

Simulation numérique d'un modèle réduit de sol renforcé par colonnes ballastées

Laouche M.¹, Karech T.², Martinez J.³, Rangeard D.³

¹Université de Jijel, Laboratoire LGCE, mail : laouche_mohamed@yahoo.fr

²Université de Batna, Département de Génie Civil, mail : karech@hotmail.com

³INSA de Rennes, Laboratoire LGCGM, mail : Juan.Martinez@insa-rennes.fr, Damien.Rangeard@insa-rennes.fr

RÉSUMÉ. Cet article vise à étudier les effets de la mise en place des colonnes de sable dans l'argile molle. Des essais au laboratoire sur modèles réduits sous gravité normale ont été réalisés ; après pré-consolidation de l'argile des colonnes de sable ont été mises en place par différentes méthodes et sous différentes contraintes de compactage. Les effets de cette mise en place se traduisent par une expansion radiale de la colonne, ce qui induit des excès de pressions interstitielles qui se dissipent au cours de la consolidation, ainsi que l'augmentation des contraintes horizontales. La simulation numérique des essais est réalisée par le code éléments finis Plaxis® (2D). Dans la première partie, l'installation des colonnes est modélisée en tant qu'expansion non-drainée d'une cavité cylindrique suivie d'une phase de consolidation, on s'intéresse ici, aux effets de l'expansion radiale où différents taux d'expansion sont considérés. Dans la deuxième partie, un modèle simulant les étapes de réalisation des colonnes par couches sous différentes contraintes de compactage a été considéré. L'impact de ces différentes étapes sur le sol environnant a été examiné.

ABSTRACT. This paper aims to study the effects of the installation of the sand column in the soft clay. Laboratory's tests on scale models under normal gravity were performed; after pre-consolidation of the clay sand columns have been established by different methods and under different compaction stresses. The impact of this installation results in a radial expansion of the column, which induces excess pore pressure which dissipates during the consolidation and the increase in horizontal stresses. Numerical simulation of tests is carried out by the finite element code Plaxis® (2D). In the first part, the installation of the columns is modelled as a non-drained expansion of a cylindrical cavity followed by a consolidation phase. We are interested here by the effects of radial expansion where different rates of expansion are considered. In the second part, a model simulating the steps of realization of columns with different layers under different compaction stresses was considered. The impact of these different steps on the surrounding soil was examined.

MOTS-CLÉS : simulation numérique, colonnes ballastées, expansion cavitaire, consolidation, contrainte de compactage.

KEYWORDS: numerical simulation, stone columns, cavity expansion, consolidation, stresses compaction.

1. Introduction

La construction sur des sols compressibles présente plusieurs difficultés liées essentiellement aux problèmes de portance, tassements, stabilité,... etc. Le renforcement de ces sols par colonnes ballastées constitue une des techniques les plus utilisées pour remédier à ces problèmes. Ces techniques consistent à incorporer et à compacter un matériau granulaire de caractéristiques géotechniques supérieures à celles du terrain à renforcer. La mise en place de ces inclusions souples peut être réalisée suivant différentes techniques [DHO 05].

La simulation du comportement de colonnes ballastées en laboratoire sur modèles réduits a déjà fait l'objet de nombreuses études. On peut citer à titre d'exemples les travaux de [SIV 04] ; [BLA 06] ou [BLA 07]. Ces études s'intéressent principalement au rôle du diamètre et/ou de la longueur de la colonne sur l'efficacité du renforcement dans l'augmentation de la rigidité et de la résistance des sols renforcés. Dans ces études, les colonnes de sable utilisées sont mises en place par forage et par substitution du sol par un matériau granulaire. Par ailleurs, des essais in situ ont également été réalisés [SIX 06] ; [COR 07].

De nombreuses procédures numériques ont été développées pour modéliser l'installation de la colonne. Certains auteurs imposent un déplacement latéral uniforme égal au diamètre moyen de la colonne finale en utilisant un modèle axisymétrique [GUE 07]; [CAS 10] ou [KIR 06] ; d'autres utilisent une modélisation 3D du sol environnant la colonne [NGU 08]. D'autres auteurs ont identifié par une analyse inverse le rapport (K) de la contrainte latérale à la contrainte verticale dans l'argile, à partir des essais sur le terrain [ELS 08] ; [ELS 06].

Les travaux de [PHA 10] ont été consacrés à l'étude de l'effet de la mise place des colonnes ballastées par différentes techniques sur le sol entourant. Plusieurs techniques de mise en place sont considérées, (i) sans refoulement du sol et sans compactage de la colonne (méthode « SR-SC ») et (ii) sans refoulement du sol avec compactage de la colonne (méthode SR-AC), (iii) avec refoulement du sol avec compactage. L'étude a été réalisée sur des modèles réduits de sol renforcé constitués de sable de Loire et de Kaolin.

Le présent travail constitue une contribution à la compréhension des effets du renforcement par les colonnes ballastées sur les sols compressibles par l'application de deux méthodes de simulation numérique. L'étude consiste en une simulation en éléments finis par le code de calcul Plaxis® (2D) du modèle réduit utilisé dans les essais de [PHA 10]. Le modèle réduit constitue une cellule élémentaire axisymétrique constituée d'une colonne de sable entourée d'un sol compressible de forme cylindrique.

La première partie de cette étude a pour objectif de caractériser les effets de l'expansion radiale de la colonne sur le sol environnant en considérant différents taux d'expansion. L'étude est focalisée sur l'augmentation des pressions interstitielles qui se dissipent au cours de la consolidation et l'augmentation des contraintes effectives horizontales. La mise en place est simulée numériquement par un déplacement radial d'une paroi drainante. La deuxième partie de ce travail s'intéresse à la simulation numérique de la mise en place de colonnes, en tenant compte des étapes réelles de la réalisation par couches successives de sable avec compactage sous différentes contraintes, conformément aux essais réalisés [PHA 10]. Elle a pour objectif d'étudier les effets de la contrainte du compactage sur l'expansion radiale de la colonne et la densification du sol environnant au voisinage de celle-ci. Cette simulation a été validée par la confrontation des résultats obtenus avec les résultats expérimentaux. Le comportement du sol entourant et celui du sable constituant la colonne, sont élasto-plastiques, ils obéissent au critère de plasticité de Mohr-Coulomb.

2. Essais au laboratoire

Le matériau constituant les échantillons a été préalablement humidifié à une teneur en eau de saturation de l'ordre du double de sa limite de liquidité, soit $w = 110\%$. Les échantillons [PHA 10] de Kaolin sont ensuite pré-consolidés sous une contrainte verticale de 50 kPa dans un moule rigide de dimensions : $\Phi = 150$ mm et $h = 200$ mm. La hauteur finale des éprouvettes après pré-consolidation est de 130 mm. L'état ainsi atteint est appelé « état initial ».

Les caractéristiques géotechniques du « sol » ainsi constitué sont déterminées à partir d'essais classiques de laboratoire (essais œdométriques, essais triaxiaux). La valeur des paramètres géotechniques ainsi déterminées est donnée dans le tableau I.

La simulation de la mise en place des colonnes de sable au sein des massifs préalablement constitués vise à reproduire au mieux les conditions de mise en place réelles des colonnes ballastées [RAN 11]. Plus précisément, l'objectif est de reproduire l'expansion latérale du sol encaissant la colonne engendrée par l'effort de compactage appliqué sur le ballast lors de la mise en place. Le matériau utilisé pour modéliser le ballast est un sable de Loire

dont seule la fraction 1/1,25 mm a été utilisée. Les dimensions adoptées correspondent à un faible taux de substitution et à un matériau constitutif de la colonne de granulométrie grossière.

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques du Kaolin après pré-consolidation.

σ'_p (kPa)	c' (kPa)	φ' ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	E (kPa)	ν	$k_x=k_y$ (m/s)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	e_0
50	1	21	0	800	0,30	$3 \cdot 10^{-9}$	16,56	10,56	1,52

σ'_p la contrainte de pré-consolidation du Kaolin, c' et φ' sont la cohésion et l'angle de frottement drainés, ψ est l'angle de dilatance, E est le module de Young, ν le coefficient de poisson, k_x et k_y sont les coefficients de perméabilité, γ_{sat} et γ_{unsat} sont les poids volumiques saturé et non saturé, e_0 est l'indice des vides

3. Simulation numérique

Dans les deux modèles, la géométrie permet une modélisation axisymétrique. Le niveau de la nappe d'eau a été placé à la surface du sol. Les paramètres caractéristiques du sol (Kaolin) après pré-consolidation sont donnés dans le Tableau 1. L'état de contraintes initial est donné par le coefficient de poussée des terres au repos calculé par la formule de Jacky : $K_0 = 1 - \sin \varphi'$.

Le modèle élasto-plastique Mohr-Coulomb a été utilisé pour le sol entourant. Les conditions aux limites sont prises conformément aux conditions des essais au laboratoire [PHA 10]. Pour les conditions aux limites hydrauliques, toutes les parois du modèle, sauf celle de droite (imperméable et constituant la frontière du moule métallique), sont drainées (Figure 1).

Les résultats sont présentés sous forme adimensionnelle ; les surpressions interstitielles sous forme de rapport ($\Delta U/U_0$) où ΔU est la surpression interstitielle et U_0 la pression hydrostatique initiale avant renforcement, au milieu de l'échantillon (axe AA'). Les contraintes effectives horizontales sont données sous forme de rapport de contraintes (σ'_x/σ'_{x0}) où σ'_{x0} est la contrainte effective horizontale à l'état initial (au repos).

3.1 Modèle avec déplacement radial imposé

Dans ce modèle, les parois sont bloquées en déplacements normaux. Seule la paroi gauche est soumise à un déplacement horizontal imposé (Figure 1a). Puisqu'on s'intéresse uniquement aux effets de la mise en place sur le sol environnant, la colonne de sable n'est pas modélisée.

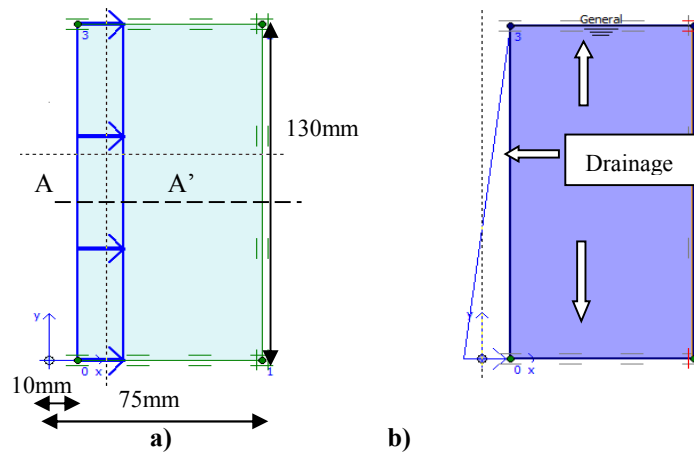


Figure 1. Modèle de calcul. a) déplacement imposé b) conditions hydrauliques

La mise en place de la colonne de rayon initial $r_0=10\text{mm}$ résultant d'un forage préalable, est modélisée en deux phases successives : une expansion radiale (où r_0 devient r_c) non drainée suivie d'une phase de consolidation. Cette expansion est simulée sous la forme d'un déplacement radial imposé (Figure 1a.). Cela conduit à une augmentation de la pression interstitielle qui va être dissipée au cours de la phase de consolidation qui suit et à une augmentation des contraintes effectives horizontales. Des valeurs différentes (10, 20, 30 et 70%) de l'expansion radiale (variation relative du diamètre) d'une colonne simulant sa mise en œuvre ont été utilisées pour l'étude de l'influence du taux d'expansion sur l'argile molle.

3.1.1 Résultats et discussion

Les résultats de la simulation sont présentés par les figures suivantes.

La Figure 2 illustre l'augmentation des contraintes horizontales effectives engendrées par les différentes expansions radiales, exprimée en termes du rapport (σ'_x/σ'_{x0}). Le rapport de contraintes s'accroît avec l'augmentation du taux d'expansion radiale. Ce rapport est plus important au voisinage de la colonne, il atteint 20, 34, 47 et 103 pour les taux de 10, 20, 30 et 70 % d'expansion. Il diminue légèrement quand on s'éloigne de l'interface de celle-ci, les valeurs atteintes au niveau de la paroi droite sont alors de 15, 28, 43 et 100.

Les courbes de la Figure 3 montrent que les rapports de surpressions interstitielles dans la phase de l'expansion radiale non drainée, atteignent des valeurs élevées. Les surpressions augmentent en fonction du taux de l'expansion radiale, elles sont plus importantes au voisinage de la colonne en effet, nous avons 176, 347, 519 et 1200 pour les taux de 10, 20, 30 et 70%. Ils diminuent légèrement vers la frontière droite pour atteindre 166, 331, 496 et 1160.

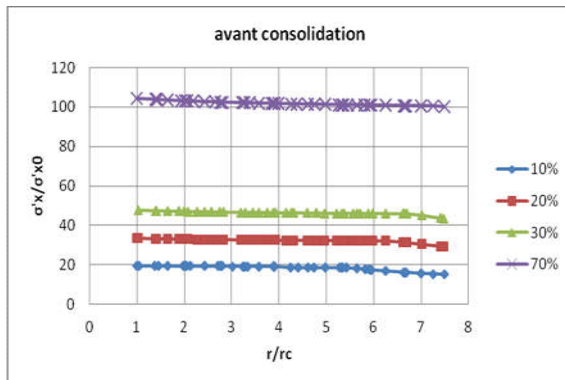


Figure 2. Variation du rapport de contraintes effectives horizontales en fonction de la distance adimensionnelle à la colonne avant consolidation pour différents taux d'expansion radiale (A-A')

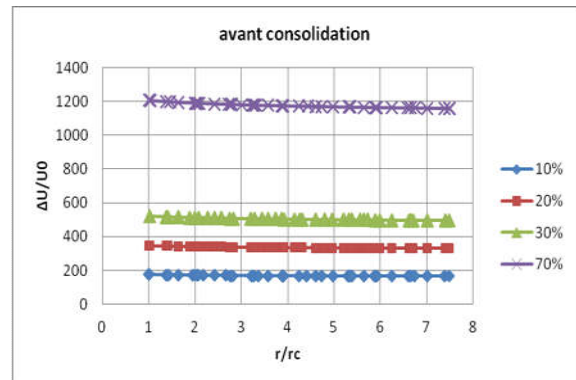
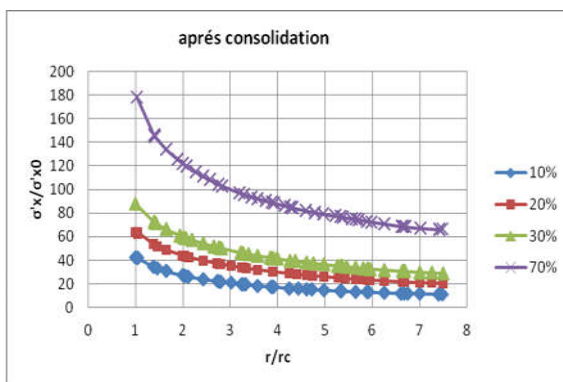
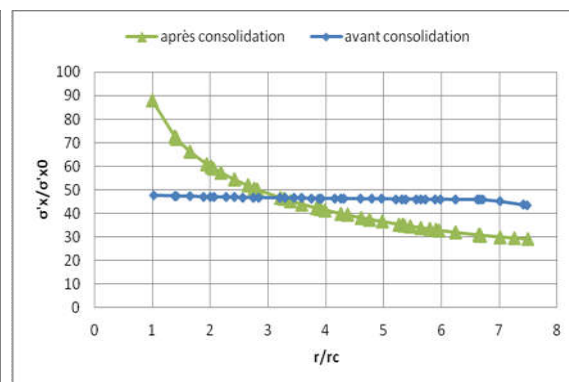


Figure 3. Variation du rapport de surpressions interstitielles en fonction du rapport de la distance adimensionnelle à la colonne avant consolidation (A-A')

Après la consolidation, le rapport de contraintes horizontales est plus important au voisinage de la colonne, il atteint 42, 64, 88 et 180 pour les taux de 10, 20, 30 et 70%. En s'éloignant de l'interface de celle-ci, il diminue jusqu'à 11, 20, 29 et 66 (Figure 4a).



a)



b)

Figure 4. Variation du rapport de contraintes effectives horizontales suivant l'axe A-A'

a) Après consolidation pour différents taux d'expansion radiale

b) comparaison avant et après consolidation (taux d'expansion = 30%)

La Figure 4b représente une comparaison entre le rapport de contraintes avant et après consolidation pour le taux d'expansion de 30%. Elle montre que ce rapport s'accroît au voisinage de la colonne, il passe de 69 à 120 après consolidation, par contre il diminue en s'éloignant pour atteindre 43 au lieu de 64. On remarque que la

consolidation augmente les contraintes horizontales au voisinage de la colonne. L'application de l'expansion radiale instantanée a pour effet d'augmenter les surpressions interstitielles. Au cours de la consolidation et suite à l'expulsion de l'eau, les surpressions inertielles se dissipent et les contraintes effectives horizontales augmentent.

La variation des rapports de surpressions interstitielles en fonction du temps (expansion 30%) est représentée par les Figures 5 et 6. Elle diminue rapidement dès le début de la consolidation. Cette diminution est plus rapide à la frontière de la colonne (point E) qu'au milieu de l'échantillon (point H) (Figure 5). Elles atteignent 519 à la frontière E et 503 au point H. La Figure 6 montre qu'au bout des 10 premières secondes, la diminution atteint 70%, elle devient moins rapide après jusqu'à atteindre des valeurs inférieures à 1 kPa (fin de la consolidation).

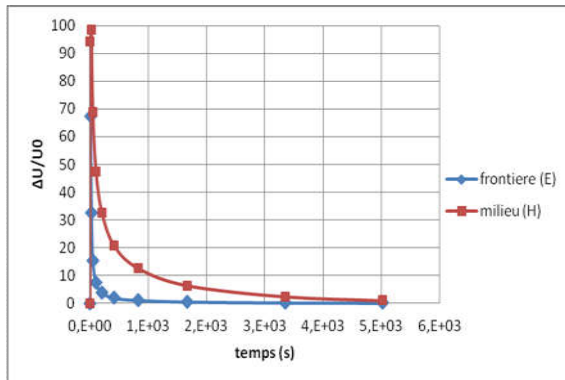


Figure 5. Variation de la surpression interstitielle en fonction du temps aux points E et H (expansion 30%)

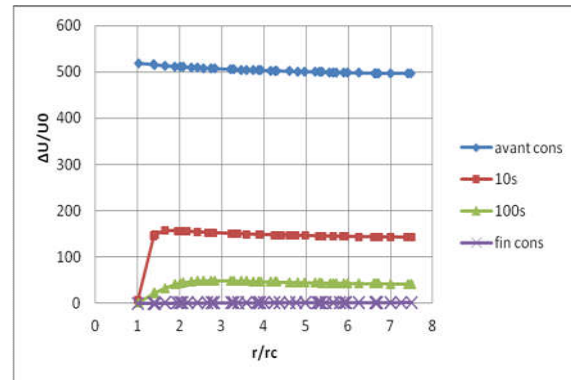


Figure 6. Variation de la surpression interstitielle en fonction du temps suivant l'axe A-A' (expansion 30%)

3.2 Modèle simulant la réalisation de la colonne par couches

Cette partie s'intéresse à la simulation numérique de la réalisation de la colonne de sable par couches de 20 mm et sous des contraintes de compactage différentes selon les étapes utilisées au laboratoire [PHA 10]. La configuration adoptée (géométrie, conditions aux limites) est identique à la précédente avec en particulier un diamètre initial de forage via un carottier pour la mise en place de la colonne de sable égal à 20 mm.

Tableau 2. Caractéristiques géotechniques du sable.

E (kPa)	c' (kPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	v	ψ ($^{\circ}$)	$k_x=k_y$ (m/s)
15000	1	37	0,33	7	10^{-2}

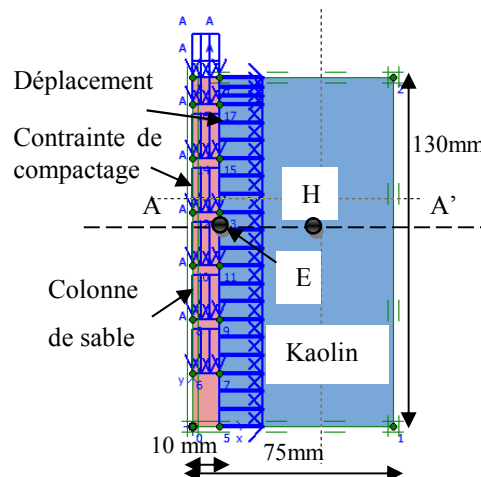


Figure 7. Modèle axisymétrique simulant la construction par couches

La réalisation de la colonne de sable est faite par couches de 20 mm. Après introduction de chaque couche de sable, on compacte cette dernière par un piston. Pour chaque couche, la contrainte de compactage est appliquée instantanément (« phase plastique ») et maintenue durant 900 secondes (« phase de consolidation »)

conformément aux essais de laboratoire [PHA 10]. Ces étapes sont répétées jusqu'à la réalisation de la colonne sur toute sa hauteur (Figure 7). Afin de caractériser les effets de l'intensité de la contrainte de compactage sur le sol environnant, trois différentes contraintes ont été utilisées dans la réalisation des colonnes : 73, 168 et 230 kPa. Les caractéristiques du sable constituant la colonne sont données dans le Tableau 2. Le comportement du sable est élasto-plastique et obéit au critère de plasticité de Mohr-Coulomb. Dans la simulation numérique pour simuler la présence du mini carottier au-dessus des couches de sable pendant le compactage de celles-ci, des déplacements très faibles sont imposés provisoirement à la frontière colonne/argile. La réalisation d'une couche est simulée par l'activation simultanée de cette couche et la désactivation du déplacement imposé à sa frontière (car le mini carottier est soulevé d'une hauteur égale à l'épaisseur de la couche réalisée).

3.2.1 Résultats et discussion

La Figure 8 représente la variation du taux d'expansion radiale (variation relative du diamètre) en fonction de la contrainte de compactage. Elle présente une comparaison entre les résultats obtenus par la simulation numérique et ceux obtenus expérimentalement. Elle montre que les résultats de la simulation numérique sont très proches des résultats expérimentaux. La variation relative du diamètre de la colonne augmente avec celle de la contrainte de compactage. Cette augmentation se traduit par une expansion radiale de la colonne.

La Figure 9 illustre la variation du rapport de contraintes effectives horizontales en fonction de l'éloignement de la colonne à la fin de la consolidation. Elle montre que les contraintes effectives horizontales augmentent avec l'accroissement de la contrainte de compactage. Elles sont plus importantes au voisinage de la colonne (30, 53 et 82) pour les contraintes de compactage de 73, 168 et 230 kPa. Elles diminuent en fonction de l'éloignement de celle-ci. Elles atteignent 10, 30, 40 au voisinage de la paroi droite.

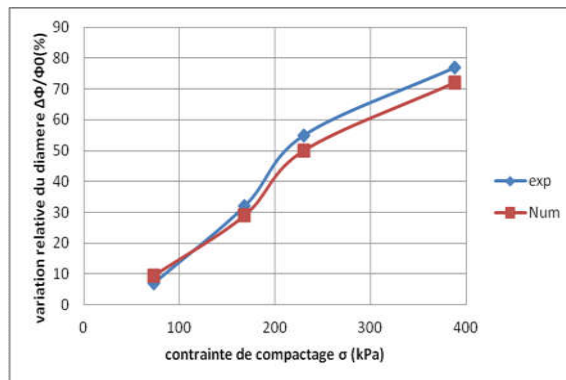


Figure 8. Variation relative du diamètre de la colonne suivant la contrainte de compactage

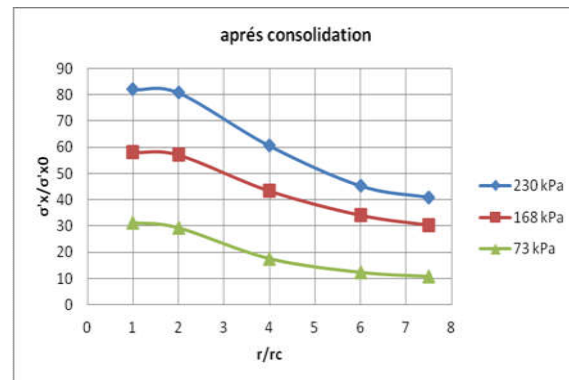
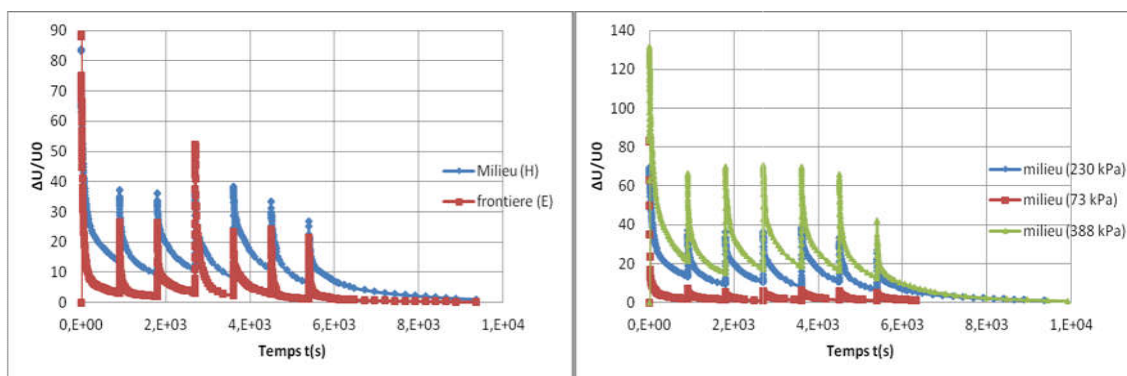


Figure 9. Variation du rapport de contraintes effectives horizontales en fonction de la distance r/r_c

La variation des surpressions interstitielles en fonction du temps est représentée par la Figure 10. La Figure 10a montre qu'à chaque étape de la construction de la colonne, les surpressions interstitielles augmentent dès l'application de la contrainte de compactage. Elles sont maximales dans la première étape où elles atteignent 89 à la frontière de la colonne (point E) et 84 au milieu de l'éprouvette (Point H). Dans les autres étapes, la valeur maximale est de 26 au point E et 36 au point H. Les surpressions interstitielles se dissipent rapidement au début de la consolidation dans chaque étape, ceci, plus rapidement à l'interface (point E) qu'au milieu de l'éprouvette (point H).

La Figure 10b représente une comparaison de la variation des surpressions interstitielles en fonction du temps pour trois contraintes de compactage différentes 73, 230 et 388 kPa. Elle montre que les surpressions interstitielles augmentent avec l'accroissement de la contrainte de compactage. Dans la première étape, les surpressions interstitielles sont maximales dès l'application de la contrainte de compactage sur la première couche, elles atteignent 84, 85 et 124 pour les contraintes de 73, 230 et 388 kPa. Durant les autres étapes de construction, les surpressions interstitielles moyennes augmentent au début de l'application de la contrainte de compactage à 7, 34 et 70. Ces contraintes finissent par se dissiper au cours de la consolidation. Le temps de fin de consolidation (<1 kPa) augmente avec la contrainte de compactage, il est de 6330, 9370 et 9920 secondes pour les contraintes 73, 168 et 388 kPa.



a)

b)

Figure 10. Variation des surpressions interstitielles en fonction du temps

a) à la frontière sol/colonne et au milieu de l'éprouvette pour $\sigma_{com}=230$ kPa

b) au milieu de l'éprouvette, pour $\sigma_{com}=73$ kPa, $\sigma_{com}=230$ kPa et $\sigma_{com}=388$ kPa

La Figure 11 représente la variation du rapport de surpressions interstitielles en fonction du temps pour les deux simulations (expansion 30%). Afin de mieux représenter les détails de la variation, la figure montre les courbes pour l'intervalle de rapport de contraintes entre 0 et 50. Dans les deux simulations, les surpressions interstitielles maximales sont obtenues dans la première phase (phase plastique). Elles atteignent 503 dans la simulation par déplacement imposé et 83 dans la simulation par couche. Dans la première simulation, la surpression interstitielle se dissipe (<1 kPa) après 5300 secondes. Dans la simulation par couche, les surpressions interstitielles augmentent dès l'application de la charge de compactage pour chaque couche, à un rapport moyen de 25, elles dissipent au cours de la consolidation (9370 secondes).

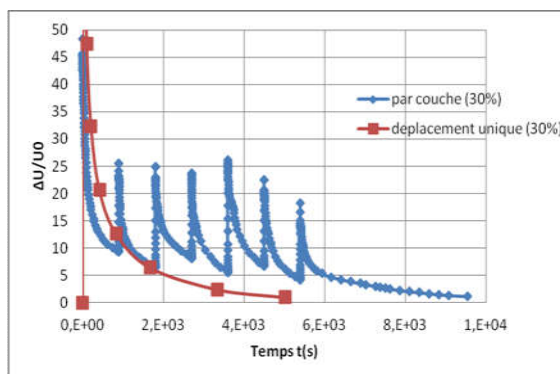


Figure 11. Variation des surpressions interstitielles en fonction du temps (expansion 30%)

La comparaison des rapports de contraintes effectives horizontales (expansion 30%) après consolidation, dans les figures 9 et 4b, montre que ce rapport est plus important au voisinage de la colonne pour le cas de déplacement radial imposé. En s'éloignant de la colonne les contraintes sont presque identiques. Dans la première simulation, les contraintes effectives augmentent au cours de la consolidation. Dans la simulation par couche, elles augmentent progressivement dans chaque étape jusqu'à atteindre leurs valeurs finales.

4. Conclusion

Dans ce travail, deux méthodes de simulation numérique de l'effet de la mise en place des colonnes ont été utilisées. Dans la première partie, la mise en place est modélisée en tant qu'expansion radiale uniforme sur toute la longueur de la colonne en imposant un déplacement radial. Différents taux d'expansion radiale ont été adoptés. Les résultats obtenus dans cette partie ont montré que les surpressions interstitielles et les contraintes horizontales augmentent avec l'accroissement du taux de l'expansion radiale. Les surpressions interstitielles augmentent brusquement dès l'application de l'expansion radiale, elles se dissipent rapidement dans un premier temps et continuent à se dissiper tout le long de la consolidation. Les contraintes effectives horizontales

s'accroissent proportionnellement aux taux de l'expansion radiale. Elles atteignent leur valeur maximale au voisinage de la colonne.

La deuxième partie consiste en une simulation des essais avec la prise en compte de la réalisation de la colonne par couches sous différentes contraintes de compactage. La confrontation des résultats obtenus par simulation numérique avec les résultats expérimentaux a permis de valider le modèle utilisé. Les résultats obtenus ont montré que :

- A chaque phase de réalisation, les surpressions interstitielles augmentent dès l'application de la charge de compactage et finissent par se dissiper au cours de la consolidation.
- Les contraintes effectives horizontales et le taux d'expansion radiale des colonnes, augmentent proportionnellement avec les contraintes de compactage.

5. Bibliographie

- [BLA 06] BLACK J., SIVAKUMAR V., MADHAV M., MCCABE B., « An Improved Experimental Test Set-up to Study the Performance of Granular Columns », *Geotechnical Testing Journal*, vol.29, n° (3), 2006, p.193-199.
- [BLA 07] BLACK J., SIVAKUMAR V., MCKINLEY J.D., « Performance of clay samples reinforced with vertical granular columns », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 44, n° (1), 2007, p.89-95.
- [CAS 10] CASTRO J., KARSTUNEN M., « Numerical simulations of stone column installation », *Canadian Geotechnical Journal*, vol.47, n° (10), 2010, p.1127–1138.
- [COR 07] CORNEILLE S., Etude du comportement mécanique des colonnes ballastées chargées par des semelles rigides, Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 2007.
- [DHO 05] DHOUB A., BLONDEAU F., *Colonnes Ballastées*, Paris, Presses de l'École National des Ponts et Chaussées, 2005.
- [ELS 06] ELSHAZLY H.A., HAFEZ D., MOSAAD M., « Back calculating vibro-installation stresses in stone columns reinforced grounds », *Proceedings of ICE-Ground improvement*, Vol.10, n° (2), 2006, p. 47–53.
- [ELS 08] ELSHAZLY H., ELKASABGY M., ELLEBOUDY A., « Effect of intercolumn spacing on soil stresses due to vibro-installed stone columns: interesting findings », *Geotechnical and Geology Engineering*, vol.26, n° (2), 2008, p. 225–236.
- [GUE 07] GUETIF Z., BOUASSIDA M., DEBATS J.M., « Improved Soft Clay Characteristics Due to Stone Column Installation », *Computers and Geotechnics*, vol. 34, n° (2), 2007, p.104-111.
- [KIR 06] KIRSCH F., « Vibro stone column installation and its effect on ground improvement », *Proceedings of the International Conference on Numerical Modeling of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment*. Bochum, 2006, Germany, Taylor and Francis, p. 115–124.
- [NGU 08] NGUYEN N.-T, Modélisation du comportement des fondations profondes dans les argiles molles, Thèse de doctorat, institut polytechnique de Grenoble, 2008.
- [PHA 10] PHAN V.T.P., Renforcement des sols compressibles par colonnes ballastées, Thèse de doctorat, Université Européenne de Bretagne – INSA de Rennes, 2010.
- [RAN 11] RANGEARD D., PHAN V.T.P., LAMBERT S., MARTINEZ J., « Densification de sols fins compressibles par colonnes ballastées : influence du mode de mise en place », *INVACO2 : Séminaire International, innovation & valorisation en Génie civil & Matériaux de construction*, Rabat, 23-25 Novembre 2011, Maroc, N° : 50-352.
- [SIV 04] SIVAKUMAR V., MCKELVEY D., GRAHAM J., HUGHES D., « Triaxial tests on model sand columns in clay », *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, 2004, p. 299-312.
- [SIX 06] SIX V., Analyse du comportement des colonnes ballastées : influence des conditions initiales, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2006.