

SIMULATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT D'UNE ARGILE OBSERVÉ LORS D'ESSAIS TRIAXIAUX

NUMERICAL SIMULATION OF THE BEHAVIOUR OF A CLAY OBSERVED IN TRIAXIAL TESTING

ROUILI AHMED ¹

¹Université de Tébessa, Algérie

e-mail : arouili@hotmail.com

RESUME : Cet article présente les résultats de la simulation numérique d'une série d'essais triaxiaux standards conduits sur un sol argileux de la région de Tébessa (à l'Est de l'Algérie). L'objectif premier de notre investigation étant d'aboutir par analyse numérique au modèle de sol le plus approprié et le plus représentatif de son comportement réel. Un modèle numérique simple a été développé en utilisant le code en éléments finis le PLAXIS (Version 8.2) en prenant en considération la géométrie et les dimensions de l'éprouvette, les conditions aux limites, les conditions de drainage et le mode de chargement imposé pendant l'essai triaxial aux échantillons d'argile examinés. Les résultats obtenus montrent un accord qualitatif entre les résultats expérimentaux et numériques. Pour un niveau de déformations inférieur à 2%, le modèle constitutif SSM (soft soil model) est le plus approprié pour la simulation du comportement réel du sol de Tébessa, relativement au modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb (souvent utilisé dans les calculs) et le modèle HSM (Hardening soil model).

Mots - clefs : Argile, Essai triaxial, Simulation numérique.

ABSTRAC : This paper presents the results of a numerical simulation of the triaxial standard tests, conducted on a clayey soil from the region of Tébessa (East of Algeria). The main objective of this investigation was to find out by numerical modeling the most appropriate soil model and the more representative of the real behaviour. A simple numerical model was developed using the finite elements code PLAXIS (Version 8.2). with respect to the geometry and the dimensions of the sample, the boundary conditions, the drainage conditions and the loading imposed to the sample during the triaxial testing. The numerical results obtained indicate a good agreement with the experimental results. For a strain level of 2% the SSM (Soft soil model) was found to be the most appropriate for the simulation of the behaviour of the soil of Tébessa, when compared to the Mohr-coulomb model (usually used in design practice) and the HSM (Hardening soil model).

Key -words : Clay, Triaxial tests, Numerical simulation

1- Introduction

La conception des ouvrages géotechniques a longtemps été abordée du point de vue de la stabilité. Toutefois, l'expérience montre que la prise en compte du mode de déformation de la masse du sol avant la rupture s'avère de plus en plus nécessaire dans l'étude des projets géotechniques. La modélisation numérique des ouvrages géotechniques est devenue un outil indispensable pour les ingénieurs dans la conception des ouvrages. Toutefois, le choix des modèles simplistes (élastique et élasto-plastique) s'avère parfois non représentatif du comportement réel du sol considéré. La recherche montre par ailleurs que le comportement linéaire des sols ne constitue qu'une approximation de leur comportement réversible [1]. L'évaluation des paramètres de résistance par l'essai triaxial est toujours basée sur l'observation de la rupture, sans vraiment tenir compte du comportement du sol à l'échelle des petites et moyennes déformations. Le développement continu de l'essai triaxial [2], par l'introduction de nouvelles techniques de mesure et d'asservissement a permis une meilleure compréhension du comportement mécanique des sols. Parallèlement, le développement des méthodes des calculs numériques sur ordinateur a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et d'algorithmes de résolution des divers aspects du comportement des sols. Dans leur ensemble, ces modèles reposent sur des approches élasto-plastiques permettant de décrire assez correctement le comportement des sols fins, notamment des argiles molles. Quant aux algorithmes de résolution, leur fiabilité et leur performance dépendent surtout de la méthode de calcul utilisée et des critères de convergence fixés.

Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale et numérique sur le comportement du sol de la wilaya de Tébessa. Un large programme d'essai triaxial été réalisé sur des échantillons intacts (non reconstitués) pour déterminer son mode de déformation, sa résistance et ses paramètres de rigidité et d'aboutir au modèle de sol le plus approprié et le plus représentatif de son comportement réel.

Ensuite, un modèle numérique simple a été développé utilisant le code en éléments finis le PLAXIS (Version 8.2) [3] en prenant en considération la géométrie et les dimensions de l'éprouvette, les conditions aux limites, les conditions de drainage et le mode de chargement imposé pendant l'essai triaxial aux échantillons d'argile examinée. En utilisant le modèle numérique développé, on a considéré des lois constitutives différentes pour la simulation du comportement à petites déformations (inférieures à 2%) et à la rupture du sol. La confrontation des résultats expérimentaux et numériques obtenues doit permettre d'orienter le choix des concepteurs vers le modèle de comportement le mieux adapté à ce type de sol.

2- Identification du sol

Des essais standards d'identification ont été réalisés par le laboratoire des travaux publics de l'Est (LTPE), sur des échantillons intacts (non reconstitués) prélevés à partir de trois sondages différents dont la profondeur varie entre 1 et 2,7 m. Les résultats de laboratoire [4] indiquent que ce sol, de par ces caractéristiques physico-mécaniques (voir tableau 1) peut être classé comme un sol fin surconsolidé, avec une moyenne à forte plasticité. L'analyse chimique relève aussi une forte teneur en carbone ce qui favorise la classification de ce sol comme marne argileuse.

Tableau 1. Paramètres géotechniques, sol de Tébessa.

N° du Sondage	1	2	3
Profondeur (m)	1.00 2.00	3.50 5.50	1.20 1.60 2.20 2.70
Densité sèche (t/m^3)	1.85	1.67	1.76 1.71 1.75
Teneur en eau (%)	14.6	17.8	16.1 16.6 14.8
Densité humide (t/m^3)	2.12	1.97	2.04 1.99 2.01
Degré de saturation (%)	86	78	81 78 74
Granulométrie en (%) passant à:			
2 mm	99.00	97.90	99.50 99.50 98.90
0.08 mm	92.10	92.90	97.20 95.50 97.8
Limites d'Atterberg			
W_L	37	44	52 45 53
I_P	17	22	17 22 27
Indice de consistance I_c	1.32	1.19	1.33 1.29 1.41
Carbonates (%)	54.27	49.11	53.66 56.10 52.3
Insolubles (%)	-	45.83	39.83 38.30 40.89
Gypse (%)	-	4.26	5.99 3.54 5.79

3- Procédure expérimentale

Les essais triaxiaux réalisés sont de type consolidés non drainés avec mesure de la pression interstitielle (CU+u), sur des échantillons cylindriques ayant chacun un diamètre de 38 mm et une hauteur de 76 mm. Le choix d'un élanement égal à 2 répond surtout

à la bonne distribution des contraintes au centre de l'éprouvette [5]. Trois séries d'essais ont été réalisées, chaque série d'essai correspond à des échantillons de sol provenant du même sondage. Les résultats de chaque série d'essai comportent le cisaillement d'au moins trois éprouvettes provenant du même échantillon, préparées et saturées (au minimum à 99%) dans les mêmes conditions et soumises à des conditions de consolidations différentes. Chaque essai comprend les phases de saturation, de consolidation et de cisaillement.

La figure 1 montre des courbes typiques de la déformation axiale du sol (ε_1) en fonction du déviateur des contraintes (q) pour chaque série de test. La non-linéarité des courbes de déformation est bien visible, presque à tous les niveaux de déformations. Les courbes de déformation sont bien compatibles avec le comportement-type des argiles sur-consolidées. La divergence des courbes correspondant aux trois séries est due essentiellement à la variation de la plasticité en fonction de la profondeur de prélèvement de l'échantillon pour chaque série de tests. Dans la figure 2 les courbes déviateur de contraintes-déformations sont présentées dans un faisceau-limite, en plus de la courbe moyenne, calculée à partir des résultats correspondant aux 3 séries, et qui est supposée être représentative du comportement de ce sol. Il est à remarquer que la courbe moyenne de l'état de contrainte-déformation se situe très proche de la courbe du sondage (S1) et se développe presque avec la même forme. La figure 3 montre les courbes déviateur de contraintes-déformations tracées avec le faisceau et la courbe moyenne.

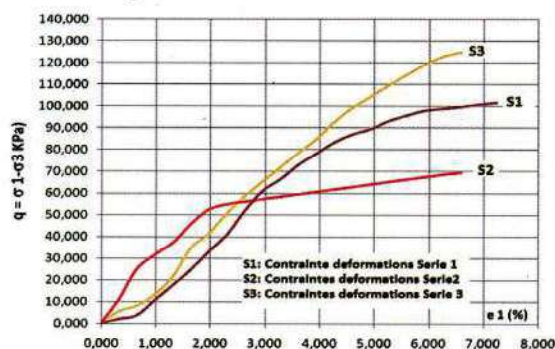


Figure 1 : Courbes contraintes (q)-déformations (ε_1)

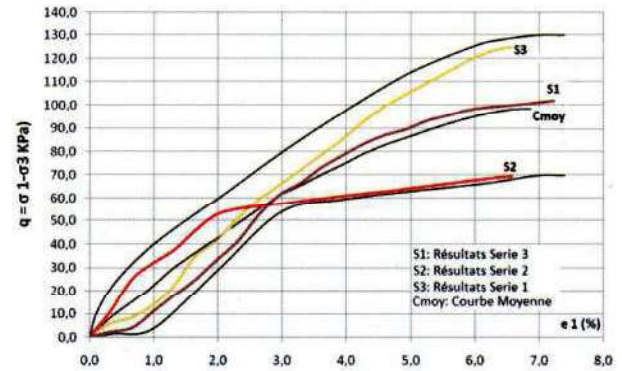


Figure 2 : Faisceau et courbes de déformations moyennes

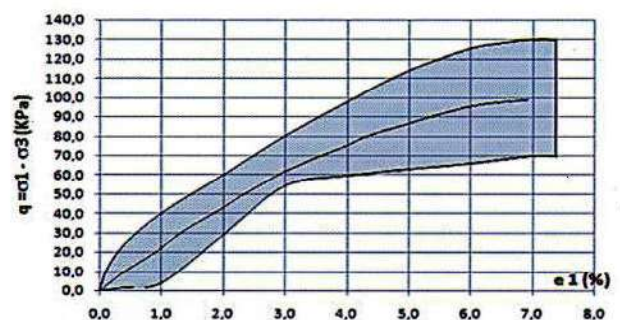


Figure 3 : Courbes des déformations : faisceau et courbe moyenne.

La figure 4 présente un résultat typique du cisaillement de ce sol pour une seule série de test, les cercles de Mohr correspondant à deux états de rupture sont présentés en termes de contraintes totales et effectives. En considérant les résultats des autres séries, on peut admettre que la cohésion moyenne de cette argile varie entre 21 et 58 kPa et l'angle de frottement interne est faible (il varie entre 2 et 7°), la valeur moyenne de la résistance maximale au cisaillement est $\tau_{max} = 55$ kPa. Les résultats obtenus à partir des essais triaxiaux réalisés indiquent un comportement typique d'une argile.

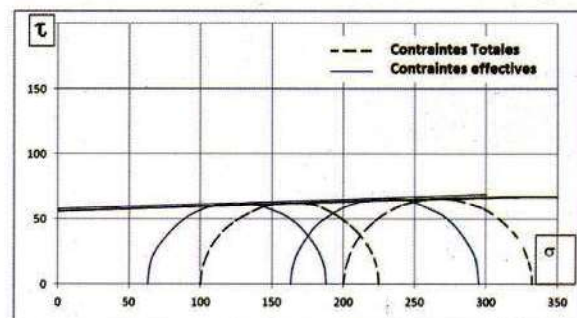


Figure 4 : Cercles de rupture (Mohr -Coulomb)

5- Procédure du calcul numérique

Le calcul est exécuté en utilisant le type de calcul 'multiphases' du logiciel PLAXIS, avec trois étapes distinctes. La première est programmée avec le type de calcul 'consolidation' avec une durée égale à trois jours. La deuxième étape est programmée avec le type de calcul 'plastique' par une procédure 'staged construction' afin de pouvoir activer les frontières imperméables à l'écoulement ou 'closed flow' pour simuler les conditions hydrauliques non-drainées. La troisième étape est programmée en calcul 'plastique' mais en utilisant la procédure des coefficients totaux 'total multipliers' afin de pouvoir augmenter le chargement axial directement depuis la fenêtre du programme de calcul et imposer le chemin de contrainte choisi.

6. Résultats de l'analyse numérique

6.1 Les déformations

La maille déformée typique à chaque modèle numérique est présentée dans la figure 7. Sur cette figure les déplacements sont représentés à une échelle réelle. En se référant à l'essai triaxial consolidé non drainé, le graphe de la maille déformée montre l'état du modèle quand le chargement axial (contrainte normale principale σ_1), atteint la valeur de 201,8 kPa pour le modèle de Mohr-Colomb (figure 7a), la valeur de 200.85 kPa pour le modèle HSM (figure 7b) et la valeur de 215 KPa pour le modèle SSM (figure 7c).

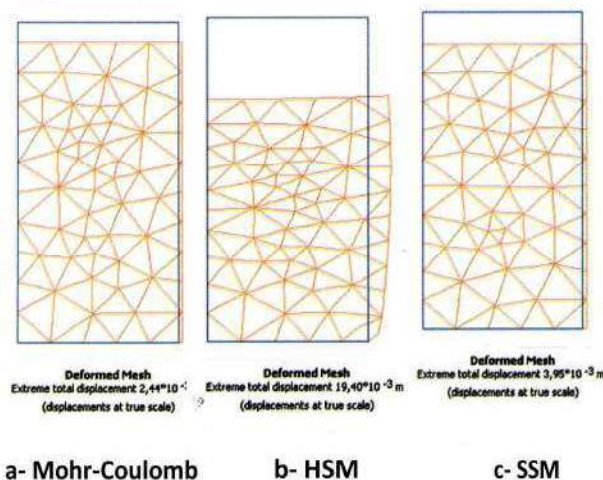
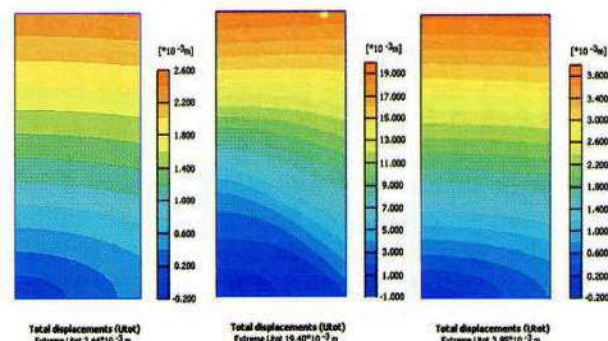


Figure 7 : Mailles déformées du modèle numérique

Les comportements du sol observés dans les figures 7 (a) et 7(c) sont comparables, toutefois la déformation avec le modèle HSM est plus prononcée, figure 7(b). Ceci s'explique par le fait que ce modèle (HSM) n'inclut pas le comportement 'mou' (softening behaviour) des sols, donc le niveau de contraintes ne diminue pas à la rupture.

6.2 Déplacements du sol

La figure 8 (a, b et c) montre la distribution des déplacements totaux (U_{tot}) dans la masse du sol, calculée par les trois modèles constitutifs et présentés dans un modèle à géométrie non déformée. Il peut être remarqué que pour le chemin des contraintes imposé, correspondant à une augmentation de la contrainte normale principale σ_1 , la masse du sol est dans un état actif et se déplace proportionnellement à l'augmentation de la valeur de σ_1 . Les 3 modèles (fig. 8a, 8b et 8c) montrent presque les mêmes tendances de déformations de l'échantillon qui sont en parfait accord avec les déformations observées durant l'essai triaxial consolidé non drainé.



a- Modèle Mohr-Coulomb b- Modèle HSM c-Modèle SSM

Figure 8. Distribution des déplacements totaux dans l'échantillon de sol.

7. Validation du modèle numérique

La validation du modèle numérique est réalisée en se basant principalement sur la comparaison directe des courbes contraintes-déformations mesurées expérimentalement et celles calculées avec le modèle numérique. La comparaison tient compte en même temps du comportement observé à un niveau de déformations inférieur à 2% et de la corrélation des courbes au stade de la rupture.

Dans la figure 9 de la présente analyse, il est à remarquer que la courbe du modèle Mohr-Colomb par rapport à la courbe moyenne des essais CU+u est non représentative dans sa majeure partie sauf pour les toutes premières déformations. On remarque aussi que, plus le déviateur augmente plus la courbe du modèle Mohr-Colomb s'éloigne de la courbe moyenne, alors que pour la rupture nous pouvons dire qu'elle s'est produite bien avant la rupture réelle, soit par rapport à la courbe moyenne ou aux essais CU+u à l'appareil triaxial.

Dans la figure 10 on constate que la courbe hyperbolique correspondant au modèle HSM est loin d'être représentative de la courbe moyenne des essais CU+u, car la rupture a eu lieu loin de la réalité. Ce modèle ne peut être utilisé dans le cas des sols argileux.

Dans la figure 11 de la présente analyse, on remarque que la courbe du modèle SSM par rapport à la courbe moyenne des essais CU+u est très représentative, car pour les premières petites déformations (inférieures à 2%) comme pour les dernières grandes déformations, elle prend toujours la même direction et avec un même rayon de courbure proche de celui de la courbe moyenne. On peut ainsi dire que la rupture s'est produite presque au même niveau que celui de la courbe moyenne.

Pour un niveau de déformations inférieur à 2%, le modèle constitutif SSM (Soft soil model) semble le plus précis, du moment que pour ce niveau de déformations le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb donne une sous estimation des déformations et le modèle HSM (Hardening soil model) conduit à une surestimation des déformations.

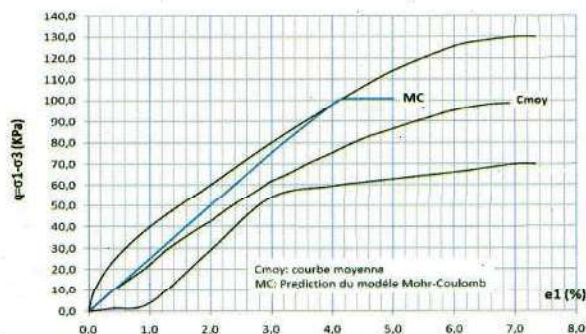


Figure 9 : Corrélation avec le modèle de Mohr Coulomb

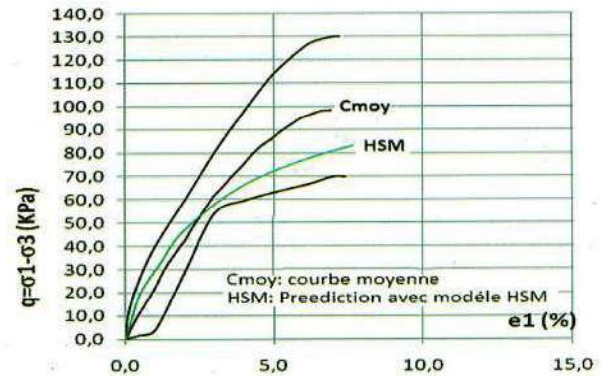


Figure 10 : Corrélation avec le modèle HSM

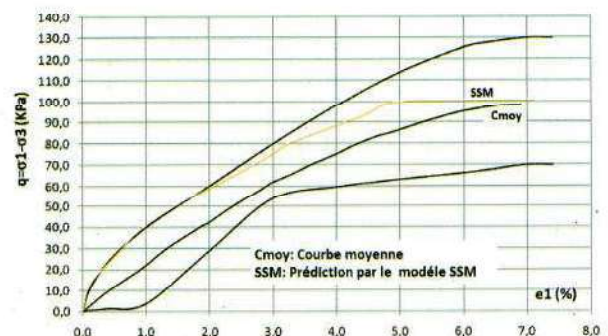


Figure 11 : Corrélation avec le modèle de SSM

8. Conclusion

Les résultats obtenus dans la présente investigation montrent que la simulation numérique réalisée en utilisant le code en éléments finis PLAXIS (version 8.2), donne des résultats concordants de manière assez satisfaisante avec les résultats observés lors d'essais triaxiaux réalisés sur modèles réduits, ce qui prouve une bonne qualité de modélisation numérique.

Il est reconnu que les sols se comportent de manière non linéaire sous l'action des chargements. Cette non-linéarité peut être modélisée à des niveaux de sophistication divers. La présente analyse numérique montre que le choix du modèle constitutif le plus représentatif du comportement réel du sol de Tébessa est étroitement lié à sa nature (sol argileux) et au niveau des déformations considérées (après son éventuel chargement). Pour un niveau de déformations inférieur à 2%, le modèle constitutif SSM (Soft soil model) semble le plus précis, du fait que pour ce niveau de déformations le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb donne une sous-estimation des

déformations et le modèle HSM (Hardening soil model) conduit à une surestimation des déformations.

Donc, pour une modélisation numérique réaliste d'un projet géotechnique situé à Tébessa, la connaissance préalable du niveau de chargement (contraintes) résultant de l'interaction sol-structures est primordiale dans le choix du modèle constitutif représentant le comportement de ce sol.

Références bibliographiques

- [1] Afnor, Norme NF P 94-070, *Essais au laboratoire, Essais mécanique. "Reconnaissances et essais- Essai à l'appareil triaxial de révolution"*. 1994.
- [2] Afnor, Norme NF P 94-071-1, *Essais au laboratoire, Essais mécanique. Reconnaissances et essais- Essai de cisaillement rectiligne à la boîte 'cisaillement direct'*. 1994.
- [3] Brinkgreve, R. B. J., "PLAXIS, (2003), *Finite Element Code for soil and rock analyses.*" Delft University of Technology & PLAXIS bv, Pays-Bas. 2003.
- [4] Harrath, N., " *Reconnaissance géotechnique du sol de Tébessa*", *Thèse de magistère, Université de Tébessa.*, 2008.
- [5] Afnor, Norme NF P 94-074 , *Essais au laboratoire, Essais mécanique. "Reconnaissances et essais- Essai à l'appareil triaxial de révolution"*. 1994.
- [6] Al Husein, M., " *Étude du comportement différé des sols et ouvrages géotechniques*", *Thèse Doctorat, Laboratoire Sols Solides Structures, Université d'Alep-Syrie*, pp 65-81. 2003.
- [7] Dunan , JM., Chang, C.-Y., "Nonlinear Analysis of stress and Strain in Soil," *ASCE J. of the Soil Mesh. And Found. Div. Vol. 96 pp. 1629-1653.* 1970.
- [8] Kondner, RL., (1963), "A Hyperbolic Stress Strain Formulation for Sands." *2. Pan. Am. ICOSFE Brazil, Vol. 1, pp. 289-324.* 1963.