

Essais en grandeur réelle de colonnes ballastées chargées par des semelles rigides

Sébastien Corneille

Nancy Université – LAEGO – Rue du Doyen Marcel Roubault 54 500 Vandœuvre-lès-Nancy

RESUME. Les inclusions souples, telles que les colonnes ballastées, sont constituées de matériaux granulaires et réalisées à partir de différentes méthodes, afin d'entraîner des améliorations de performances du sol (réduction des tassements, augmentation de la capacité portante, etc.). Cet article présente les résultats d'une campagne d'essais de chargement de semelles rigides menés à la rupture respectivement sur une colonne isolée et sur un ensemble de trois colonnes, et ceux réalisés sur des zones non améliorées de mêmes caractéristiques. Ces essais sont analysés en termes de capacité portante et de tassement et indiquent que la charge de fluage du sol amélioré augmente, par rapport à celle du sol non amélioré, d'un facteur 1,7 à 2,5 en fonction du nombre de colonnes. Par ailleurs, il est démontré que la charge de fluage de la semelle sur les trois colonnes n'est que 2,1 fois plus importante que celle sur la colonne seule. La charge de fluage de la semelle sur les trois colonnes déterminée in situ est inférieure de 30 % de celle calculée à partir du rapport des surfaces sol-colonne(s).

MOTS-CLÉS : colonne ballastée, essai en grandeur réelle, essai de chargement.

ABSTRACT. Compressible piles, such as stone columns, are made of granular materials and are constructed by different methods, in order to achieve several improvements of the soil (settlement reduction, increase in bearing capacity, etc.). This article presents the results of a campaign of vertical load tests of rigid footings carried out on one and three stone columns, and also those carried out on unimproved areas of the same characteristics. The load tests are analysed according to load bearing capacities and settlements and show that the creep load of the improved soil, compared to the creep load of the unimproved soil, is increased by a factor of 1.7 to 2.5 according to the number of columns under the footing. Moreover, it is shown that the creep load of the rigid footing on the three stone columns is 2.1 times that of the rigid footing on one column. The in situ creep load of the footing on three stone columns is found to be 30 % less than the one calculated according to the soil-column area ratio.

KEYWORDS: stone column, full scale test, load test.

1. INTRODUCTION

Les colonnes ballastées sont un procédé d'amélioration des sols compressibles permettant de répondre, dans des proportions variées, à plusieurs objectifs (augmentation de la capacité portante, diminution des tassements totaux et différentiels, augmentation de la résistance au cisaillement, et diminution des risques induits par la liquéfaction).

Les colonnes ballastées ont été, dès leur origine, mises en place dans différents types de sols cohérents et pulvérulents, naturels ou anthropiques, sous différentes fondations, souples (remblais, réservoirs...) ou rigides (semelles isolées, semelles filantes...), et avec des charges concentrées ou uniformément réparties (Dhouib et Blondeau, 2005). Les bénéfices d'une amélioration par colonnes ballastées reposent sur le confinement latéral que le sol va pouvoir offrir aux colonnes, sur la

densification du sol originel par la mise en place des colonnes, ainsi que sur l'effet de groupe apporté par les colonnes environnantes.

Le comportement à la rupture et à long terme de colonnes ballastées, instrumentées, chargées par une fondation rigide a été très peu analysé en vraie grandeur. Watts *et al.* (2000) ont étudié le comportement à long terme de colonnes ballastées, mises en place dans un remblai, chargées par une semelle filante. Greenwood (1991), Vautrain (1980) et MacKenna *et al.* (1975) ont étudié le comportement à long terme de colonnes ballastées instrumentées et chargées par des ouvrages souples.

Par ailleurs, de nombreux autres auteurs (Callanan, 1991, Slocombe et Moseley, 1991, Renton-Rose *et al.*, 2000, etc.) ont étudié les déformations verticales de la colonne en fonction de la charge appliquée au cours d'essais de contrôle par chargement à la plaque. Ceci afin de déterminer si le tassement observé immédiatement après application de la charge était compatible avec celui de la structure projetée. Par ailleurs, la méthode observationnelle est très souvent employée dans tout projet important d'amélioration de sol (Terzaghi et Peck, 1967, Allagnat, 2005).

La réalisation d'essais de chargement d'une semelle rigide posée sur une ou plusieurs colonnes ballastées a pour objectif de mieux appréhender le comportement à la rupture de ces inclusions souples. Cet article présente, dans une première partie, les conditions de sol ainsi que les paramètres liés au ballast et à la colonne. Sont ensuite présentés les résultats du chargement, en grandeur réelle, de deux semelles (1,2 x 1,2 x 0,5 m) reposant sur le sol naturel et sur une colonne ballastée, puis de deux autres (2,3 x 2,5 x 0,5 m) reposant sur le sol naturel et sur trois colonnes ballastées. Une importante instrumentation *in situ* (inclinomètres, capteurs de pression interstitielle, capteurs de pression totale, etc.) a été mise en place. Cependant, seule une partie des résultats inclinométriques sera présentée ci-après.

2. CONDITIONS DE SOL ET CARACTERISTIQUES DES COLONNES

Une campagne de reconnaissance a été mise en œuvre. Un sondage carotté jusqu'à 15 m de profondeur, avec prélèvement d'échantillons intacts sur les huit premiers mètres, a permis d'effectuer des essais de laboratoire (identification et caractérisation des sols) et d'établir une coupe détaillée des terrains. Un sondage pressiométrique jusqu'à 11 m de profondeur avec un essai par mètre à partir de 1,5 m de profondeur, a été réalisé afin de déterminer les caractéristiques pressiométriques des sols. Enfin, l'hétérogénéité du site a été mise en évidence par treize sondages de pénétration statique (*CPT*).

Le site (30 x 40 m) des essais de chargement (Mittersheim - France) est constitué par de l'argile jusqu'à - 5 m de profondeur, puis par de la marne, plus ou moins altérée, jusqu'à - 8 m, et indurée ensuite. La pression limite nette varie de 0,1 à 0,5 MPa dans l'argile et de 0,4 à 3,6 MPa dans la marne, alors que les modules pressiométriques varient de 0,3 à 4,1 MPa dans l'argile et de 2,2 à 18,2 MPa, voire 90 MPa, dans la marne.

Compte tenu des caractéristiques mécaniques de la marne, les colonnes ballastées ont été posées entre - 8,3 et - 8,6 m de profondeur par rapport à la plate forme de travail. La méthode de construction des colonnes est celle par voie sèche et alimentation par le bas (vibreux à sas). Le matériau mis en place est un calcaire à polypiers concassé, de granulométrie 20/31,5 mm dont les valeurs de Los Angeles et de Micro-Deval sont respectivement de 28,5 et 33. La cohésion et l'angle de frottement interne du ballast, obtenus par des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande (300 x 300 mm) ont

pour valeur 0 kPa et 40°. Les ratios de ballast compacté utilisés pendant les travaux, montrent qu'en moyenne, dans l'argile, ce ratio est de 0,61 m³/ml alors qu'il n'est que de 0,44 m³/ml dans la marne. Ces derniers permettent de calculer un diamètre moyen en place de 0,88 m dans l'argile et de 0,74 m dans la marne, pour la colonne isolée. Pour le groupe de trois colonnes, le diamètre moyen dans l'argile varie de 0,88 à 0,84 m, et de 0,78 à 0,80 m dans la marne.

3. ESSAIS DE CHARGEMENT EN GRANDEUR REELLE

3.1. PREMIERE SERIE : ESSAI SUR LE SOL NATUREL ET SUR UNE COLONNE BALLASTEE

3.1.1. Présentation générale

La première série est constituée d'un essai de chargement d'une semelle de dimensions 1,2 x 1,2 x 0,5 m sur le sol naturel non amélioré et d'un autre sur une colonne ballastée. Dans les deux cas, une charge de 150 kN a été appliquée en une journée par paliers de 30 kN. Cette charge a été maintenue pendant 77 jours sur les deux semelles, puis chaque essai a été amené jusqu'à la rupture, en une journée. La charge maximale appliquée sur la semelle posée sur le sol non amélioré et sur la semelle reposant sur la colonne isolée est respectivement de 450 et 660 kN. La figure 1 est une coupe schématique de l'essai de chargement de la semelle posée sur la colonne ballastée.

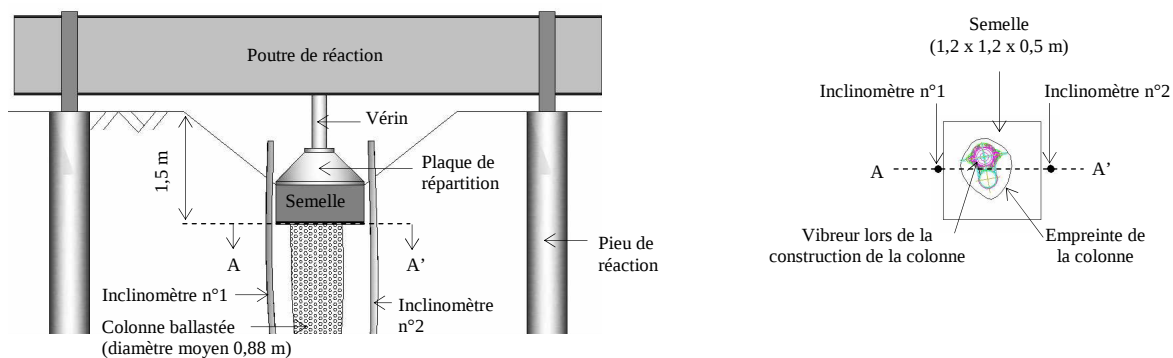


Figure 1 : Coupe schématique de l'essai de chargement de la semelle sur la colonne ballastée.

3.1.2. Résultats

La mise en place d'inclinomètres, jusqu'à 11 m de profondeur, à proximité de la colonne (figure 1) et avant la réalisation de cette dernière, a permis de déterminer les déplacements du sol lors du fonçage du vibreur et lors du compactage du ballast. Lors du chargement de la semelle, ces inclinomètres ont indiqué la profondeur de rupture de la colonne. Les essais de chargement ont permis de déterminer les tassements en fonction de la charge ainsi que la charge de fluage pour chaque configuration.

3.1.2.1. Déplacements latéraux lors de la réalisation de la colonne

Les déplacements selon les axes perpendiculaires à la colonne mesurés par les inclinomètres 1 et 2, situés respectivement à 0,68 et 0,77 m de l'axe de la colonne, à la fin du fonçage, à la fin du compactage, puis à différents paliers de chargement sont présentés sur la figure 2. Cette même figure donne également le sondage de pénétration statique réalisé avant la mise en place de la colonne et la coupe lithologique simplifiée établie à partir du sondage carotté.

Après fonçage et compactage, le déplacement de l'argile suivant l'inclinomètre 2, situé plus loin, est plus faible que celui mesuré par le premier. Mise à part la distance par rapport à l'axe de la

colonne, cette différence de déplacement peut aussi être attribuée à l'orientation du vibreur. Le déplacement de la marne après fonçage est encore plus faible et le compactage n'a eu quasiment aucune influence sur l'expansion dans ce sol.

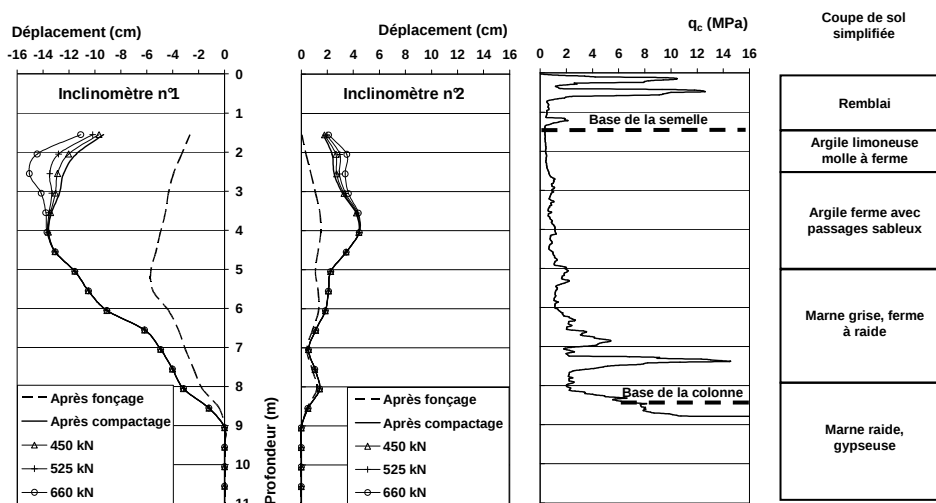


Figure 2 : Déplacements latéraux à proximité de la colonne isolée, résistance à la pointe du sol et coupe de sol simplifiée.

3.1.2.2. Déplacements latéraux lors du chargement de la semelle sur une colonne

Lors du chargement de la semelle jusqu'à 660 kN, une augmentation du déplacement du sol sur 2,5 m (de -1,5 à -4 m) est constatée. Les deux inclinomètres indiquent très nettement la rupture de la colonne à -2,5 m de profondeur, à la limite de l'argile limoneuse molle à ferme et de l'argile ferme à raide à passages sableux. Cette profondeur correspond à environ 3 fois le diamètre moyen de la colonne dans l'argile. Hughes et Withers (1974) avaient constaté qu'une colonne ballastée peut se rompre par expansion latérale, dans un sol homogène, sur une hauteur comprise entre 3 à 4 fois le diamètre de la colonne.

3.1.2.3. Tassement en fonction de la charge

La figure 3a présente le tassement en fonction de la charge pour les semelles carrées de 1,2 m de côté. Le facteur de réduction des tassements, β défini comme le rapport du tassement du sol non amélioré au tassement du sol amélioré, est reporté en figure 3b. Le fluage mesuré pendant 77 jours est d'environ 2 mm dans le cas de la semelle sur sol non amélioré et de 1 mm dans le cas de la semelle sur la colonne. La comparaison des courbes de tassement en fonction de la charge appliquée pour ces deux configurations confirme le rôle bénéfique de la présence de la colonne sous la semelle car elle permet, d'une part, d'augmenter la capacité portante du sol, et d'autre part, de réduire les tassements. Le facteur β est inférieur à 2 pour des contraintes inférieures à 104 kPa (150 kN) et augmente progressivement jusqu'à environ 5,5 pour 271 kPa (390 kN). Pour une contrainte de 271 kPa, qui est relativement élevée, le tassement de la semelle sur la colonne ballastée est de 20,5 mm.

3.1.2.4. Charge de fluage

L'exploitation des courbes de tassement en fonction du temps pour chaque palier, a permis de déterminer la charge de fluage pour les deux configurations. Ainsi, pour la semelle sur le sol non amélioré, cette charge de fluage est environ égale à 172 kN, soit 120 kPa, pour un tassement associé de 21 mm, alors qu'elle est égale à 415 kN, soit 288 kPa, dans le cas de la semelle posée sur la

colonne ballastée, avec un tassement de 25,6 mm. La charge de fluage du sol amélioré est 2,4 fois plus élevée que celle du sol non amélioré. La différence de charge, soit 243 kN, correspondrait à la charge de fluage reprise par la colonne ballastée.

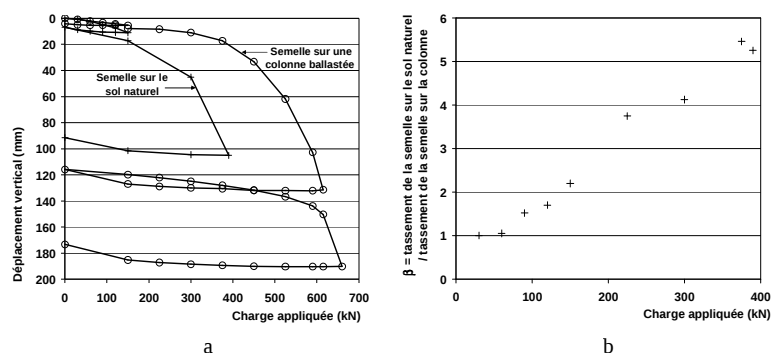


Figure 3 : a. Tassement en fonction de la charge pour les deux semelles carrées de 1,2 m de côté
b. Facteur de réduction du tassement β en fonction de la charge.

3.2. DEUXIEME SERIE : ESSAIS SUR LE SOL NATUREL ET SUR UN GROUPE DE TROIS COLONNES

3.2.1. Présentation générale

La deuxième série est constituée d'un essai de chargement d'une semelle de dimensions 2,3 x 2,5 x 0,5 m sur le sol naturel non amélioré et d'un autre sur un groupe de trois colonnes ballastées disposées au sommet d'un triangle équilatéral de 1,8 m de côté (figure 4). La disposition des colonnes ainsi que la forme de la semelle ont été choisies parmi une configuration des Recommandations Colonnes Ballastées (2005). Une charge de 525 kN a été appliquée en une journée par paliers de 75 kN, sur la semelle posée sur le sol naturel. Sur la semelle reposant sur les trois colonnes, c'est une charge de 760 kN qui a été appliquée en une journée par paliers de 95 kN. Ces charges ont été maintenues, respectivement pendant 61 et 74 jours, puis, chaque essai a été mené à la rupture. Les charges maximales atteintes sont respectivement de 1 425 et 1 750 kN.

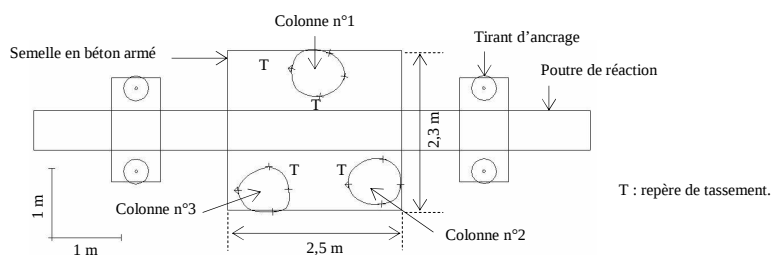


Figure 4 : Semelle sur le groupe de trois colonnes ballastées.

3.2.2. Résultats

Ces essais ont permis de déterminer les tassements en fonction de la charge ainsi que la charge de fluage pour chaque configuration.

3.2.2.1. Tassement en fonction de la charge

La figure 5a présente le tassement en fonction de la charge pour ces deux semelles. Le facteur de réduction des tassements β est reporté sur la figure 5b.

La comparaison des courbes de tassement en fonction de la charge appliquée pour les deux configurations confirme le rôle bénéfique de la présence des trois colonnes sous la semelle car elles permettent, d'une part, d'augmenter la capacité portante du sol, et d'autre part, de réduire les tassements. La valeur de β , calculée à partir de la moyenne des quatre repères de tassement (figure 4), est élevée (2,8) au début du chargement car la semelle sur le sol naturel tasse d'environ 2,8 mm alors que celle sur les trois colonnes tasse de 1 mm. Puis, au cours du chargement, β augmente de 2,1 à 4,4 pour une charge de 130 à 510 kN, et diminue ensuite pour atteindre un palier d'environ 2.

Cependant, les tassements présentés sur la figure 5a sont la moyenne de quatre repères de tassement (figure 4) répartis au sommet de chaque semelle. Il convient de préciser que, entre les paliers de chargement 800 et 1 000 kN, la semelle sur les trois colonnes ballastées a commencé à basculer du côté de la colonne 1 (figure 4). Ceci peut s'expliquer par la disposition des colonnes par rapport à la géométrie de la semelle. En effet, la rigidité relative des deux côtés, l'un avec deux colonnes, l'autre avec une seule, peut être à l'origine de ce tassement différentiel. D'autres auteurs, par exemple Clemente et Davie (2000), ont aussi constaté ce type de basculement.

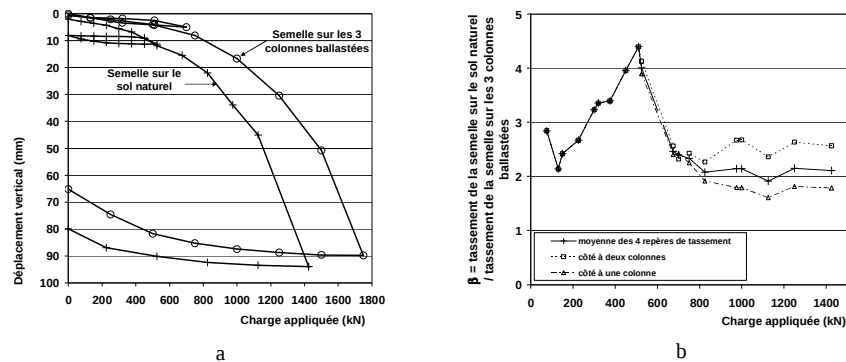


Figure 5 : a. Tassement en fonction de la charge pour les deux semelles de 2,3 x 2,5 m.
b. Facteur de réduction du tassement β en fonction de la charge.

3.2.2.2. Charge de fluage

L'exploitation des courbes de tassement en fonction du temps pour chaque palier a permis de déterminer la charge de fluage pour les deux configurations. Ainsi, pour la semelle sur le sol non amélioré, cette charge de fluage est environ égale à 700 kN, soit une contrainte de 122 kPa, pour un tassement associé de 17 mm, alors qu'elle est égale à 875 kN, soit une contrainte de 152 kPa, dans le cas de la semelle posée sur les trois colonnes ballastées, avec un tassement de 13 mm. La charge de fluage du sol amélioré est 1,25 fois plus élevée que celle du sol non amélioré, ce qui est inférieur au rapport entre celle du sol non amélioré et de la colonne seule (2,4).

3.3. COMPARAISON DES RESULTATS

Le tableau 1 présente la charge de fluage (Q_c), la contrainte de fluage (σ_c) ainsi que le tassement (s) associé pour chaque configuration. Ce tableau permet de constater que les contraintes de fluage des deux semelles sur le sol naturel sont quasiment égales. De plus, la charge de fluage de la semelle sur les trois colonnes n'est pas égale à trois fois celle de la semelle sur une colonne, mais seulement à 2,1. Enfin, le tassement de la semelle sur les trois colonnes n'est que légèrement inférieur à celui de la semelle sur le sol naturel de même configuration.

Tableau 1 : Charge, contrainte de fluage et tassement associé.

	Semelle 1,2 x 1,2 x 0,5 m		Semelle 2,3 x 2,5 x 0,5 m	
	Sol naturel	Une colonne ballastée	Sol naturel	Trois colonnes ballastées
Q_c (kN)	172	415	700	875
σ_c (kPa)	120	288	122	152
s (mm)	21	26	17	13

A partir de l'essai de chargement sur la colonne et sur le sol non amélioré, nous avons déterminé la contrainte de fluage de la colonne ballastée ainsi que celle du sol. En ne tenant compte que des surfaces respectives du sol et des colonnes sous la semelle, et en faisant abstraction de la disposition des colonnes, ainsi que de la géométrie de la semelle, la charge de fluage *in situ* de la semelle sur les trois colonnes a été estimée par calcul. Toutefois, pour les trois colonnes, la charge de fluage ainsi calculée est inférieure à celle déterminée par l'essai *in situ* d'environ 30 %. Dans le cas de la semelle sur une colonne ballastée, la charge de fluage ainsi calculée est inférieure de 17 % de celle déterminée par l'essai de chargement.

4. CONCLUSION

La construction d'une puis de trois colonnes ballastées, leur chargement par une semelle rigide, ainsi que le chargement de zones non améliorées de mêmes dimensions respectives, a permis de quantifier et de caractériser l'amélioration.

Les inclinomètres situés de part et d'autre de la colonne ont clairement indiqué que la zone de rupture de la colonne par expansion latérale se produit dans la couche d'argile limoneuse molle à ferme, sur une profondeur équivalente à 3 fois le diamètre moyen de l'inclusion.

L'analyse des essais de chargement indique que la réduction du tassement induite par la présence de la (des) colonne(s) est à considérer en fonction du tassement souhaité après amélioration ainsi qu'en fonction de la charge appliquée. En effet, le choix d'une technique d'amélioration de sol sous semelle rigide doit être en adéquation avec l'objectif principal recherché (diminution du tassement ou augmentation de la capacité portante).

Compte tenu du basculement de la semelle sur les trois colonnes lors du chargement, la charge de fluage de celle-ci n'a pu atteindre que 2,1 fois celle de la semelle sur une colonne. Afin d'éviter ce type de désordre, il convient d'adapter la disposition des colonnes ainsi que la géométrie de la semelle aux conditions de chargement.

Les charges appliquées à long terme ont abouti à des tassements de fluage négligeables pour l'ensemble des semelles étudiées dans ce travail.

Les charges de fluage calculées en ne tenant compte que des rapports de surface sol-colonne(s) sont inférieures de 17 et 30 % de celles déterminées *in situ*, respectivement pour la semelle sur la colonne et pour celle sur les trois colonnes ballastées.

Des modélisations numériques 2 D et 3D, prenant en compte le mode de réalisation des colonnes (refoulement latéral du sol), sont actuellement en cours de réalisation afin de mettre en place une méthodologie de calcul appropriée pour ce type d'ouvrage. (Corneille, 2007).

5. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été menés dans le cadre d'une thèse CIFRE réalisée en partenariat entre le LAEGO et l'entreprise de fondations spéciales DURMEYER SAS basée à Mittersheim en Moselle. L'auteur tient à remercier vivement les dirigeants de DURMEYER SAS pour leur soutien financier et technique. L'auteur remercie également la DRAST du Ministère de l'Équipement et le Conseil Régional de Lorraine pour leur soutien financier.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Allagnat D. (2005). « *La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages* » Presses de l'ENPC, ISBN 2-85978-409-8, 127 p.
- Callanan J. F. (1991) « Design and construction monitoring of stone column foundations in hydraulic fill » *Proc. of the 10th ECSMFE*, p. 349-352.
- Clemente J.L.M., Davie, J.R. (2000) « Stone columns for settlement reduction » *Proceedings of GEOENG2000 Australia*, 6 p.
- Corneille S. 2007 (à paraître). « Amélioration des sols par inclusions semi-rigides », Thèse de Doctorat INPL.
- Dhouib A., Blondeau F. (2005) « *Colonnes ballastées. Techniques de mise en œuvre, domaines d'application, comportement, justification, contrôle, axes de recherche et de développement* », 264 p. ISBN 2-85978-401-2.
- Greenwood D.A. (1991) « Load tests on stone columns », *Proceedings of the conference on deep foundation improvements: Design, construction and testing, ASTM STP 1089*, p. 148-171.
- Guetif Z., Debats J.-M., Bouassida M., Ellouze S. (2004) « Amélioration du module de déformation d'une argile molle due à la mise en place d'une colonne ballastée par vibrocompaction », *Actes du Colloque International de Géotechnique de Beyrouth*, p. 343-349.
- Hughes J.M.O., Withers N.J. (1974) « Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns », *Ground Engineering* n° 3, vol. 7, p. 42-49.
- MacKenna J.M., Eyre W.A., Wolstenholme D.R. (1975) « Performance of an embankment supported by stone columns in soft ground », *Géotechnique*, n° 25, p. 51-59.
- Priebe H. (2003) « *Program manual GRETA ground improvement* », GEOStat.
- Recommandations Colonnes Ballastées. 2005. « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement », *Revue Française de Géotechnique*, n° 111, p. 3-16.
- Renton-Rose D.G., Bunce G.C., Finlay D.W. (2000) « Vibro-replacement for industrial plant on reclaimed land, Bahrain », *Géotechnique* 50, N0. 6, p. 727-737.
- Slocombe B.C., Moseley M.P. (1991) « The testing and instrumentation of stone columns », *Deep Foundation Improvements: Design, construction and testing ASTM STP 1089*, p. 85-100.
- Terzaghi K., Peck R.B. (1967) « *Soil Mechanics in Engineering Practice* », 729 p.
- Vautrain J. (1980) « Comportement et dimensionnement des colonnes ballastées », *Revue Française de Géotechnique*, n° 11, p. 59-73.
- Watts, K.S., Johnson, D., Wood, L.A., Saadi, A. (2000) « An instrumented trial of vibro ground treatment supporting strip foundations in a variable fill », *Géotechnique*, 50, n° 6, p. 699-708.