

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Renforcement du sol support d'une voie ferroviaire existante par des colonnes de sol-ciment

Soil reinforcement beneath existing railtracks with soil-cement columns

A. Le Kouby, E. Bourgeois, F. Rocher-Lacoste
Université PARIS-EST, LCPC, Paris, France

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet de recherche européen INNOTRACK, une expérimentation en vraie grandeur a été effectuée en collaboration entre la SNCF, la société SOLETANCHE-BACHY et le LCPC. Le site se trouve sur une voie de garage de la ligne TGV Nord. L'expérimentation avait pour but de montrer la faisabilité de la technique de renforcement des sols par des colonnes de sol-ciment ne remontant pas plus haut que la base de la couche de forme. Cette technique a l'avantage de limiter les durées de travaux de maintenance et par conséquent les interruptions de trafic. De plus, elle permet d'utiliser le sol en place, de limiter l'apport de matériau et de limiter la pollution du ballast. Elle constitue également une technique de renforcement alternative qui limiterait la formation de points durs préjudiciables à la couche de ballast.

Mots-clés : Renforcement de sol, colonnes sol-ciment, instrumentation, voie ferroviaire, extensomètre amovible.

ABSTRACT

Within the European research project INNOTRACK (INNOvative TRACK system), a field test was carried out in collaboration with SNCF, SOLETANCHE BACHY and LCPC. The experiment took place on a side track in the TGV North line. The main objective of this work was to show the feasibility of the subgrade improvement method based on vertical soil-cement columns built under the sub-ballast layer. This technique limits the duration of maintenance works and consequently traffic interruption. In addition, it allows to use the existing soil and to limit the use of concrete and cement. It represents a good soil reinforcement technique, since it does not create stiff zones at the location of each column, which might accelerate the degradation of ballast.

Keywords : Soil reinforcement, Soil-cement columns, Monitoring, Railtracks, Removable extensometer

1 INTRODUCTION

Afin de réduire le coût du cycle de vie (Life Cycle Cost ; LCC) des infrastructures ferroviaires, des travaux de recherche ont été entrepris dans le cadre du projet européen de recherche INNOTRACK (INNOvative TRACK system).

Un des objectifs de ce projet est de tester plusieurs méthodes de renforcement et/ou de traitement des sols qui, outre leur performance, doivent permettre de limiter au mieux les interruptions du trafic. Ces méthodes devront également privilégier l'utilisation des matériaux disponibles sur les sites.

La SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer français), l'entreprise SOLETANCHE-BACHY et le LCPC ont proposé de renforcer les voies au moyen de colonnes de sol-ciment.

On a donc entrepris un travail de recherche comportant :

- l'étude de faisabilité de la réalisation de colonnes sol-ciment,
- la construction de colonnes sous voies existantes entre deux traverses sur site expérimental,
- l'évaluation de la distribution des efforts le long des colonnes sous charge de service (passage de trains, etc.) et pour un chargement en compression simple du système colonne-sol,
- la comparaison du comportement d'une colonne et d'un groupe de colonnes,
- la détermination des caractéristiques mécaniques du matériau constitutif des colonnes de sol-ciment à partir d'essais en laboratoire (mesures de R_c , essais triaxiaux),
- la modélisation numérique, avec le progiciel CESAR-LCPC, du comportement des colonnes de sol-ciment installées sous les voies et l'évaluation de la présence de points durs,

- l'observation de la limite de la pollution du ballast en comparaison avec les méthodes basées sur de l'injection liquide.

Un plot expérimental a été monté sur une des voies de garage de la ligne à grande vitesse Nord à proximité de la gare TGV Haute Picardie (France). Il se divise en deux parties : une zone à proximité des voies où il a été possible de réaliser un essai de chargement statique en compression d'une colonne pour en évaluer le comportement et la capacité portante, et une zone où des colonnes de sol-ciment ont été construites sous la voie. Dans ce papier, nous n'abordons que la partie de l'étude consacrée aux colonnes sous la voie. Des comparaisons sont effectuées entre les résultats des essais en vraie grandeur et la modélisation numérique.

2 PLOT EXPERIMENTAL

Dans ce paragraphe, nous décrivons les travaux effectués dans le cadre de cette expérimentation : un sondage pressiométrique, la construction des colonnes, l'instrumentation et l'essai de chargement.

2.1 Campagne de sol

Un sondage pressiométrique ainsi qu'un carottage (non présenté ici) ont été réalisés afin de déterminer les paramètres de sol in situ utilisés dans la modélisation numérique. Le sondage PR2 (figure 1) a été réalisé à proximité de la voie de garage jusqu'à une profondeur de 13 m. Le profil et les caractéristiques mécaniques du sol retenues sont :

- de 0 à 0,10 m : couche de remblai/ballast,
- de 0,10 à 0,30 m : une couche de remblai,
- de 0,30 à 5 m : une couche de limon sableux caractérisée par une pression limite p_l telle que $0,42 \text{ MPa} \leq p_l \leq 0,65 \text{ MPa}$ avec une valeur de 1,32 MPa en surface (zone de transition entre le remblai et le limon),
- de 5 à 7 m : une couche de craie limoneuse caractérisée par une pression limite p_l telle que $0,54 \text{ MPa} \leq p_l \leq 0,77 \text{ MPa}$,
- de 7 à 13 m : une couche de craie caractérisée par une pression limite $p_l \geq 2 \text{ MPa}$.

A partir de ce sondage, on peut considérer que la couche comprise entre 0 et 6,5 m de profondeur a des caractéristiques mécaniques faibles.

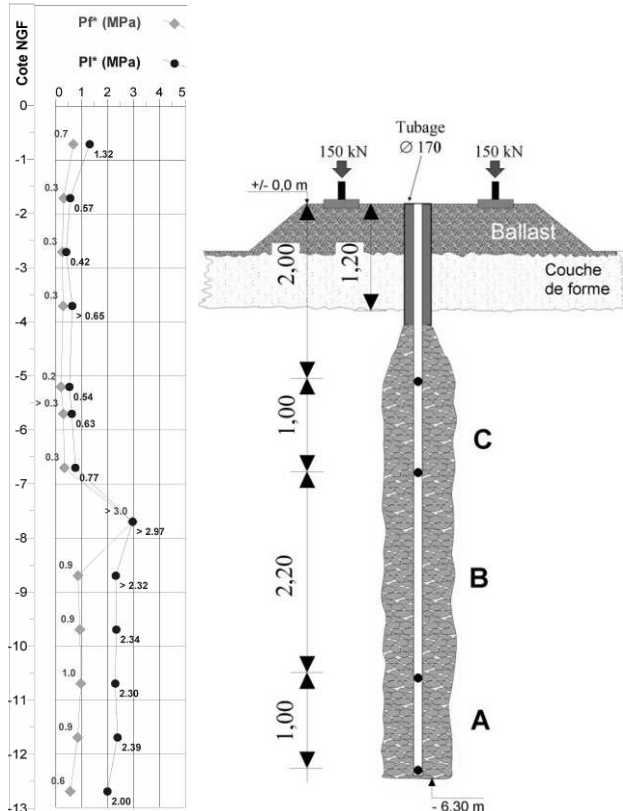


Figure 1. Sondage pressiométrique PR2 sur le site « Voie »

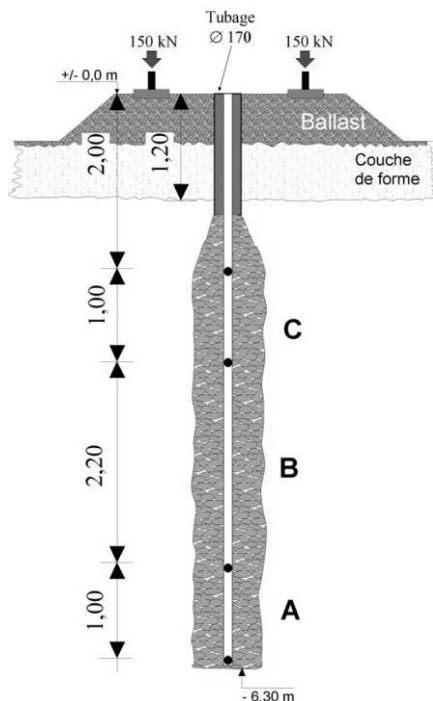


Figure 2. Schéma de principe de l'instrumentation avec la technique de l'extensomètre amovible (colonne isolée C12)

2.2 Caractéristiques et instrumentation des colonnes

Sous la voie, six colonnes sol-ciment ($200\text{-}250 \text{ kg/m}^3$ de ciment) ont été forées entre le 28 septembre et le 2 octobre 2006. Les caractéristiques géométriques des colonnes sont données dans le tableau 1. Elles ont été ancrées dans le substratum (figure 1). Deux de ces colonnes ont été instrumentées à l'aide de l'extensomètre amovible. La figure 2 montre un schéma de principe de réalisation et d'instrumentation avec la technique de l'extensomètre amovible avec les trois niveaux de mesure A, B et C. L'épaisseur de la couche constituée du ballast et des sous-couches est de l'ordre de 1m. L'implantation générale est décrite sur la figure 3.

Les quatre colonnes (figure 3 et tableau 1) du groupe qui n'ont pas été instrumentées ont été réalisées de la manière suivante :

- mise en place d'un tube métallique $\varnothing 170 \text{ mm}$ sur une hauteur de 1,40 m traversant ainsi la plate-forme ferroviaire. Il permet le passage et l'ouverture de l'outil à ailettes à la base du tube, soit une colonne qui commence à 2 m de profondeur,
- forage au tricône $\varnothing 160 \text{ mm}$ sur environ 7 m,

- forage avec la tête à ailettes ($\varnothing 400 \text{ mm}$) sur environ 7 m et injection du coulis,
- retrait du tube métallique $\varnothing 170 \text{ mm}$,
- comblement du trou avec du coulis sur la hauteur de la couche de forme, puis avec du ballast.

Les deux colonnes instrumentées (centrales) ont été construites suivant le mode opératoire suivant :

- mise en place du tube métallique $\varnothing 170 \text{ mm}$,
- forage au tricône $\varnothing 160 \text{ mm}$ sur environ 7 m,
- forage avec la tête à ailettes sur 7 m et injection du coulis,
- forage au tricône $\varnothing 80 \text{ mm}$,
- mise en place du tube logement de diamètre 52/60 mm et de longueur 6,30 m pour les extensomètres,
- complément de coulis et obturation du tube.

Tableau I. Caractéristiques des colonnes

Colonne n°	Diamètre (mm)	Longueur (m)
C10	400	6,98
C11.2B	400	6,56
C12 (instrumentée)	400	6,68
C13B	400	7,02
C14B	400	7,10
C15 (instrumentée)	400	6,30

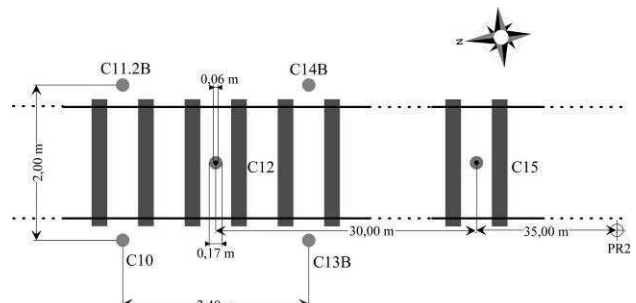


Figure 3. Schéma d'implantation des colonnes.



Figure 4. Vue de la colonne instrumentée avec les capteurs de déplacement

Le rapport C/E prévu est de 1. Les enregistrements de paramètres donnent une quantité de coulis de 50 litres par mètre de colonne.

Les colonnes ont été instrumentées en utilisant la méthode des extensomètres amovibles du LCPC (Bustamante et Gianceselli, 1996 et 2001). Pendant le chargement, les mesures suivantes ont été effectuées (figure 4) :

- mesure des enfoncements verticaux de la tête de colonne à l'aide de deux comparateurs potentiométriques au 1/100e mm et de 75 mm de course, montés sur des bases de références fixes,
- mesure de l'enfoncement vertical de la traverse bi-bloc la plus proche avec un comparateur,

Les mesures des raccourcissements unitaires $\Delta l/l$ des colonnes ont été effectuées à l'aide d'un chapelet d'extensomètres amovibles délimitant trois tronçons de mesure (Niveaux A, B et C) et disposé dans le tube-logement comme indiqué sur la figure 2.

2.3 Programme de chargement

Le chargement du massif renforcé a été réalisé à l'aide d'un train de travaux SNCF (figure 5) qui n'a été disponible que quelques heures. Ainsi, le programme de chargement s'est déroulé en deux temps :

- 1^{er} temps : l'axe de l'essieu avant de la bousse appliquant une charge de 300 kN a été placé au droit de la colonne isolée C15 pendant deux heures,
- 2^{ème} temps : l'axe a ensuite été positionné au droit de la colonne C12 située au milieu du groupe des cinq colonnes pendant 90 minutes.



Figure 5. Vue de la charge appliquée sur les rails/traverses par le train de travaux SNCF.

3 MODELISATION NUMERIQUE

La procédure utilisée pour ce calcul a consisté à reproduire en 3D et élasticité linéaire la géométrie de la structure ferroviaire (voie et sous couches) et des colonnes. Plus précisément, on a construit un maillage dans le plan horizontal qui prend en compte la position des colonnes, que l'on a ensuite traduité verticalement. La sollicitation est appliquée par l'intermédiaire d'un rail de largeur supérieure à celle d'un rail classique.

En utilisant les symétries, on obtient un maillage qui comprend 2½ colonnes (figure 6). Il est constitué de 59076 nœuds et de 13794 éléments. Pour éviter les effets de bord, l'étendue du maillage a été fixée à 14 m de longueur, 7,5 m de largeur et 7,5 m de profondeur. Les paramètres utilisés pour le calcul sont donnés dans le tableau 2.

Tableau II. Valeurs des paramètres utilisés dans les simulations

Couche/matériau	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson
Ballast	325	0,1
Limon traité	700	0,2
Couche traitée au ciment	2000	0,2
Colonne sol-ciment	1000*	0,2
Remblai	80	0,3
Limon	60	0,3
Craie	400	0,2

* Valeur estimée à partir d'essais de compression simple effectué sur des blocs de colonne récupérés lors de l'excavation de celles-ci (Le Kouby et al., 2008).

4 QUELQUES ELEMENTS DE RESULTATS

Tout d'abord, il a été nécessaire d'estimer la charge transmise par le train à la colonne centrale (au milieu des deux traverses C12 et C15) respectivement dans le cas de la colonne isolée et

de la colonne au sein du groupe ; ces deux colonnes ayant été instrumentées.

Nous n'avons pas pu installer de capteurs de force en tête des colonnes instrumentées. Néanmoins, les mesures obtenues au niveau des jauges de l'extensomètre amovible, pour la colonne isolée, semblent indiquer une charge en tête de l'ordre de 30 kN, valeur que nous allons prendre comme référence.

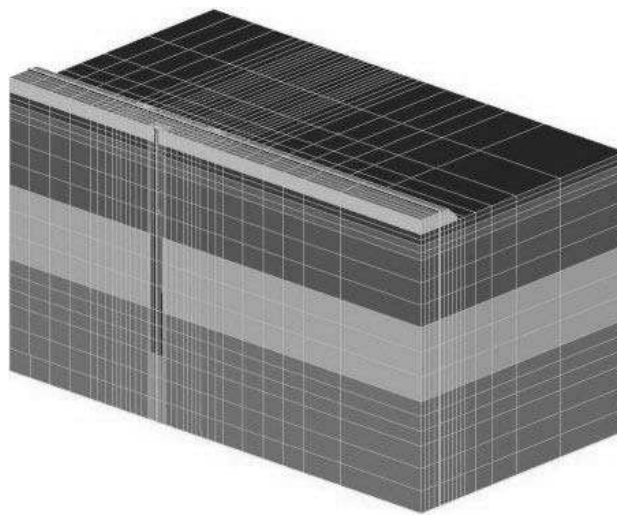


Figure 6. Maillage utilisé – cas du groupe de cinq colonnes

La modélisation numérique donne des efforts de l'ordre de 29 kN en tête de colonne pour l'inclusion isolée et 26 kN pour l'inclusion au sein du groupe soit un ratio de 1,1 entre les deux efforts appliqués en tête de colonne. Pour l'inclusion isolée, on est assez proche de l'effort en tête mesuré de 30 kN.

En ce qui concerne l'inclusion au sein du groupe, nous avons donc supposé que la charge en tête était de $30/1,1 = 27,3$ kN en tête de l'inclusion au sein du groupe ce qui est assez proche de ce qu'indiquent les mesures.

C'est à partir de ces hypothèses que nous avons pu déterminer la distribution des efforts le long de l'inclusion et comparer les mesures avec les calculs effectués par la méthode des éléments finis.

En ce qui concerne les grandeurs mesurées sur la voie de garage peu utilisée avant nos essais, les tassements (tableau 3) sont assez faibles dans le cas de l'inclusion isolée et des groupes. Dans le cas des tassements des colonnes, on est proche de la précision des capteurs (1/100^{ème} de mm). La référence des tassements pour les colonnes est située à 1 m de part et d'autre de la tête des colonnes (figure 5 ; extrémité de la tige) et pour la traverse à une distance de 1,5 m. En outre, le tassement de l'inclusion isolée est toujours supérieur à celui de l'inclusion au sein du groupe dans le cas de la traverse et du tassement en tête de colonne. Pour les déplacements, on retrouve le ratio de 5-10% du tassement subi par la structure sous-jacente et 90-95% du tassement subi par le ballast (Al Shaer, 2005).

Les tassements calculés sont deux fois supérieurs aux tassements mesurés de la traverse. Mais dans le cas du déplacement de la colonne, le calcul ne reproduit pas le ratio de 1/10 entre le tassement de la traverse et celui de la colonne que l'on avait pour les mesures mais donne plutôt un ratio de 0,5 qui semble assez élevé.

Dans le cas des mesures contraintes/efforts, on note des évolutions similaires de la distribution de contraintes (figure 7) pour l'inclusion isolée et l'inclusion au sein du groupe. Toutefois, en ce qui concerne la résistance en pointe, on note une diminution de celle-ci entre le cas isolé et celui des groupes de 5 à 2 kN. Cette diminution peut être à la fois due au fait que dans le cas des groupes l'effort se répartit entre les colonnes du groupe et que la colonne isolée est 40 cm moins longue que la colonne au sein du groupe. Le frottement de l'inclusion isolée

est assez proche du frottement mesuré sur l'inclusion au sein du groupe (tableau 3). Le frottement le plus élevé est mesuré au niveau C directement sous la tête de la colonne. Le frottement latéral est un peu plus élevé dans le tronçon le plus bas (A) pouvant traduire un sol de plus faible résistance sur le tronçon (B) de 2,2 m.

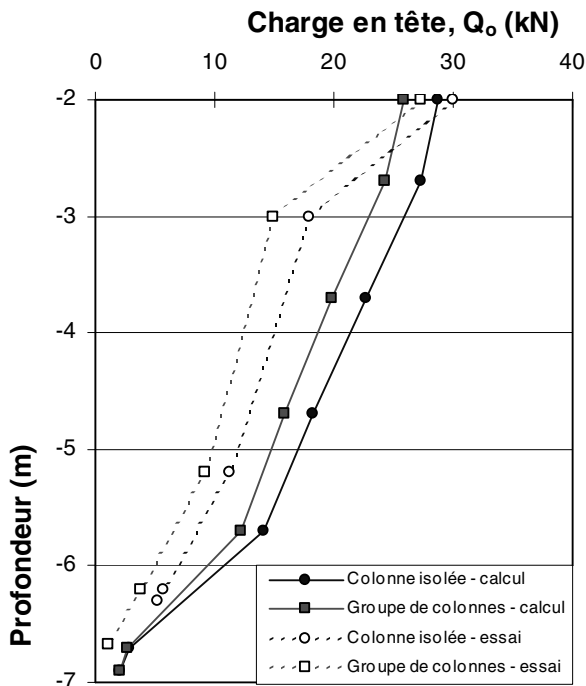


Figure 7. Distribution des efforts le long de la colonne. Comparaison entre les mesures et les calculs pour l'inclusion isolée et pour le groupe.

Dans l'ensemble, le calage du modèle par rapport aux mesures semble satisfaisant avec des valeurs de tassement du même ordre de grandeur et des valeurs de frottement latéral et résistance en pointe également du même ordre de grandeur. En outre, le frottement latéral semble augmenter légèrement avec la profondeur dans les calculs contrairement aux mesures. En ce qui concerne la résistance en pointe, dans le cas de la colonne isolée les mesures et les calculs montrent des résultats similaires alors que pour le cas du groupe les calculs montrent que la résistance en pointe reste la même contrairement aux mesures. De plus, les différences de tassement entre le cas de la traverse et celui de la colonne montraient certaines divergences.

Tableau III. Comparaison entre les résultats expérimentaux et la modélisation pour la colonne isolée et la colonne au sein du groupe

Grandeurs	Mesures	Calcul
<i>Colonne isolée</i>		
Tassement de la traverse (mm)	0,89	1,65
Tassement de la colonne (mm)	0,09	0,76
q _s (kPa) - Niveau C	10	1,8
q _s (kPa) - Niveau B	3,2	3,3
q _s (kPa) - Niveau A	4,3	9,3
Résistance en pointe (kN)	5	2
<i>Groupe de 5 colonnes</i>		
Tassement de la traverse (mm)	0,76	1,78
Tassement de la colonne (mm)	0,06	0,68
q _s (kPa) - Niveau C	9,9	4,1
q _s (kPa) - Niveau B	2,3	2,8
q _s (kPa) - Niveau A	4,3	7,9
Résistance en pointe (kN)	2	2

Il est également à rappeler que l'un des objectifs était de s'assurer de la non pollution du ballast par cette technique de renforcement, ce qui a pu être vérifié (Rocher-Lacoste and Le Kouby, 2007).

En outre, le calage du modèle numérique sur les valeurs mesurées a conduit à retenir pour les différentes couches des valeurs de modules relativement élevées (tableau 2). Cela traduit le fait que le site retenu, une voie de garage d'une ligne TGV, présentait déjà de bonnes caractéristiques. Il en résulte que le poids de l'essieu a dû bien se répartir entre le sol en place et les colonnes sol-ciment.

5 CONCLUSIONS

Un plot expérimental a été réalisé dans le but de tester la faisabilité d'une méthode de renforcement par colonnes de sol-ciment. Les colonnes ont été réalisées sous une voie de garage existante et en service. Par conséquent, les propriétés des sols étaient de qualité suffisantes pour reprendre une bonne partie des efforts appliqués si bien que les colonnes ont été relativement peu chargées.

Un travail est encore nécessaire pour caler au mieux les résultats des calculs relatifs aux tassements mesurés et de la distribution des efforts le long des colonnes. La méthode de calcul devra être validée dans le cas de sols avec des propriétés mécaniques plus faibles. L'application de cette technique de renforcement a entraîné peu de pollutions de la couche de ballast ce qui était un des objectifs recherchés : on parvient à une assez bonne maîtrise de la localisation du coulis injecté.

Des mesures dynamiques seraient nécessaires pour valider la méthode pour un contexte véritablement ferroviaire comme cela a été fait en Suède depuis plusieurs années (Holm et al., 2002). De même, des essais similaires pour des zones présentant des caractéristiques moins bonnes, permettraient de confirmer l'intérêt pratique de la technique proposée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient :

- la SNCF pour leur avoir laissé la possibilité d'utiliser une voie pour faire leurs mesures,
- la société SOLETANCHE-BACHY pour la réalisation des colonnes et pour les avoir laissé prendre des mesures sur leurs colonnes de sol-ciment.

RÉFÉRENCES

- Al Shaer, A. 2005. *Analyse des déformations permanentes des voies ferrées ballastées - Approche dynamique*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 147 pp.
- Bustamante, M., and Gianceselli, L. 2001. *Méthode d'essai n°34. La mesure des déformations à l'aide des extensomètres amovibles LPC*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 17 pp.
- Bustamante, M., and Gianceselli, L. 1996. *Méthode d'essai n°45 - Recommandations pour la préparation d'un essai de chargement statique de pieu instrumenté à l'aide d'un extensomètre LPC*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 20 pp.
- Holm, G., Andreasson, B., Bengtsson, P. E., Bodare, A. & Eriksson, H. (2002). Mitigation of track and ground vibrations by high speed trains at Ledsgard, Sweden. Report 10 ; Swedish Deep Stabilization Research Centre, 57p.
- Le Kouby, A., Guédon, S., Petkovski, I. 2008. *On the difficulty of characterizing the properties of mixed materials obtained from soil-cement columns*. Proc. of 2nd International workshop on Geotechnics of soft soils, AMGISS, pp. 249-255, Glasgow, Scotland.
- Rocher-Lacoste, F., and Le Kouby A. 2007. *Essais de chargement - gare TGV Haute Picardie*, Projet européen INNTRACK, 27 pp.