

PRISE EN COMPTE DE L'EFFET DE LA MISE EN PLACE DANS LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE EN 3D DES COLONNES BALLASTÉES DANS L'ARGILE MOLLE

NGOC-THANH NGUYEN, PIERRE FORAY, ETIENNE FLAVIGNY

Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire Sols Solides Structure Risques,
Domaine Universitaire, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9. E-mail: tnguyen@geo.hmg.inpg.fr

Résumé: Cet article présente une comparaison des modélisations numériques du comportement de renforcements de sols argileux par des colonnes ballastées. La simulation numérique a été effectuée en 2D, puis en 3D. On s'est particulièrement intéressé à la prise en compte de la mise en place des colonnes. En effet, dans la pratique, sous l'effet de l'expansion de la colonne, le sol situé autour de celle-ci subit une compactage latérale et les contraintes horizontales se trouvent augmentées. Cette expansion latérale de la colonne ballastée peut être simulée numériquement. On montre comment, grâce à cette expansion, le tassement d'un ouvrage sur colonnes ballastées est nettement diminué.

Abstract: This paper presents a comparison of numerical modelling of the behaviour of reinforcements in the form of stone columns in very soft clay. The simulation is run using the software finite elements Plaxis, first in 2D, then in 3D. We are particularly interested in taking into account the application of the columns in modelling. Indeed, in practice, due to the expansion of the column, the ground in its close vicinity undergoes a lateral compaction and the horizontal stresses are increased. This lateral expansion of the stone column can be simulated numerically, with the values of volume deformation which correspond to those observed in practice, and which can be connected with those usually adopted for the ratio between the modulus of the column and the reinforced ground. It is shown that this expansion induces a significant decrease in the stone columns.

1. INTRODUCTION

Le renforcement des sols par des colonnes ballastées est une méthode de plus en plus utilisée en génie civil dans la conception des ouvrages situés sur des sols mous, notamment en ce qui concerne les remblais, les fondations des réservoirs et les ouvrages ayant des charges moyennes. Les méthodes de dimensionnement et les justifications de calculs de ce type de fondation ont été proposées par plusieurs auteurs dont PRIEBE [10], DHOUIB et al. [4], DHOUIB et BLONDEAU [3], DEBATS et al. [5]. La modélisation numérique est une alternative simple et efficace pour l'approche du comportement réel des sols renforcés par colonnes ballastées.

Un des aspects cruciaux à prendre en compte au niveau de la modélisation est celui de l'effet de la mise en place des colonnes sur le comportement global du sol renforcé, surtout avec des groupes comportant un grand nombre de colonnes ballastées. Dans la pratique, sous l'effet du compactage de la colonne, le sol situé

autour de celle-ci subit une expansion latérale et les contraintes horizontales se trouvent augmentées. On s'intéresse ici à la modélisation numérique tridimensionnelle des colonnes en prenant en compte l'influence de leur mise en place.

L'article présente d'abord des modélisations en 3D (avec Plaxis 3D Foundation) d'une cellule élémentaire de colonne ballastée en étudiant l'effet des paramètres du sol et de la colonne. Outre la simulation de la mise en œuvre des colonnes par une expansion latérale de type pressiométrique, on a analysé l'influence dans la modélisation numérique de facteurs comme l'espacement. On présente ensuite la modélisation des groupes et enfin, celle d'un cas réel en 3D.

2. SIMULATION DE LA MISE EN PLACE

2.1. PRINCIPE DE MODÉLISATION DE MISE EN PLACE

Actuellement, il y a très peu de littérature concernant la modélisation de la mise en place des colonnes ballastées. DEBATS et al. [5] ont présenté des modélisations de colonne en axisymétrie et l'étude de l'influence des expansions latérales par la donnée des valeurs de déformation latérale de la colonne. La plupart des auteurs considère une cellule élémentaire dans laquelle on affecte arbitrairement un changement de la valeur K ($K = \sigma'_h / \sigma'_v$) dans une couronne de sol autour de colonne. En axisymétrie, on peut modéliser une cellule élémentaire en simulant l'effet de la mise en place selon les 3 approches suivantes:

- (i) en augmentant arbitrairement la valeur des contraintes horizontales initiales (en jouant sur K_0),
- (ii) en appliquant un pré-chargement à la colonne en supposant qu'elle est constituée d'un matériau parfaitement élastique (DEBATS et al. [5]),
- (iii) en utilisant une valeur de déplacement radial pour simuler l'expansion latérale des colonnes ballastées.

On a effectué des modélisations en suivant ces trois méthodes, mais dans cet article on se concentre sur les modélisations en 3D simulant la mise en place par une expansion radiale, car il est plus proche de la réalité.

2.2. MODÈLE EN 3D CELLULE ÉLÉMENTAIRE

La cellule élémentaire 3D comprend une colonne ballastée au centre et un volume de sol environnant, avec la simulation de l'expansion latérale indiquée sur la figure 1. Les paramètres du sol, de colonnes et de béton sont illustrés dans le tableau 1. Le modèle utilisé pour le sol et la colonne ballastée est de type Mohr–Coulomb.

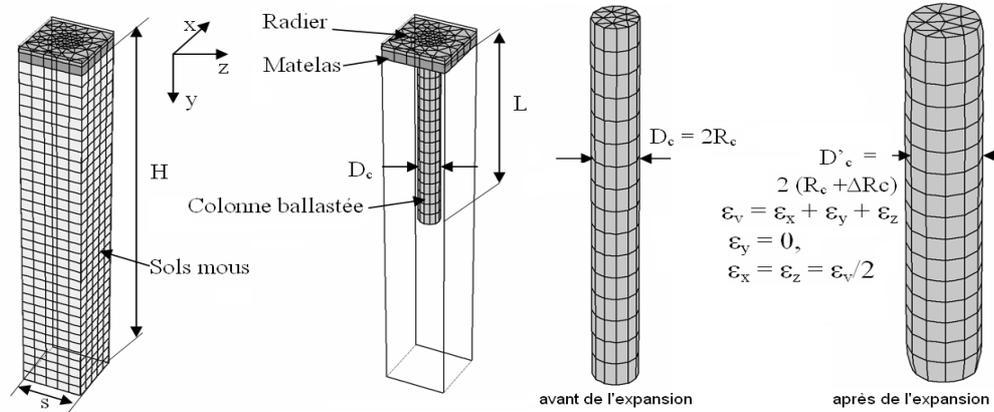


Fig. 1. Modélisation d'une cellule élémentaire avec d'une colonne au centre

On réalise la modélisation de cellules élémentaires de colonne ballastée ayant des dimensions différentes (2 m × 2 m, 2,5 m × 2,5 m, 3 m × 3 m et 4 m × 4 m et puis 6 m × 6 m) et des longueurs des colonnes différentes. Le diamètre de la colonne est supposé constant et égal à 1 m. On a toujours gardé en tête de colonne un matelas de 50 cm d'épaisseur, supportant un dallage béton de 20 cm d'épaisseur et une charge de 50 kPa. Les rapports d'élancement de la colonne (longueur sur diamètre) sont de 10, de 15 et de 20.

Tabela u 1

Paramètres du sol, des colonnes, et du béton

Couches	Modèle	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ' (degré)	E (MPa)	ν	ψ (degré)
Colonnes	MC	20	1	38	100	0,25	8
Sol	MC	17	1	33	5	0,25	–
Béton	LE	25	–	–	30 000	0,20	–

Des valeurs différentes de l'expansion radiale d'une colonne ($\varepsilon_r = 2\varepsilon_x = 2\varepsilon_z$, $\varepsilon_y = 0$, figure 1) simulant sa mise en œuvre (0%, 2,5%, 5%, 7,5% et 10%, 15%) ont été utilisées pour l'étude de l'influence de ces expansions sur le comportement de la colonne dans l'argile molle. La figure 2 illustre l'augmentation des contraintes horizontales engendrées par des expansions radiales différentes (2,5%, 5% et 15%), exprimée en termes du rapport K/K_0 .

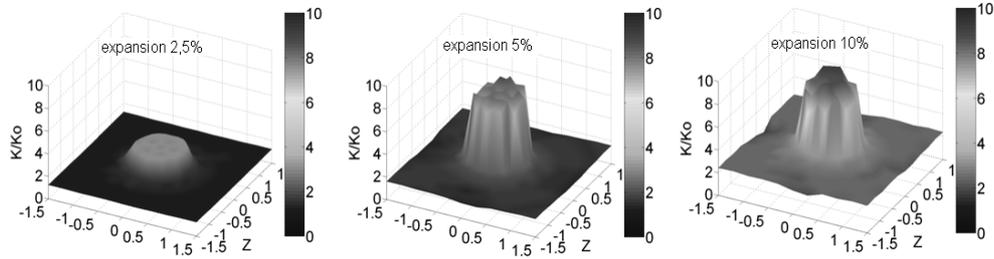


Fig. 2. Augmentation des contraintes horizontales engendrées par l'expansion latérale

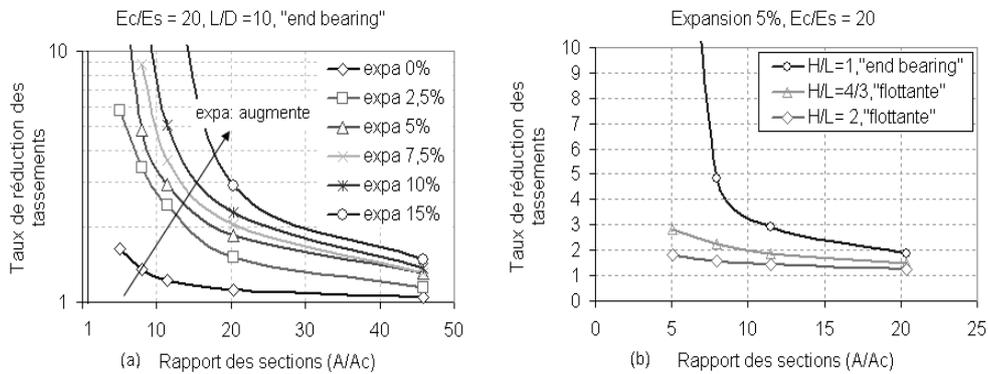


Fig. 3. Taux de réduction des tassements

La figure 3a présente les taux de réduction des tassements calculés (rapport du tassement avec colonne à celui sans colonne) en fonction du rapport des sections A/A_c , avec A : section du sol renforcé et A_c : section de la colonne, pour différentes valeurs de l'expansion radiale. On vérifie l'influence importante du rapport des sections (A/A_c): s'il est grand ($A/A_c \geq 20$), le facteur de réduction du tassement est très faible, cependant, si l'on diminue le rapport des sections ($A/A_c \leq 10$), le facteur de réduction du tassement augmente rapidement. On montre clairement que la prise en compte de l'expansion latérale nous conduit à une augmentation de taux de réduction des tassements. Par contre, si on ne prend pas en compte cet effet, les résultats obtenus conduisent à un renforcement nul sauf lorsque $A/A_c \leq 10$, ce qui correspond à un entraxe inférieur à $3D_c$. Le taux de réduction des tassements est encore beaucoup plus faible lorsqu'on modélise le comportement des colonnes «flottantes». En pratique, le rapport des sections A/A_c est souvent de l'ordre 10 (l'entraxe des colonnes est d'environ $3D_c$ (D_c : diamètre de colonne)). Si l'on considère que l'efficacité du renforcement est obtenue pour un taux de réduction des tassements supérieur ou égal à 3, la figure 3b montre que cette situation est obtenue avec une expansion radiale de l'ordre de 5%.

2.3. DISCUSSION SUR LE RÔLE DE L'AUGMENTATION DE LA CONTRAINTE HORIZONTALE

La simulation de la mise en place des colonnes ballastées par une expansion radiale de colonne nous permet de vérifier l'augmentation des contraintes horizontales dans le sol et la nette diminution du tassement. En pratique, on peut trouver des valeurs d'expansion latérale jusqu'à 10%, la valeur de K/K_0 peut être égale de 1,5 à 2, KIRSCH [7].

Si l'on a fait une expansion radiale 5% de la colonne avec $A/A_c = 11,46$ (entraxe 3D), on trouve que la valeur K/K_0 au bord de colonne est d'environ 4 mais décroît très vite jusqu'à une valeur d'environ 1,6 au bord de cellule, ce qui correspond à une moyenne de l'ordre de 2. Pour un sol normalement consolidé ($K_0 = 0,5$), ceci donne une valeur de K après mise en place voisine de 1, en accord avec HANDY [9]. Ainsi, on constate que l'expansion radiale de 5% est une valeur très raisonnable, donnant une augmentation du rapport K/K_0 de l'ordre de 2.

3. GROUPE DE COLONNES BALLASTÉES

On a effectué des modélisations de groupes de 9, 13 et 25 colonnes ballastées avec une largeur de radier constante égale à $B_s = 10$ m et ensuite des groupes de 4, 9, 16 colonnes mais avec des largeurs de radier respectivement égales à 4, 6 et 8 m (avec un entraxe de colonnes égal à 2D). Les caractéristiques du sol sont celles données dans le tableau 1. Les colonnes ont 1m de diamètre et 10 m de longueur, avec un rapport $H/L = 2$ (colonnes « flottantes »). L'expansion radiale est constante, égale à 5%.

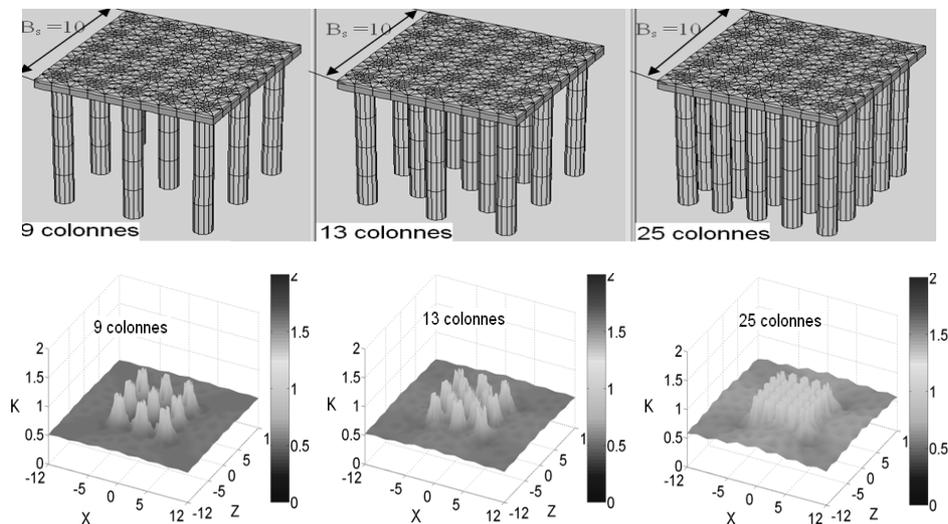


Fig. 4. Contrainte horizontale dans le sol avec un groupe de 9, 13 et 25 colonnes

La figure 4 illustre dans le premier cas l'effet de l'expansion latérale des colonnes dans un plan horizontal situé à 5m de profondeur, à mi-hauteur des colonnes. Elle montre bien l'interaction entre les colonnes produite par l'expansion, avec, pour le groupe de 25 colonnes, un doublement de la contrainte horizontale dans la zone de sol renforcé. Le même mécanisme est aussi simulé pour les groupes de 9 et 13 colonnes, mais il est plus localisé autour des colonnes.

Grâce à la simulation de l'expansion radiale, le taux de réduction de tassement est nettement augmenté, passant de 1,14 sans expansion à 1,67 avec expansion (pour le cas de 25 colonnes). Avec une largeur du radier constante ($B_s = 10$ m), si on augmente le nombre de colonnes dans le groupe, le taux de réduction des tassements croît lentement dans le cas sans expansion, mais augmente rapidement pour une expansion radiale de 5% (figure 5a). On a aussi effectué des comparaisons de calculs à court terme (ND) et à long terme (D) avec des groupes de colonnes (figure 5b). Le taux de réduction des tassements à court terme est supérieur à celui à long terme. Il augmente rapidement avec le nombre des colonnes et se stabilise au-delà de 9 colonnes. Ceci est lié au fait que les colonnes centrales supportent des charges moins importantes que celles aux bords.

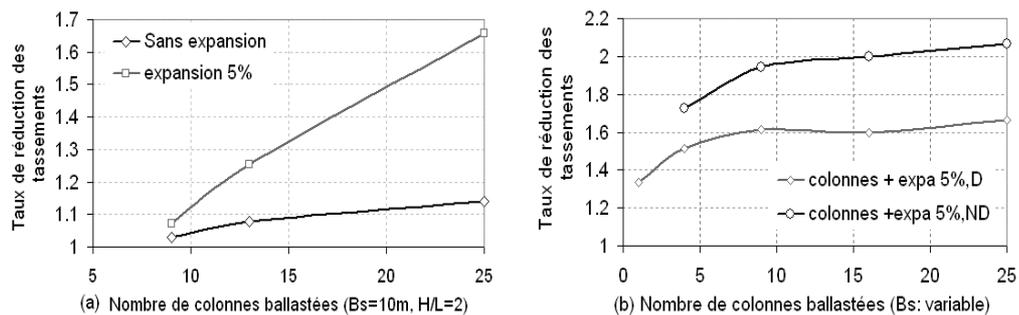


Fig. 5. Taux de réduction des groupes de colonnes:
a) B_s : constant, b) B_s : variable

4. CONFRONTATION AVEC DONNEES DE TERRAIN

On a effectué la modélisation d'un réservoir de 15 m de diamètre reposant sur 42 colonnes ballastées de 0,75 m du diamètre traversant environ 7 m de sols compressibles avec un chargement de 46 kPa. Ce cas a été présenté par DHOUIB et BLONDEAU [3]. Les propriétés des sols sont données dans le tableau 2. On a effectué une modélisation tridimensionnelle des 42 colonnes après avoir étudié le comportement d'une cellule élémentaire.

Tableau 2

Paramètres des sols sous le réservoir, d'après DHOUB et BLONDEAU [3]

Profondeur (m)	Contraintes (kPa)	Module des sols E_s (MPa)	Coef. de Poisson ν	Autres paramètres
0,0 – 2,0	p_1^* moyen	8		
2,0 – 2,5	retenu: 225	180		
2,5 – 3,5	(kPa)	2	0,33	$\varphi_s = 0$ (degré)
3,5 – 4,5	donc	5		
4,5 – 6,5	$c_u \approx 45$ kPa	2		
6,5 – 7,5		8		
Colonnes ballastées	$\sigma_c = 470$ (kPa)	$E_c = 100$ (MPa)	0,25	$\varphi'_c = 38$ (degré) $\psi_c = 38$ (degré)

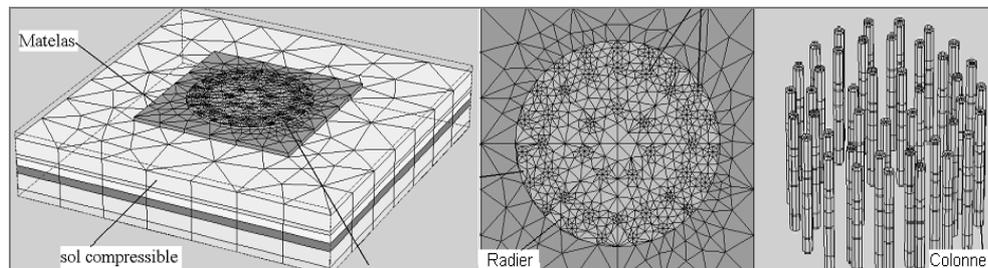


Fig. 6. Modélisation d'un groupe de 42 colonnes ballastées et cellule élémentaire

On étudie l'augmentation des contraintes horizontales pour quatre valeurs de K dans la cellule élémentaire ($K = \sigma'_h / \sigma'_v$):

- (i) $K_0 = 0,5$ (sols normalement consolidé);
- (ii) $K = 1$;
- (iii) $K = 1,5$;
- (iii) $K = 2$.

Grâce à l'augmentation de la valeur de K , on trouve que le tassement diminue. Par la suite, on considère toujours une cellule élémentaire mais en attribuant une valeur de l'expansion latérale de 5%. Avec $K = 2$ ou avec 5% d'expansion latérale, on obtient des tassements plus proches de ceux mesurés (figure 7).

On a effectué la modélisation tridimensionnelle de trois cas différents: sans colonnes, avec les 42 colonnes sans expansion, et avec les 42 colonnes en utilisant l'expansion de 5%. Lorsque l'expansion radiale de la colonne est prise en compte, le tassement du radier est nettement diminué et approche le tassement mesuré (9 mm) (14 mm pour la cellule élémentaire et 12 mm pour le groupe des 42 colonnes). Par contre, les tassements sans colonnes ou avec 42 colonnes sans expansion sont respectivement de 34 et 22,7 mm. Nos résultats sont proches du tassement mesuré si

l'on compare avec les observations de DHOUB [4] (tableau 3). On constate que si l'on ne prend pas en compte l'effet de la mise en œuvre, la réduction de tassement calculée due aux colonnes n'est que de 30%, alors que la modélisation de l'effet de la mise en œuvre entraîne une réduction de tassement de 70%, très proche de celle observée dans la réalité.

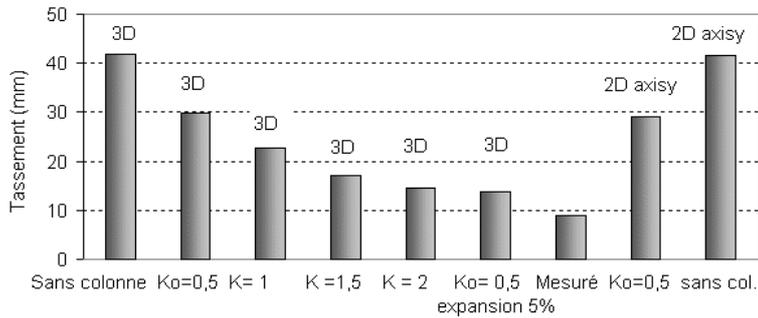
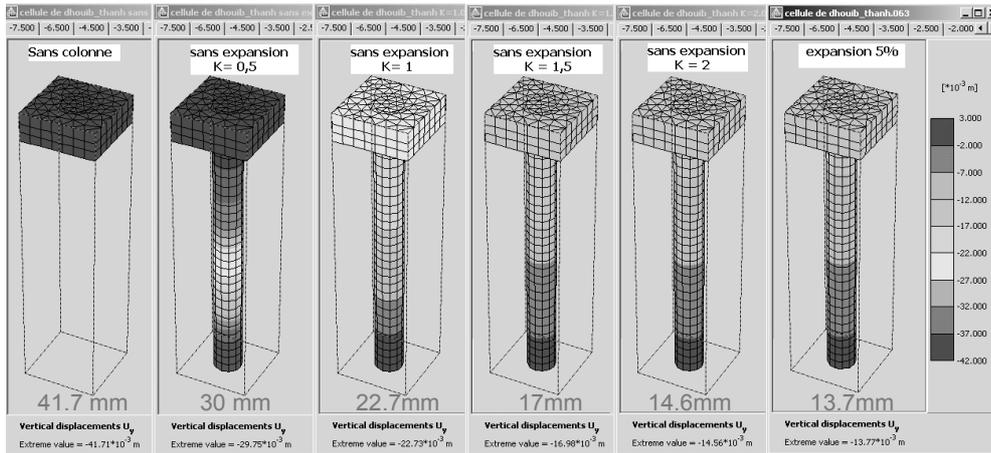


Fig. 7. Tassement d'une cellule élémentaire avec différentes valeurs de K et d'expansion

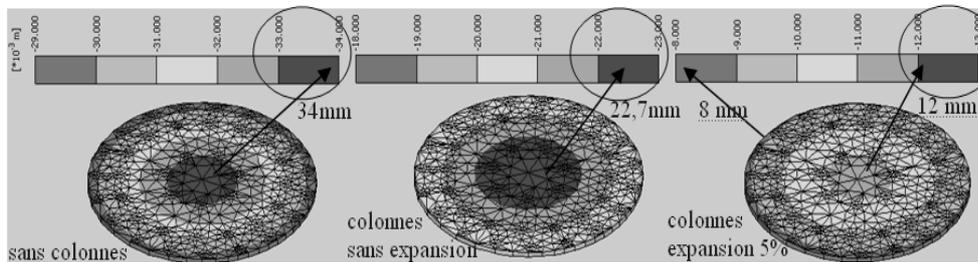


Fig. 8. Tassement du radier de réservoir

Tableau 3

Tassement du radier pour différentes approches

Méthode	Tassement (cm)	Remarque
Avant traitement	8,5	
Mesuré (Keller)	0,9 (centre) et 0,5 (bord)	
Méthode de PRIEBE [10]	1,95	Réf. DHOUB et al. [4]
Homogénéisation	2,10	
MATTES et POULOS [11]	1,40	
Règle Ménard	1,40	
Modélisation EF MC (DHOUB et al. [4])	2,35	
BAUMANN et BAUER [1]	4,50	
Sans colonne	3,40 (centre)	
Avec de 42 colonnes, sans compte mise en œuvre	2,27 (centre)	Plaxis 3DF
Avec de 42 colonnes et de prenant en compte mise en œuvre	1,2 (centre) et 0,8 (bord)	

5. CONCLUSIONS

La modélisation d'ouvrages reposant sur des colonnes ballastées doit prendre en compte la mise en place de celles-ci. Cette insertion se traduit par une expansion radiale de la colonne et une augmentation des contraintes horizontales. Les modélisations effectuées montrent que :

- Une expansion radiale de 5% conduit à un rapport de contrainte K égal à 2. Ces valeurs permettent de reproduire correctement le tassement observé sur un réservoir. D'autres modélisations, non exposées ici, conduisent à des résultats similaires.

- Si nous ne prenons pas en compte l'effet de la mise en œuvre, la réduction de tassement calculée due à la présence des colonnes n'est que de 30% (β de l'ordre de 1,3), alors que la modélisation de l'effet de la mise en œuvre entraîne une réduction de tassement de 70% (β de l'ordre de 3), très proche de celle observée expérimentalement.

REFERENCES

- [1] BAUMANN V., BAUER G.E.A., *The performance of foundation on various soils stabilized by the vibro-compaction method*, Canadian Geotechnical Journal, 1974, Vol. 11, No. 4, 509–530.
- [2] BRINKGREVE et al., *Plaxis 3D Foundation*, Manuels Plaxis 3DF Version 1.5. 2005, <http://www.plaxis.nl/>
- [3] DHOUB A., BLONDEAU F., *Colonnes ballastées*, Presses de ENPC, Paris, 2005, 264 p.
- [4] DHOUB A. et al., *Méthode de Priebe: Origine Développement et application*, ASEP-GI 2004, Presses de l'ENPC-LCPC. Paris, 2004, Vol. 1, 131–146.
- [5] DEBATS J.-M. et al., *Etat de la recherche entreprise dans la modélisation sous Plaxis de la mise en œuvre de colonnes ballastées dans une argile molle*, Journée de Plaxis, Paris, 2006.

- [6] DTU 13.2 (Norme NF P. 11-212), *Fondations profondes: colonnes ballastées*, Chap. VIII. Paris, 1978, 57–59.
- [7] KIRSCH, *Experimentell und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Rüttelstopfsäulengruppen*, Thèse, citée par Gäb (2005) «Numerical modelling of stone columns», séminaire W(h)ydoc05, Paris, 2004.
- [8] FLAVIGNY E., NGUYEN N.T., SANCHEZ P., *Modélisation de colonnes ballastées*, Journée de Plaxis, 2006, 16 Mai, Paris.
- [9] HANDY R.L., *Does lateral stress really influence settlement*, ASCE Journal of geotechnical and environmental engineering, 2001, Vol. 127, Issue 7, 623-626.
- [10] PRIEBE H.J., *The design of vibro-replacement*, Ground Engineering, Keller Grundbau, 1995, Technical paper, 12–61.
- [11] MATTES N.S., POULOS H.G., *Settlement of single compressible pile*, Journal of the soil mechanics and foundation division, 1969, No. 95(1), 189–207.
- [12] NGUYEN N.T., FORAY P., FLAVIGNY E., *Prise en compte de l'effet de la mise en place dans la modélisation numérique en 3D des colonnes ballastées dans l'argile molle. Calcul 2D ou 3D?* Présentation du CFMS, Paris, le 14 Mars, 2006.