méthode numérique pour le calcul du rayon plastique notamment est nécessaire.

4. Résultats et conclusions

La courbe pressiométrique obtenue à partir de la modélisation Eléments Distincts est considérée comme un résultat expérimental. On cherche alors à identifier par analyse inverse les paramètres de la loi de comportement choisie pour représenter le comportement du matériau (élasticité linéaire associé à un critère de Coulomb). Cette analyse inverse, réalisée par ajustement de la courbe analytique sur les résultats discrets, permet de déterminer des valeurs de paramètres macroscopiques, module de cisaillement G et angle de frottement ϕ du matériau.

Les valeurs des paramètres macroscopiques identifiés suivant cette procédure en considérant les différentes modélisations analytiques sont comparées à celles obtenues à partir de la modélisation discrète des essais biaxiaux.

Les résultats mettent en évidence que la simplification consistant à négliger les déformations élastiques dans la phase plastique a une influence non négligeable sur la valeur de l'angle de frottement déterminée pour des niveaux de déformation élevés.

De même, le choix de l'hypothèse petites ou grandes déformations affecte largement la valeur de l'angle de frottement interne déterminée à partir de la courbe pressiométrique.

Bibliographie

- [CUN 79] CUNDALL P.A., STRACK O.D.L., « A discrete numerical model for granular assemblies », *Géotechnique*, 1979, vol 29(1) p. 47-65.
- [ITA 99] Itasca Consulting Group, PFC2D Particle Flow Code in 2 Dimensions, Users manual, 1996-1999, USA.
- [RAN 04] RANGEARD D., MASSON S., VU N.H., « Multiscale analysis of pressuremeter test », *Proceedings of the 9th symposium on Numerical Models in Geomechanics NUMOG IX*, Ottawa, 25-27 August 2004, Pande G.N. & Pietruszczak S. (eds), Balkema, p. 677-682.
- [RAN 02] RANGEARD D., Identification des caractéristiques hydro-mécaniques d'une argile par analyse inverse d'essais pressiométriques, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2002.
- [SAN 14] ESCOLANO SANVHEZ F., BUENO AGUADO M., LAVIN J.R.S. « Interpretation of the pressuremeter test using numerical models based on deformation tensor equation », *Bull Eng Geol Environ*, 2014, vol 73(1) p. 141-146.
- [MON 94] MONNET J., KHLIF J., « Etude théorique et expérimentale de l'équilibre élasto-plastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre », *Revue Française de Géotechnique*, 1994, vol 67, p. 3-12.
- [YU 04] YU H.S., James K. Mitchell Lecture : « In situ soil testing: from mechanics to interpretation », *Proceedings of the second international conference on Site Characterization ISC-2*, Porto, 19-22 september 2004, Viana da Fonseca A., Mayne P.W. (eds), Millpress, Rotterdam, p. 3-38.