

Colonne à module mixte CMM[®] sous des sollicitations statiques et dynamiques : étude expérimentale

H. SANTRUCKOVA

Phd student, Grenoble-INP
UJF-CNRS, 3SR

**P. FORAY, É. FLAVIGNY
PH. GOTTELAND**

Grenoble-INP, CNRS, 3SR,
Grenoble, France

M. BUSTAMANTE

IFSTTAR, Paris, France

Résumé

La colonne mixte ou la colonne à module mixte CMM[®] est un procédé de renforcement de sol qui combine les deux techniques les plus utilisées en France. Elle se compose d'une partie supérieure de 1,5 m environ de colonne ballastée qui peut accepter des efforts de cisaillement importants et une partie inférieure rigide (inclusion rigide) qui permet de réduire essentiellement les tassements. Afin de dimensionner correctement les colonnes mixtes, le comportement de ce renforcement de sol sous des actions statiques et dynamiques est analysé. Une étude expérimentale *in situ* réalisée par le LCPC (maintenant IFSTTAR) et une étude en laboratoire par le laboratoire 3S-R (Grenoble) d'une semelle carrée reposant directement sur un groupe de CMM[®] mises en place dans une argile molle, ont été réalisées afin d'analyser la réponse de ce système sous différentes charges statiques et dynamiques. La comparaison entre les déplacements dynamiques de la semelle et les courbes p-y (pression latérale P fonction du déplacement latéral Y de la tête de pieu), permet de quantifier la dissipation de l'énergie. Les résultats indiquent une augmentation significative de la portance de la fondation sur colonnes mixtes et une dissipation importante de l'énergie inertielle sismique dans la partie supérieure souple.

Mots-clés : colonne à module mixte, moment de flexion, raideur, déplacement.

Mixed Module Columns[®] under static and dynamic load: experimental study

Abstract

Mixed Module Column proceed is a ground reinforcement technique which combines two soil improvement methods widely used in current practice. They are composed of a 1 to 1.5 m length of a soft upper part (Stone Column) which offers shear and moment capacity, and a rigid lower part (Rigid Inclusion) which mainly reduces the settlements. In order to design CMM[®]s correctly, the response of this combined system to different static and dynamic loads must be understood. This paper presents main results from *in situ* tests performed by IFSTTAR and from a laboratory experimental study performed in Laboratoire 3S-R (Grenoble) of a shallow foundation with a group of Mixed Columns. The analysis of the dynamic deflection of the pile head and of the P-Y curves obtained with cyclic loading on the pile, compared to the movement of the foundation, allowed an estimation of the dissipated energy. The results indicate that the footing bearing capacity with CMM[®]s increases and a large amount of the seismic energy is dissipated within the soil column.

Key words: Mixed Module Column, bending moment, subgrade modulus, displacement.

Introduction

Les recommandations françaises ASIRI (2012) et de l'AFPS (2012) recommandent la mise en œuvre d'un matelas intercalaire entre les têtes d'inclusions rigides et les fondations dans le but notamment de réduire les sollicitations dans les inclusions rigides en présence d'efforts horizontaux venant de l'ouvrage. Cette préconisation entraîne des sujétions importantes pour l'exécution : augmentation du volume des déblais, largeur de fouille plus grande que celle des semelles (coffrage nécessaire), compactage et contrôles difficiles en fond de fouille.

Les colonnes mixtes ou colonnes à module mixte CMM® développées par Keller Fondations Spéciales, sont un procédé de renforcement de sol alternatif aux inclusions rigides particulièrement innovant dans le sens où il est possible de s'affranchir du matelas. La partie supérieure en colonne ballastée qui surmonte l'inclusion rigide en partie inférieure se comporte comme une zone rotulée dissipative qui transmet moins d'énergie, aussi bien du sol vers la superstructure par effet direct que de la structure vers la partie inférieure rigide des CMM®.

Nous présentons, dans cet article, des essais *in situ* (voir Figs. 1, 2 et 3) réalisés par le LCPC (Bustamante *et al.*, 2006) sur deux sites à Niederbipp (Suisse) et à Saint-Martin-d'Hères (France) et une étude du laboratoire 3S-R d'une semelle isolée soumise à des sollicitations horizontales reposant sur un massif de sol mou renforcé par quatre CMM®. Le modèle est réalisé en 3D à une échelle 1/10 dans la visu-cuve du Laboratoire 3S-R afin d'évaluer l'effet inertiel (Fig. 4).

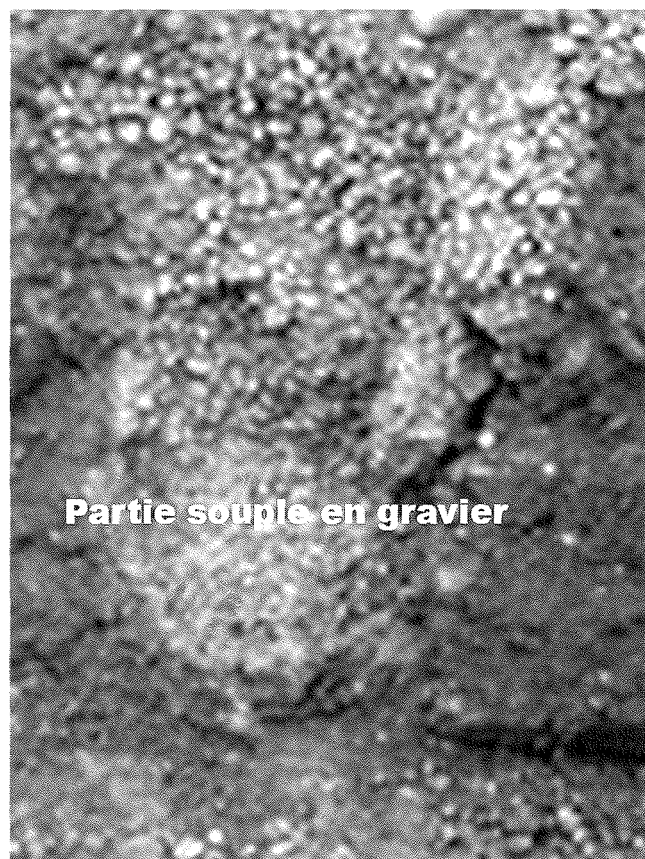


FIG. 1 Dégarnissage d'une colonne mixte, Niederbipp (Suisse).

Plots expérimentaux du LCPC

Il convenait d'étudier les différents aspects de la colonne mixte, dans le cadre d'une recherche expérimentale sur site, en vraie grandeur. Ce programme impliquait d'étudier les différents aspects du problème, à savoir la comparaison des performances d'un sol renforcé (par colonnes ballastées CB et CMM) par rapport à celles d'un même sol non renforcé, le mécanisme de fonctionnement de la colonne à module mixte CMM, la validité des différentes méthodes de dimensionnement possibles. Celle-ci a pu être réalisée à Niederbipp (Suisse), en relation avec les travaux de confortement de la plate-forme logistique Center et à Saint-Martin-d'Hères (38) dans le cadre d'un projet des bâtiments de logements confiés à Keller Fondations Spéciales.

L'analyse des résultats recueillis a conduit aux conclusions suivantes :

- a) les équipements de réalisation de la colonne mixte Keller et le système de contrôle de mise en œuvre par enregistrement des paramètres de forage et de bétonnage avec visualisation de l'évolution de chacun d'eux, permettent un suivi efficace de la confection de chaque colonne en temps réel ;
- b) l'observation des colonnes excavées a montré que la continuité et la coaxialité de la partie gravier avec la partie rigide sont respectées et maîtrisées dans le sens de la répétitivité. La qualité du contact à la transition s'est avérée être bonne ;
- c) la capacité portante réelle du sol renforcé par colonnes CMM® est au moins trois fois supérieure à celle mesurée sur sol vierge. En termes de tassement, le rapport de réduction des tassements est de l'ordre de 4 à 5 (Fig. 2) ;
- d) La comparaison entre colonnes ballastées et les colonnes à module mixte montre que les CMM réduisent plus efficacement les tassements, et cela dans un rapport de 1,4, pour les colonnes isolées comme pour les groupes de colonnes (Fig. 3) ;
- e) du point de vue de la prévision de la portance et des tassements (Bustamante *et al.*, 2006), plusieurs approches analytiques (logiciel Greta de GETTEC) et numériques (PLAXIS 2D et 3D) ont pu être validées.

Essais en laboratoire

Présentation des modèles physiques

Un modèle réduit d'une semelle carrée de 24 cm de côté et de 2 cm d'épaisseur reposant sur quatre colonnes mixtes a été réalisé au laboratoire 3S Grenoble. L'inclusion rigide est représentée par un tube en aluminium de 16 mm de diamètre extérieur et 8 mm de diamètre intérieur, fixé en pied. La zone de transition de la colonne mixte est représentée par une tête élargie conique remplie de gravier surmontée par une plateforme de transfert de charge constituée soit par des colonnes en gravier, soit par un matelas continu de gravier. Pour connaître l'influence de l'épaisseur de la plate-forme de transfert sur les sollicitations dans les inclusions rigides, les épaisseurs de 5, 8 et 10 cm ont

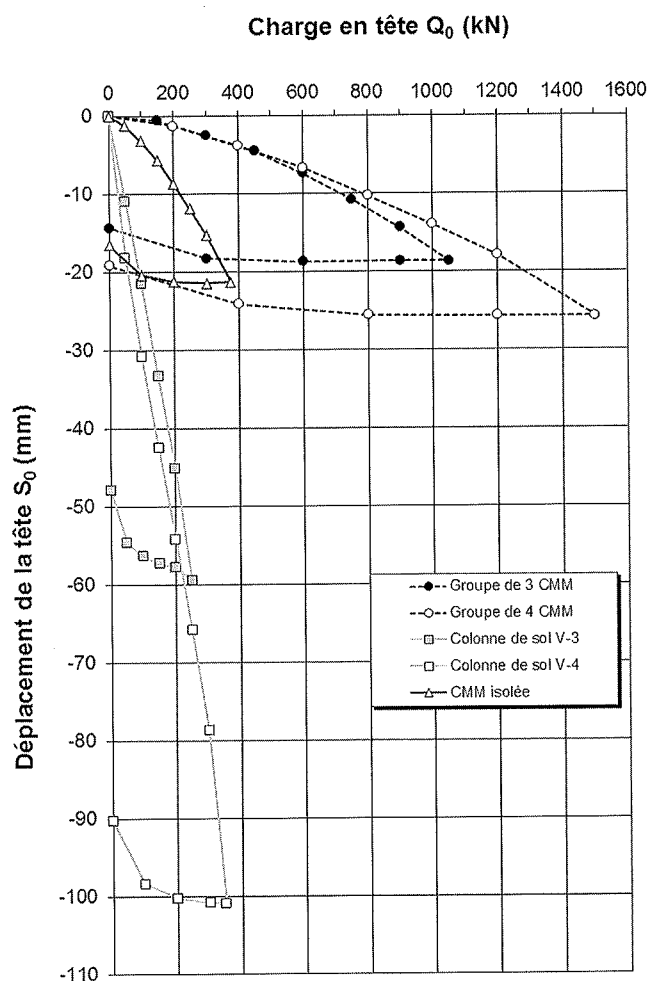


FIG. 2 Résultats des essais sur sol vierge (courbes grises) et du sol renforcé par colonnes mixtes (courbes noires).

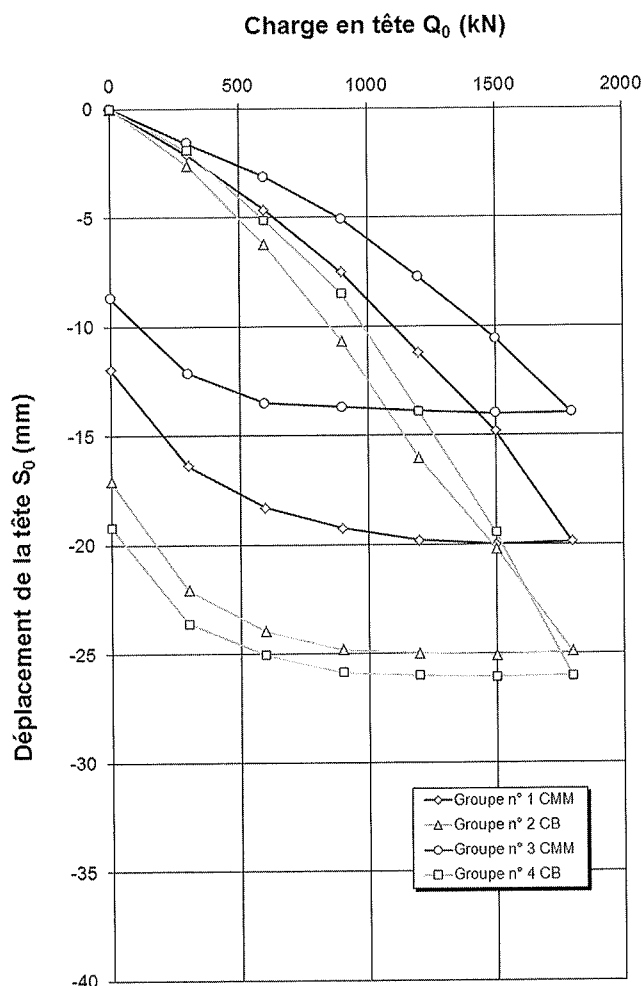


FIG. 3 Comparatif des courbes de chargement de semelles de 2×2 m sur 4 CB ou 4 CMM.

été étudiées. La semelle est encastrée dans le sol sur toute sa hauteur. Pour l'étude des sollicitations latérales de l'inclusion rigide, une inclusion est instrumentée avec 20 extensomètres répartis sur toute la hauteur, de manière à représenter les profils des sollicitations de manière détaillée.

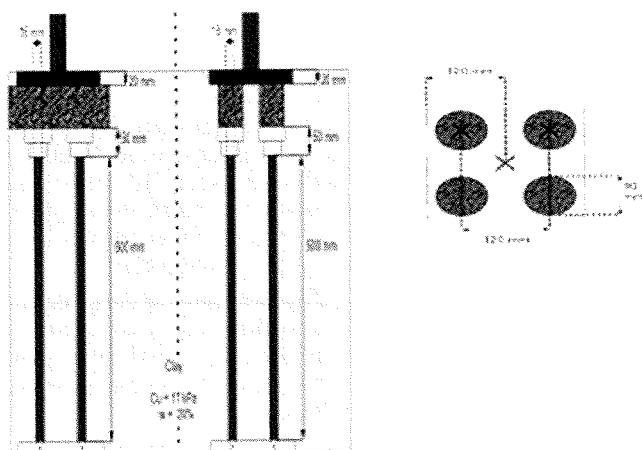


FIG. 4 Modèle mixte échelle 1/10 (Santruckova, 2012).

Dans le cadre de ce travail, la condition de similitude rigoureuse n'est pas respectée pour le niveau de contrainte ($\sigma^* = 1$) pour les modèles réduits soumis à une gravité normale ($g^* = 1$). Néanmoins, cette modélisation physique a pour objectif de visualiser le mécanisme d'interaction du complexe sol-CMM®-semelle sous sollicitation horizontale et de calibrer un modèle numérique.

3.2

Méthodologie expérimentale

Le dispositif expérimental est constitué d'une grande cuve (VisuCuve) rigide et imperméable de 2 m de long par 1 m de large et 1 m de profondeur, qui permet une visualisation latérale des mécanismes. Elle est remplie par une argile saturée très molle (voir Fig. 5). Un chariot de chargement supportant le modèle de la semelle peut se déplacer le long de deux rails parallèles fixés sur les deux côtés latéraux. Le modèle de la semelle peut descendre librement sous le chargement vertical grâce à un système de guidage sur le chariot de chargement. La charge verticale qui reste constante tout au long de chaque essai a été appliquée à l'aide d'un vérin vertical fixé sur le chariot.

Les forces horizontale et verticale sont mesurées par deux capteurs de force montés sur le chariot de chargement et les déplacements horizontaux sont mesurés par un capteur de grand déplacement directement sur le chariot durant les essais quasi statiques, et par un LVDT sur la fondation pour les essais dynamiques. Le déplacement vertical est mesuré par un LVDT fixé sur le modèle de la fondation.

Un des quatre tubes représentant l'inclusion rigide constitue le macrocapteur instrumenté (Fig. 5). Les fils de connexions de ces jauges sortent par le pied du tube creux. Après avoir installé la semelle sur le renforcement de sol, une charge verticale de 5 000 N est appliquée progressivement en cinq paliers réguliers. Cette charge est maintenue ensuite constante pour assurer une complète consolidation du sol. La charge verticale de 5 000 N correspond au tiers de la charge de rupture du sol renforcé. Après la phase de consolidation du sol sous la charge verticale, un chargement horizontal de 30 cycles est appliqué sous déplacements contrôlés de ± 2 mm à une fréquence de 2,7 Hz.

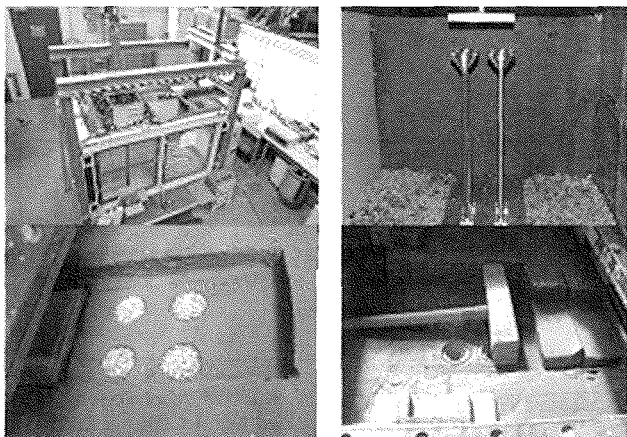


FIG. 5 La « VisuCuve », la partie rigide + zone transition, mise en œuvre de l'argile et du gravier de la partie souple.

Le macrocapteur instrumenté mesure des déformations de flexion à partir de 20 jauges. Les moments de flexion le long du pieu ont été obtenus à partir de la loi de Hooke et de l'équation d'Euler-Bernoulli. La principale difficulté pour une telle analyse est une interpolation temporelle correcte du moment sur la hauteur de l'inclusion (Rosquoët *et al.*, 2007). Ceci est effectué avec une fonction polynomiale de degré 6 (Hana Santruckova, 2012).

3.3

Résultats des essais en laboratoire

3.3.1

Chargements vertical et horizontal

L'objectif est de trouver la combinaison des charges limites verticale V et horizontale H qui provoque la rupture de la fondation isolée.

Cette courbe enveloppe de rupture peut être trouvée expérimentalement par une augmentation de la charge verticale jusqu'à sa capacité ultime, puis en appliquant une force horizontale tout en bloquant la fondation verticalement en déplacement. Cette procédure est communément appelée le *swipe test*. La

mesure des forces verticales et horizontales appliquées sur la fondation donne pour la semelle la courbe de rupture du sol renforcé par colonnes mixtes.

Le *swipe test* a été effectué pour le sol non renforcé et le sol renforcé par les colonnes mixtes. Un comparatif de ces 2 courbes (voir Fig. 6) met en évidence que la courbe de rupture du sol renforcé est bien plus large que celle du sol non renforcé. La forme de ces deux enveloppes est homothétique avec un rapport approximatif de 4 entre les deux courbes.

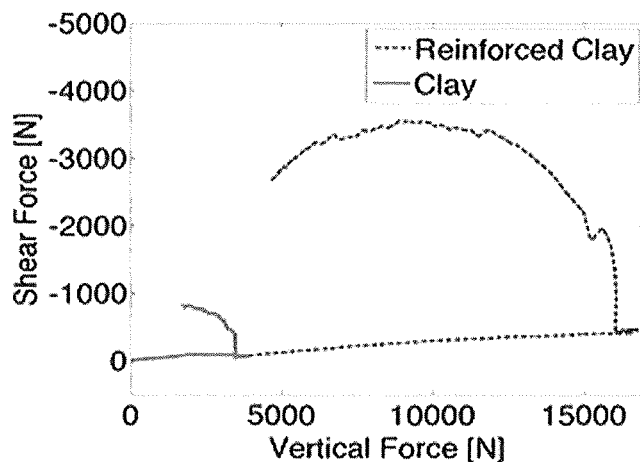


FIG. 6 *Swipe test* pour le sol argileux non renforcé et le sol renforcé avec colonnes mixtes.

3.3.2

Chargement cyclique horizontal

La partie souple en gravier de la CMM® a pour intérêt principal de dissiper au maximum l'énergie cinématique venant de la fondation afin de réduire les sollicitations sur la partie rigide constituée de mortier ou de béton. Dans le modèle physique expérimental, il est apparu important d'étudier l'influence de la hauteur de la partie souple (hauteurs variables de 5, 8 et 10 cm) sur les sollicitations horizontales de la partie rigide sous-jacente.

La figure 7 montre ainsi que la tête de la partie rigide de la colonne mixte se déplace horizontalement bien moins (0,2 mm pour le premier cycle) que la fondation (± 2 mm) et que son déplacement forme également une sinusoïde. Les courbes ont été tracées pour les temps t_1 à t_6 correspondant aux premier, quinzième et trentième cycles.

Sachant qu'une seule inclusion a été instrumentée, il est possible de connaître les sollicitations des inclusions avant (sens du déplacement) pour t_1 , t_3 et t_5 et les sollicitations des inclusions arrière pour t_2 , t_4 et t_6 (Figs. 7 et 8). On peut constater que le moment de flexion en tête de l'inclusion rigide n'a pas une valeur nulle comme c'est obligatoirement le cas pour les colonnes mixtes. Ceci est dû à un moment parasite provoqué par l'évasement du tube fixé en tête.

La figure 8 montre un déplacement réversible au début du chargement puis, à mesure que le nombre de cycles augmente, l'inclusion n'a plus un débattement négatif et montre une accumulation des déplacements avec le chargement dynamique.

Ce déplacement latéral cumulé, tout en restant toujours faible par rapport au déplacement de la semelle, se développe vers l'extérieur de la fondation et a une tendance à se stabiliser vers la fin du chargement cyclique.

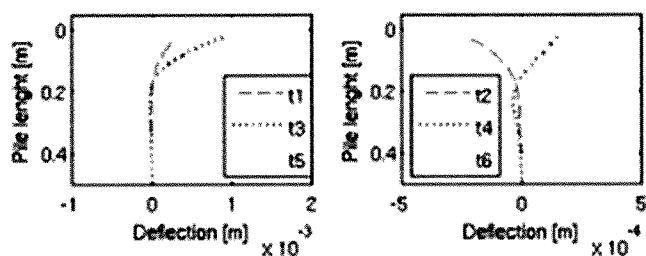


FIG. 7 Profils de déplacements pour les temps t1 à t6 (hauteur partie souple 5 cm).

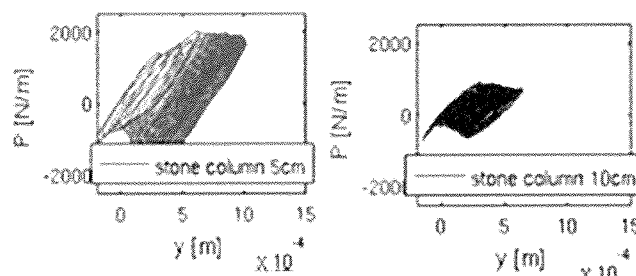


FIG. 9 Courbes p-y en tête de la partie rigide pour 5 et 10 cm de colonne de gravier.

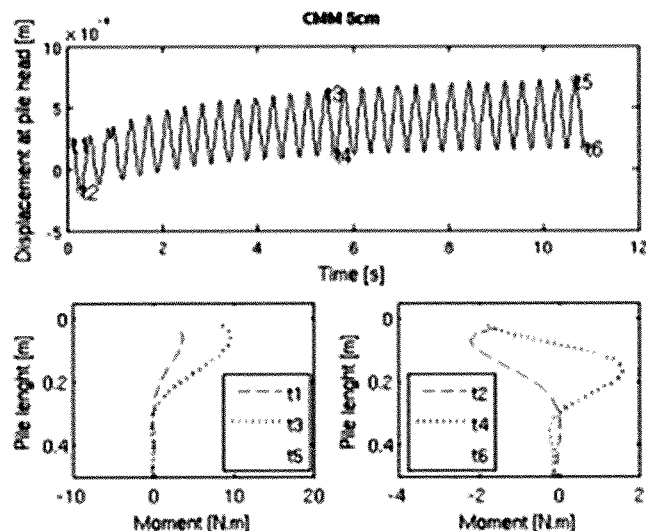


FIG. 8 Profils des moments pour les temps t1 à t6 (hauteur partie souple 5 cm).

L'influence de la hauteur de la partie souple de la colonne mixte sur les sollicitations mesurées dans la partie rigide est caractérisée par la représentation du déplacement y de la tête de la partie rigide en fonction de la pression latérale du sol p de la figure 9. On peut constater que le déplacement est beaucoup plus faible avec une hauteur de colonne de 10 cm (déplacement maximal de 0,6 mm) qu'avec une hauteur de 5 cm (déplacement maximal de 1,0 mm) et que, par conséquent, les fortes épaisseurs sont à favoriser pour réduire les sollicitations dans les inclusions rigides.

Conclusion

Dans le cas des colonnes ballastées, il est admis que les efforts horizontaux peuvent être repris sans risque de cisaillement de celles-ci et que le tassement se produit avec la conservation des sections planes horizontales sans engendrer de points durs. Ce n'est par contre, pas le cas pour les inclusions rigides ou semi-rigides dont le module de ces derniers varie de 500 à 10 000 MPa correspondant à une valeur 100 fois supérieure à celui du sol (10 fois seulement pour les inclusions souples). Dans la famille des inclusions rigides et semi-rigides, de nombreux procédés sont proposés (toutes les techniques de pieux, l'injection solide, le *jet-grouting*...) alors que pour les inclusions souples seuls les plots ou colonnes ballastées existaient jusqu'à la création du procédé de la colonne mixte ou colonne à module mixte (CMM®).

Une étude sur le comportement des colonnes mixtes sous sollicitations horizontales statiques et dynamiques a été effectuée à partir d'essais *in situ* et de modélisations physiques. Elle a montré que le sol, renforcé par quatre colonnes mixtes concentrées sous une semelle isolée, permet d'augmenter la portance du sol sous charge verticale ou inclinée dans un rapport de 3 à 4 par rapport à la situation initiale pour les cas étudiés. Les tassements mesurés sur les plots d'essais de Nierderbipp et Grenoble ont été divisés dans un rapport de 4 à 5 par rapport à la situation initiale.

Pour des sollicitations horizontales cycliques que l'on peut observer lors de séismes par exemple, une étude paramétrique de la variation de la hauteur de la partie souple de la colonne mixte a été réalisée pour connaître l'influence de ce paramètre sur les sollicitations dans la partie rigide sous-jacente. Il a été montré que pour assurer une efficacité optimale dans la réduction des sollicitations au niveau de la partie rigide, une hauteur de plus d'un mètre de la partie souple de la CMM® est à envisager (valable également pour un matelas de gravier dans le cas d'inclusions rigides).

Bibliographie

- AFPS – Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques, Guide technique, Presses des Ponts, 2012.
- ASIRI – Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondations par inclusions rigides, Presses des Ponts, 2012.

- Bustamante M. – Études expérimentales sur la portance des colonnes à modules mixtes aux ELU. *Symposium international sur les états limites ultimes des ouvrages géotechniques*, 2006, p. 59.
- Santruckova H. – Inertial loading of soil reinforced by Rigid Inclusions associated to a flexible upper layer, Laboratoire 3S Grenoble, 2012.

- Zhang X. – Modélisation physique et numérique des interactions sol-structure sous sollicitations dynamiques transverses. PhD Dissertation, Université de Grenoble. *Journal*, n° 29, 2011, p. 955-970.