

Modélisation numérique 3D de colonnes ballastées et application

3D numerical modeling of stone columns and application

P. Foray, E. Flavigny, Ngoc-Thanh Nguyen

Laboratoire Sols Solides Structures-Risques, INP, UJF, CNRS Grenoble, France

S. Lambert

KellerFrance, Entzeim, France

L. Briançon

CNAM- Géotechnique, Paris, France

ABSTRACT

This paper presents a comparison of numerical modelling of the behaviour of reinforcements by stone columns in very soft clay. The simulation uses the software finite elements Plaxis in 3D. Emphasis is given in taking into account the installation of the columns. Indeed, in practice, under the effect of the compaction of the column, the surrounding soil undergoes a lateral expansion and a corresponding increase occurs in the horizontal stresses. This lateral expansion of the stone column can be simulated numerically, with values of volumetric strains in the range of those observed in practice, and which can be related to those usually adopted for the ratio between the moduli of the column and the reinforced ground. It is shown that this expansion induces a significant decrease in the settlement of the stone columns.

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 3D en utilisant le logiciel Plaxis. 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 du compactage de la colonne, le sol situé autour de celle-ci subit une expansion 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.

Keywords: Stone columns, soft clay, factor of reduction of settlements, numerical modeling.

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 ce type de fondation ont été proposées par plusieurs auteurs dont Priebe (1995), Dhouib et al. (2004), Dhouib et Blondeau (2005), Debats et al. (2003). La modélisation numérique est une alternative simple et efficace pour l'approche du comportement réel des sols renforcés par colonnes ballastées (Nguyen et al., 2007).

Un des aspects cruciaux à prendre en compte au niveau de la modélisation est 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'espace. On présente ensuite la modélisation d'un groupe de 25 colonnes ballastées. La méthodologie est appliquée ensuite à un cas réel et des mesures sur site confirment l'augmentation des contraintes horizontales lors de la mise en place.

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. (2003), Guetif et al. (2007) ont présenté des modélisations d'une colonne en axisymétrie en appliquant une expansion latérale du sol entourant la colonne. La plupart des auteurs considère une cellule élémentaire dans laquelle on affecte arbitrairement un changement de la valeur K ($K = \sigma'_h / \sigma'_v$, rapport des contraintes horizontales et verticales) dans une couronne de sol autour de la colonne ballastée.

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., 2003),
- (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 (Nguyen et al. 2007 ; Nguyen, 2008) mais dans cet article on se concentre sur les modélisations numériques en 3D simulant la mise en place par une expansion radiale, car ce mécanisme semble le plus proche de la réalité, l'augmentation de K étant une conséquence du compactage de la colonne ballastée.

2.2 Modèle en 3D d'une 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 la colonne et du béton sont illustrés dans le Tableau 1. Le modèle de comportement utilisé pour le sol et la colonne ballastée est de type Mohr Coulomb.

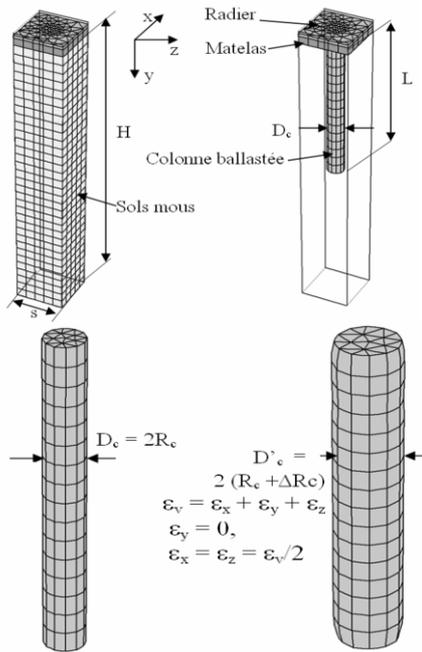


Figure 1 . Modélisation d'une cellule élémentaire avec une colonne au centre et définition de l'expansion radiale

On réalise la modélisation de cellules élémentaires de colonne ballastée ayant des dimensions différentes (2 m x 2 m, 2,5 m x 2,5 m, 3 m x 3 m et 4 m x 4 m et puis 6 m x 6 m) et des longueurs de 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

Tableau 1: Paramètres du sol, des colonnes, et du béton

Type	Modèle	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)	ν (-)	ψ (°)
Colonne	MC	20	1	38	100	0,25	8
Sol	MC	17	1	33	5	0,25	-
Béton	LE	25	-	-	30 000	0,20	-

Différents valeurs de l'expansion radiale de la colonne ($\epsilon_v = 2\epsilon_x = 2\epsilon_z$, $\epsilon_y = 0$, figure 1) sont employées pour simuler la mise en place : 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, et 15% ; on étudie ainsi l'influence de l'expansion sur le comportement de la colonne dans un sol représentant une argile molle.

La figure 2 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 , où A est la section du sol renforcé et A_c la section de la colonne, pour différentes valeurs de l'expansion radiale. Elle concerne des colonnes non flottantes. On vérifie l'influence importante du rapport des sections (A/A_c) : s'il est grand ($A/A_c > 20$), le facteur de réduction du tassement est très faible ; par contre, si l'on diminue le rapport des sections ($A/A_c < 10$), le facteur de réduction du tassement augmente rapidement. On montre clairement que la prise en compte de l'expansion latérale conduit à une augmentation de taux de réduction des

tassements. Si l'on ne prend pas en compte cet effet, les résultats obtenus conduisent à un renforcement nul sauf lorsque $A/A_c < 10$, ce qui correspond à un entraxe inférieur à $3D_c$ (D_c : diamètre de colonne).

En pratique, le rapport des sections A/A_c est souvent de l'ordre 10 (l'entraxe des colonnes est d'environ $3D_c$). Si l'on considère que l'efficacité du renforcement est obtenue pour un taux de réduction des tassements supérieur ou égal à 2, la figure 2 montre que cette situation est obtenue avec une expansion radiale de l'ordre de 5%.

Pour des colonnes flottantes, les taux de réduction des tassements sont inférieurs à ceux obtenus sur la figure 2

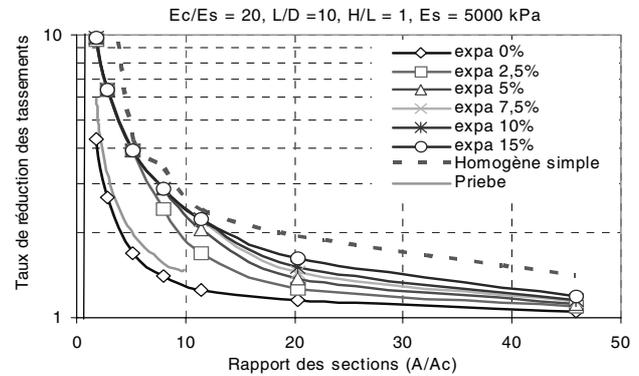


Figure 2 . Taux de réduction des tassements

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 permet aussi de vérifier l'augmentation des contraintes horizontales dans le sol qui cause la nette diminution du tassement. En pratique, on peut trouver que des valeurs d'expansion latérale jusqu'à 10% entraînent une valeur de K/K_0 qui peut valoir 1,5 à 2 (Kirsch 2004), Lambert et Rangeard (2008).

Si l'on réalise une expansion radiale de 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 cette valeur 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 (2001). 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 la modélisation d'un groupe de 25 colonnes ballastées avec une largeur de radier constante égale à $B_s = 10$ m (figure3) et de groupes de 4, 9, 16 colonnes avec la même largeur. Les caractéristiques du sol sont celles données dans le Tableau 1. Les colonnes ont 1 m de diamètre et 10 m. de longueur, avec un rapport $H/L = 2$ (colonnes « flottantes »). L'expansion radiale est constante, égale à 5%.

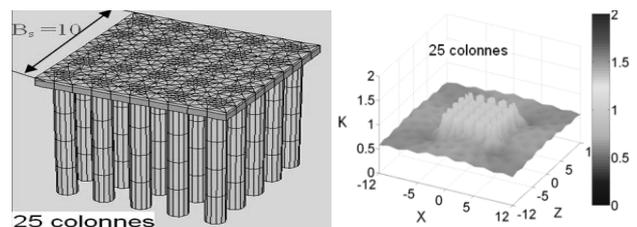


Figure 3. Groupe de 25 colonnes ballastées

Avec ce taux d'expansion, le taux de réduction des tassements est de 1.7 et on obtient un rapport de contraintes (K/K_0) de plus de 2 en moyenne, plus fort au centre de la fondation.

3 MODELISATION D'UNE STATION D'EPURATION DE SAINTE-MENEHOULD

On a appliqué cette méthodologie à un ouvrage existant contenant de nombreuses colonnes : on a considéré la fondation d'un bassin d'aération pour une station d'épuration à Sainte-Menehould (Lambert, 1999). Cette fondation repose sur 48 colonnes ballastées de 0,8 m de diamètre et 7 m de longueur. Les bassins de stations d'épuration se caractérisent habituellement par un radier mince 0,2 m armé anti-fissuration reposant sur une couche de matelas de 50 cm en moyenne. Le radier de la fondation est circulaire d'un rayon d'environ 10,1 m et le rayon sur lequel agit la charge d'eau est de 9,25 m. Les murs ont 4,50 m de hauteur et 0,25 m d'épaisseur (sur un rayon moyen de 9,375 m). La charge maximum appliquée correspond à 45 kPa de colonne d'eau dans le réservoir, soit 45 kPa (figures 4 et 5).

Les résultats d'essais pressiométriques, ont permis de définir quatre couches de sol : remblai, argiles (marron/vert), grave argileuse et argile (gris foncé). La nappe est à -1,9 m de profondeur, et le niveau d'assise de la fondation du bassin se trouve à -1,7 m. Les caractéristiques des sols sont faibles jusqu'à 7 m de profondeur et les colonnes reposent sur la couche d'argile grise. Les caractéristiques des différentes couches sont explicitées dans le tableau 2.

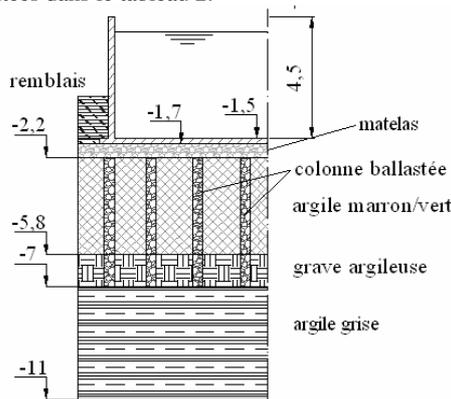


Figure 4 Coupe de la station et de la fondation

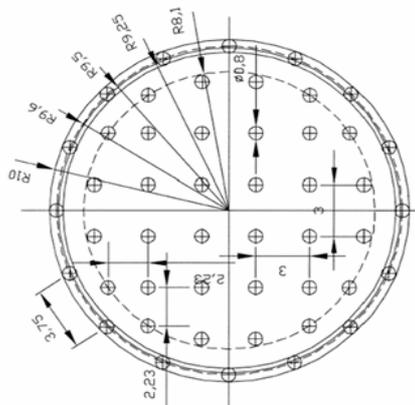


Figure 5 : Répartition en plan des 48 colonnes modélisées

On effectués les modélisations en 3D de ce groupe pour trois cas différents :

- le radier sans colonne (cas 1),

- le radier avec les 48 colonnes mais sans utilisation de l'expansion des colonnes (cas 2),

- le radier avec les 48 colonnes ballastées avec utilisation de l'expansion radiale. Une valeur d'expansion égale à 15% a été choisie dans le cas 3.

La figure 6 présente la modélisation du groupe de 48 colonnes et son maillage en 3D. Les colonnes ballastées sont modélisées avec le modèle Mohr-Coulomb et avec un module d'Young de 100 MPa et un angle de frottement de 38°.

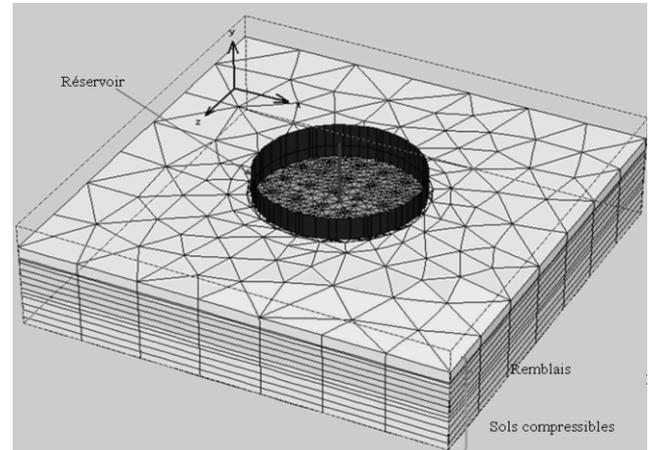


Figure 6. Modélisation d'une station d'épuration sur 48 colonnes ballastées

Tableau 2: Propriétés des couches

Prof. (m)	E' (MPa)	E_u (MPa)	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)
0-2,2	2,33	2,63	18	19
2,2-5,8	4,33	4,89	18	19
5,8-7	6	6,76	18	19
7-11	20	22,56	18	19
	k (m/s)	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ (degré)
0-2,2	1.e-9	30	1	25
2,2-5,8	1.e-9	53	5	25
5,8-7	1.e-9	66	5	25
7-11	1.e-9	256	7	25

3.1 Résultats obtenus

Sous l'effet de l'expansion radiale de 15% pour chacune des colonnes ballastées du groupe, on trouve que les contraintes horizontales dans le sol renforcé augmentent très fortement. Ces contraintes sont non-uniformes, celles dans la partie centrale du groupe sont très fortes et supérieures à celles dans les couronnes de colonnes extérieures au groupe. La valeur de $K = \sigma'_h / \sigma'_v$ augmente fortement et atteint la valeur 3 autour des colonnes centrales et 2 sur les bords où l'effet de confinement se fait moins sentir.

Pour le tassement vertical au centre et les tassements différentiels du radier du réservoir, Lambert (1999) a montré que les tassement mesurés du radier de la fondation sont faibles (inférieurs à 1 cm) : 9 mm pour le centre, et 5 mm pour le bord du radier. La comparaison entre les tassements du radier sous une charge de 45 kPa obtenus par les différentes modélisations en 3D et ceux mesurés est présentée dans le tableau 3.

La figure 7 présente une visualisation des tassements verticaux calculés sous une charge de 45 kPa. Le tassement au centre du radier est de 18 mm. Ceci correspond à un taux de réduction des tassements de 2,5.

Ainsi, on constate que, grâce à la prise en compte de l'expansion latérale, le taux de réduction des tassements est doublé par rapport à un calcul sans expansion. Les tassements différentiels sont nettement diminués.

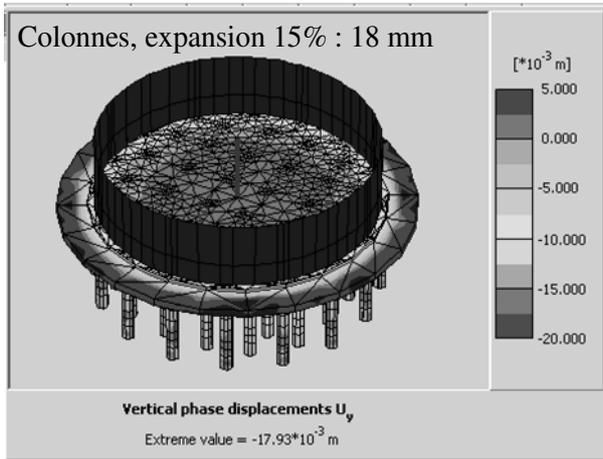


Figure 7. Tassement du réservoir

Tableau 3 : Tassement

Tassement	Mesure	avec colonnes	
		sans colonne	avec colonnes, expansion $\epsilon_v = 15\%$
	mm	mm	mm
au centre	9	45	18
au bord	5	5	12
différentiel	4	40	6

Les tassements absolus et différentiels apparaissent surestimés par cette modélisation. La cause principale de cette surestimation est à relier à la rusticité du modèle de Mohr Coulomb utilisé dans cette modélisation (module constant avec la profondeur notamment) mais les données géotechniques disponibles ne permettaient pas de caler un modèle de comportement plus réaliste.

4 MESURE DE L'EFFET DE MISE EN PLACE

Lors d'un autre chantier, il a été mis en oeuvre une instrumentation pour mesurer les contraintes horizontales créées par la mise en place de colonnes ballastées. Il s'agit d'inclusion à module mixte : une colonne ballastée de 1.5m de haut surmontant une inclusion rigide. La partie colonne a un diamètre de 0,65 m. Les contraintes induites par le compactage de la colonne ont été mesurées à 1,18 m de profondeur (mesures 2 et 3) et à 0,48 m (mesure 1) (figure 8). Les distances à l'axe de la colonne étaient de 0,52 m pour les mesures 1 et 2 et de 0,67 m pour la mesure 3

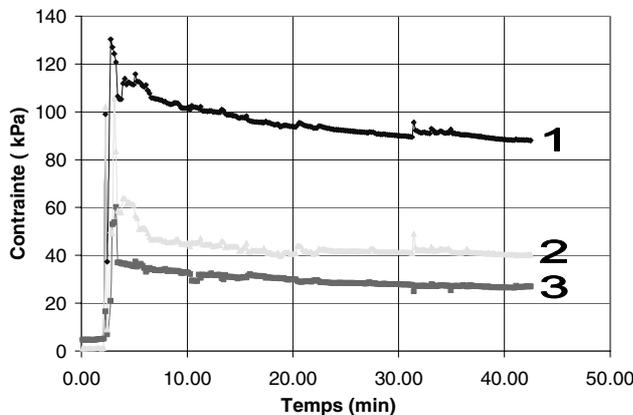


Figure 8. Evolution des contraintes horizontales

Les contraintes horizontales après refoulement atteignent 90 kPa d'augmentation à 0,48 m et 30 à 40 kPa à 1,18 m de profondeur. La différence de 10 kPa entre les mesures 2 et 3 est liée à la distance à l'axe (respectivement 52 et 67 cm) : dans un modèle élastique on obtiendrait une décroissance inversement proportionnelle au carré de la distance

Ces mesures, même très partielles, montrent l'importance de la prise en compte de ces variations de contraintes dans la modélisation.

5 CONCLUSIONS

La modélisation numérique de colonnes ballastées nécessite de prendre en compte le processus de mise en place des colonnes. Le compactage du matériau se traduit par une sollicitation d'expansion latérale appliquée au sol entourant la colonne. Dans les modélisations présentées des expansions latérales de 5 à 15% ont été utilisées.

Le taux de réduction des tassements pour une cellule élémentaire augmente rapidement lorsque le rapport de l'aire de la cellule à l'aire de la colonne est inférieur à 10.

Pour les groupes de colonnes, la même méthode a été employée pour simuler des fondations carrées de même dimension reposant sur des nombres de colonne variables : les taux de réduction varient de 1,1 à 1,7 pour des colonnes flottantes, montrant ainsi le rôle important de l'entraxe.

L'application à un bassin d'épuration avec simulation complète du radier, des parois et des 48 colonnes donne des résultats complets sur les tassements absolus et différentiels.

Enfin, des mesures préliminaires viennent confirmer l'augmentation des contraintes horizontales lors de la mise en place de colonne validant la modélisation de la mise en place par une expansion radiale.

REFERENCES

Debats, J.M, Guetif, Z & Bouassidan, M. 2003. Soft soil improvement due to vibro-compacted columns installation. Proceedings of Workshop Geotechnics of Soft Soils. Theory and Practice, Noordwijkerhout, The Netherlands, pp. 551-557.

Dhouib, A., Blondeau, F. 2005. Colonnes ballastées. Presse de l'ENPC. Paris, 264 p.

Dhouib, A., Soyez B., Wehr, J. & Priebe, H.J. 2004. Méthode de Priebe : Origine, Développement et applications. ASEP-GI 2004. Presses de l'ENPC. Paris, vol.1, pp. 131-146.

Guetif, Z., Bouassida, M. & Debats, J.M 2007. Improved soft clay characteristics due to stone column installation. Computers and Geotechnics, vol. 34, pp.104-111.

Handy, R. L., 2001. Does Lateral Stress Really Influence Settlement. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 1277, pp. 623-626.

Kirsch, F. 2004. Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Rüttelstopfsäulengruppen. Diss. TU Braunschweig. Mitt. Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik Heft.

Lambert, S. 1999 Renforcement de sol par colonnes ballastées pour des stations d'épuration. Chantier de France Juillet 1999. Fondations Spéciales. P 41.

Lambert, S. Rangeard D. 2007 Validation des modèles numériques et analytiques des fondations superficielles sur colonnes ballastées Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG'08 - Nantes, 18-20 juin 2008

Nguyen NT, Poray, P., Flavigny, E 2007. Prise en compte de l'effet de la mise en place dans la modélisation numérique en 3D des colonnes ballastées dans l'argile molle. Congés français de mécanique CFM'07-Grenoble, 23-27 septembre 2007

Nguyen NT. 2008. Modélisation du comportement des fondations profondes dans les argiles molles. Thèse de doctorat, Institute National Polytechnique de Grenoble-France, mars 2008.

Priebe H.J. 2002. Méthode de dimensionnement des colonnes ballastées flottantes dans les sols très mous, justification de la sécurité à la rupture circulaire ou au grand glissement.

Priebe, H.J. 1995. The design of vibro replacement. Ground Engineering, December, pp.31-37