

Renforcement de plates-formes ferroviaires par colonnes de sol mixing réalisées sans enlever la voie.

Railways platforms reinforced by soil-mixing columns without track removing

Calon N., Robinet A., Costa D'Aguiar S.
SNCF, Paris, France

Briançon L., Cojean C.
Cnam, Paris, France

Mosser J.-F.
Soletanche Bachy, Rueil-Malmaison, France

RÉSUMÉ : Afin de réduire le coût global de l'infrastructure ferroviaire, la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF) et SOLETANCHE BACHY développent un procédé de renforcement des structures d'assise à l'aide de colonnes de sol ciment. D'un point de vue mécanique, les colonnes sont susceptibles de créer des points durs provoquant une dégradation de l'armement (ballast et rail) et donc un effort de maintenance plus important. Des essais de laboratoire ont été réalisés pour vérifier l'influence du positionnement des colonnes et l'efficacité des géosynthétiques pour gommer les points durs. En parallèle, des modélisations numériques pour connaître l'influence des colonnes de soil-mixing sur la raideur globale de la voie sont réalisées.

ABSTRACT: In order to reduce the Life Cycle Cost of railway infrastructure, the French National Railway company (SNCF) and SOLETANCHE BACHY have investigated the potential benefits from the ground reinforcement by vertical soil-cement columns. From a mechanical point of view, stiff zones could be created at the column location and damaged the ballast, which would involve maintenance additional works. Laboratory tests have been performed to verify the influence of the column location and the efficiency of geosynthetics on the reduction of stiff zones effects. In parallel, numerical simulations were carried out to analyze the impact of the columns on the behavior of the railway track structure in terms of deformability.

MOTS CLÉS: Plate-forme; ferroviaire; Soil-mixing; modélisation.

KEYWORDS : platform ; railway ; soil mixing ; modelisation

1 INTRODUCTION.

Le réseau ferroviaire exploité en France compte environ 29 000 km de lignes anciennes dites « lignes classiques » circulant jusqu'à 220 km/h et 2 000 km de Lignes à Grande Vitesse (LGV). Les structures d'assise des premières citées se sont constituées au cours du temps en fonction de leur histoire (Trinh 2011, 2012) : chargement et nature de matériaux mis en œuvre. Quelques tronçons de ces lignes classiques sont aujourd'hui affectés par des pathologies liées à la plate-forme. Afin de trouver une alternative aux travaux actuels, longs et coûteux, la Société Nationale des Chemins de fer Français, l'IFSTAR et SOLETANCHE BACHY développent une méthode de renforcement des structures ferroviaires, par colonnes de soil-mixing, sans nécessiter une dépose préalable de la voie. L'intérêt de cette technique est qu'elle s'inscrit pleinement dans les préceptes du développement durable, en effet, elle permet de renforcer la voie en réutilisant les matériaux du site, tout en diminuant les interceptions des circulations. C'est dans ces perspectives (technique et environnementale) que le projet de recherche Renforcement et réUtilisation des plates-formes et Fondations Existantes (RUFEX) a été initié permettant ainsi le développement et l'optimisation de l'outil Springsol®.

D'un point de vue mécanique, la mise en œuvre de colonne de soil-mixing est susceptible de créer des points durs provoquant une dégradation de l'armement (ballast, rail) et d'engendrer des efforts dynamiques supplémentaires occasionnant une maintenance accrue.

L'influence de ces colonnes, sur la voie, a donc été testée au laboratoire sur une structure échelle un. Divers complexes de géotextiles ont, également, été mis en œuvre pour établir leur effet sur le gommage des points durs. En parallèle, des modélisations numériques ont été réalisées pour définir la meilleure adéquation entre l'espacement inter colonne et leur

profondeur. L'étude de l'interaction véhicule-voie est également prévue dans le cadre de cette recherche.

2 ESSAIS EN LABORATOIRE

Plusieurs recherches ont été menées, en laboratoire, pour vérifier l'influence des géosynthétiques dans l'amélioration du comportement du ballast. Idraratna et al. (2006) ont évalué les caractéristiques du ballast à l'aide de cellules triaxiales permettant de modéliser une portion de voie. Brown et al. (2007) ont mis au point un appareil permettant de tester des géogrilles et ainsi déterminer les paramètres essentiels qui ont un rôle dans le renforcement du ballast. Kenedy et al. (2009) ont développé une machine « Geopavement & Railway Accelerated Fatigue Testing » permettant, en laboratoire, de reproduire des conditions de sollicitations proches de la réalité. A la lecture de ces documents, un dispositif d'essai existant (« Railway Accelerated Fatigue Testing » - RAFT), au laboratoire « voie » de la SNCF, a été adapté pour tester l'influence des points durs sur la voie et l'effet des géosynthétiques pour lisser ces défauts.

1.1 Dispositif et protocole d'essai

1.1.1 Dispositif d'essai

Les dimensions (3x1.5 m) de la RAFT (Figure 1a ; b) permettent de positionner à l'intérieur un châssis de voie comprenant deux traverses et deux rails. L'épaisseur de ballast mise en œuvre est conforme à celle présente en voie à savoir 30cm. Les circulations sont simulées à l'aide d'un vérin hydraulique de 200kN, approchant d'un trafic de 22,5 t/essieux, ayant une fréquence de sollicitation de 5Hz, simulant un convoi circulant à 100 km/h (Trinh, 2011). Pour simuler la zone de remontée boueuse, un tapis anti vibratile (2 cm d'épaisseur ; raideur 0,03 N/mm³) a été utilisé. Les colonnes de soil-mixing ont été

simulées par des disques de bétons de 40 cm d'épaisseur positionnés dans des réservations réalisées dans le tapis.

a)



b)

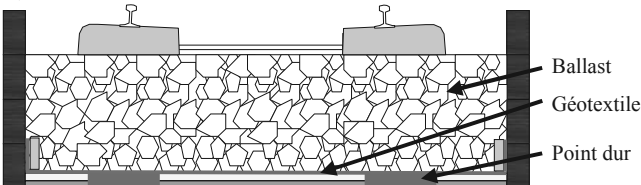


Figure 1. Vue du banc d'essai (RAFT) : a) vue globale du système ; b) coupe type

Des capteurs de pression (σ) et de tassement (S) ont été disposés à la base du ballast (Figure 2) pour étudier l'effet de chaque renforcement sur les contraintes appliquées au niveau du sol support. Des mesures au niveau du rail ont également été réalisées afin de vérifier l'effet du renforcement sur la géométrie du rail.

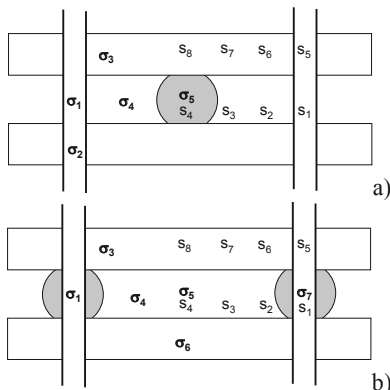


Figure 2. Localisation des capteurs de contrainte (σ_i) et de tassement (S_i), en fonction du positionnement des points durs

Trois types de configuration ont été testés : absence de colonne ; une colonne dans l'axe de la voie ; et deux colonnes sous chaque file de rails. Pour chaque configuration, différents renforcements ont été expérimentés : absence de géosynthétique ; une géogrille à la base ou dans le ballast ; un géotextile à la base du ballast ; un géotextile associé à une géogrille le tout placé à la base du ballast.

1.1.2 Protocole d'essai

Pour chaque essai, la procédure suivante a été appliquée : cinq chargements statiques de 200kN permettant de stabiliser la voie (limiter les tassements différentiels), un chargement cyclique de 100 000 périodes, encadré de trois chargements statiques de 200 kN. Un essai de répétabilité consistant en la mesure de la contrainte après les sollicitations cycliques a permis de valider cet essai (Tableau 1)

Tableau 1. Essais de répétabilité.

	Un point dur		Deux points durs	
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2
σ_1 (kPa)	53	58	85	92
σ_2 (kPa)	58	57		
σ_3 (kPa)	64	57	52	65
σ_4 (kPa)	66	44		
σ_5 (kPa)	50	49	66	-
σ_6 (kPa)			66	61
σ_7 (kPa)			84	96

1.2 Résultats et analyses

Dans un premier temps, ces essais ont mis en évidence l'effet des chargements cycliques sur la modification du mécanisme de transfert de charge. En effet, à la suite de la sollicitation, et pour la configuration sans géosynthétique, la contrainte moyenne sur les colonnes augmente de façon non négligeable (1,5x), alors que celle relevée en présence de géosynthétique est peu ou prou équivalente (Tableau 2). Notons que dans le cas où la géogrille est posée sous le ballast, nous observons une augmentation de la contrainte moyenne après sollicitation. Cette augmentation peut être due à une mauvaise mise en œuvre du produit expliquant ainsi qu'il ne fonctionne pas de façon optimum.

Tableau 2. Influence du chargement cyclique sur la contrainte à la base du ballast

essais	σ_{mov} Sol (kPa)		σ_{mov} point dur (kPa)		
	Avant	Après	Avant	Après	
Sans point dur	Sans GSY	71	67	Absence de point dur	
	GTX	66	62		
	GTX + GGR	74	60		
Un point dur	Sans GSY	66	60	89	130
	GTX	64	57	Absence de mesure	
	GTX + GGR	62	56	73	87
Deux points durs	Sans GSY	61	68	68	105
	GTX	69	62	69	82
	GGR*	60	60	65	85
	GGR*	61	62	74	94
	GGR	62	59	80	104

Note: GGR* = GGR dans le ballast

Pour mettre en évidence l'effet des géosynthétiques sur le gommage des points durs, il est nécessaire de faire un focus sur l'ensemble des capteurs de pression utilisés pour ces essais. Dans le cas d'un renforcement sous chaque file de rails (deux colonnes) et en présence de géosynthétique (hors géogrille à la base du ballast), la contrainte sur les têtes de colonne est diminuée (Tableau 3). Par ailleurs, une symétrie de chargement est observée lorsque pour le cas avec deux colonnes sous la voie ce qui d'un point de vue de la maintenance permettra d'éviter d'avoir des défauts de géométrie du rail.

Tableau 3. Pression mesurée après une sollicitation cyclique pour une augmentation de charge de 200 kN ($\sigma_i = \sigma_F = 200$ kN - $\sigma_F = 0$ kN).

	Contrainte (kPa)						
	σ_1	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	
Sans GSY	106	63	-	62	74	104	
GTX _{sous ballast}	84	64	64	71	58	80	
GGR _{sous ballast}	85	52	56	66	67	84	
GGR _{sous ballast}	101	56	62	56	63	107	

Le Tableau 4 met en évidence une augmentation de la contrainte entre les colonnes. En effet, la contrainte obtenue dans l'axe de la voie est plus élevée pour un chargement de 200kN, dans le cas où la géogrille est placée dans le ballast ou dans celui du géotextile. Ce qui n'est pas le cas pour l'essai sans géosynthétique.

Tableau 4. Pression mesurée après un chargement cyclique pour une charge statique de 200 kN ($\sigma_1 = \sigma_F = 200$ kN).

	Contrainte (kPa)					
	σ_1	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7
Sans GSY	101	63	-	69	85	102
GTX sous ballast	76	63	64	125	85	82
GGR sous ballast	79	51	56	113	94	80
GGR sous ballast	102	63	62	90	88	96

A l'inverse, le Tableau 3 montre que l'augmentation de contrainte dans les cas précités est la même quelque soit le capteur. Ainsi, en l'absence de chargement, le sol est confiné entre les colonnes par le biais d'une tension développée dans les géosynthétiques mettant en évidence un effet membrane.

1.3 Conclusion

Les tests réalisés ont montré l'efficacité des géotextiles pour gommer les points durs engendrés par les colonnes de soil-mixing. Cette efficacité dépend bien entendu du type de renforcement (et association) mis en œuvre et sa localisation dans la structure.

2 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Dans ces travaux, la modélisation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel GEFDyn (Aubry, Chouvet, Modaresi and Modaresi, 1986). Ce modèle, aux éléments finis, prend en compte les caractéristiques du sol dans une large gamme de déformation, permet de représenter les déformations irréversibles et permet de gérer jusqu'à quatre lois de comportement élastoplastiques avec quatre mécanismes différents (3 déviatoriques et un volumétrique).

Le logiciel GEFDyn permet de modéliser la voie en représentation 2,5D avec un chargement sous différents chemins de contraintes (Saez, 2009). La superstructure est composée de rails, semelle sous rail, traverses ; la structure est constituée du ballast, de la couche intermédiaire et du sol support. Le rail est modélisé par un élément poutre, tandis que les autres éléments sont constitués par des éléments quadrilatéraux. Dans un premier temps, le comportement des matériaux est modélisé par une loi élastique linéaire. Les paramètres utilisés pour les différents éléments de structure sont repris dans le Tableau 5.

Tableau 5. Paramètres de modélisation (e, épaisseur de la couche)

	E MPa	ν -	ρ kN/m ³	e mm
Rail	$210 \cdot 10^3$	0.3	7850	-
Patin	40	0.25	900	90
Traverse	30.10	0.25	2400	210
Ballast	130	0.2	1700	250
Couche Intermédiaire	180	0.3	2135	400
Sol	12.5	0.4	1800	8140
Colonne	*	0.2	1800	2160

Le tronçon de voie modélisé est long de 26 m, pour une profondeur de 9 m (Figure 3). La charge roulante est modélisée par un chargement quasi statique ($F=100$ kN à 15 km/h) appliqué sur le rail. Ce convoi simule le passage d'un engin Suisse EMW permettant de mesurer la raideur de la voie.

Ainsi dans le but d'étudier numériquement l'influence des colonnes sur la voie, trois paramètres ont été étudiés : L'espacement entre colonnes, leur profondeur et les propriétés mécaniques de la colonne de soil-mixing.

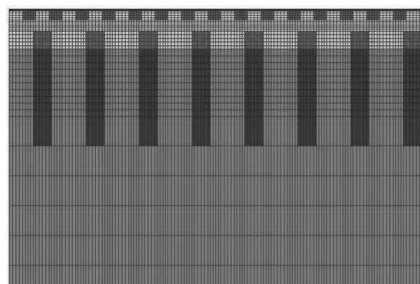


Figure 3. Maillage du tronçon de voie par élément fini, une colonne toutes les deux traverses. (Colonne : Ø400, profondeur 2.16m)

Pour représenter l'impact des colonnes sur la voie, il a été décidé de tracer la déflexion du rail sous charge roulante en fonction de sa position (x).

2.1 Résultat et analyse

La Figure 4 présente la déflexion du rail sous circulation pour différents espacements entre colonnes. Dans le cas présenté, la rigidité de la colonne est cent fois supérieure à celle du sol ($E_{col}/E_{sol}=100$).

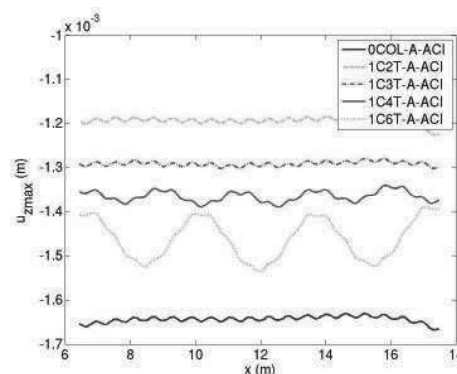


Figure 4. Déflexion du rail sous circulation, pour différents espacements entre colonnes (x, position de la charge)

La comparaison entre le cas avec une colonne toutes les deux ou trois traverses et le cas sans colonne montre que ces types de renforcement n'apporte pas de point dur sous la voie. Le signal est quasiment identique par contre, la déflexion du rail se trouve largement diminuée pour un tronçon renforcé d'une colonne toutes les deux ou trois traverses. Les variations présentes sur ce graphique, par exemple sur la courbe 0col-A-ACI sont dues à la présence des traverses. Pour les cas avec une colonne toutes les quatre ou six traverses, des pics apparaissent. Ceux-ci sont dus à la présence des colonnes de soil-mixing sous la voie. Donc lorsque les colonnes sont trop éloignées, l'effet de groupe disparaît et des points durs apparaissent occasionnant des variations de déflexion importantes.

Dans le cadre de cette étude, les simulations numériques réalisées ont également fait apparaître l'influence de la prise du ciment sur le comportement des colonnes et donc sur la réponse de la voie. De précédents articles mettent en évidence la relation entre le module de Young et la résistance à la compression simple (Tan, Goh and Yong 2002 ; Ajorloo 2010). La résistance du mélange sol/ciment dépendant principalement de la proportion de ciment et de ses caractéristiques chimiques, nous avons réalisé différents tests afin de déterminer le ratio optimum entre le module de sol et celui de la colonne et de déterminer l'impact sur la réponse de la voie. Ainsi, les cinq configurations de renforcement ont été testées avec des ratios de module compris entre 1 et 1 000.

Les Figure 5 (a) et (b) présentent les déflexions et amplitudes du rail pour un renforcement, en fonction du E_{col}/E_{sol} .

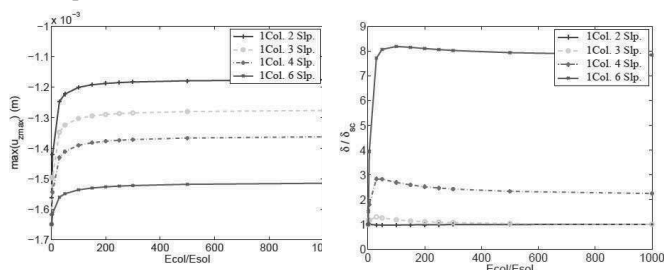


Figure 5. Impact du module de Young de la colonne de soil-mixing sur la réponse de la voie, en fonction de l'espacement entre colonnes

Ce graphique met en évidence que les déflexions du rail se réduisent à mesure que le module de la colonne augmente. Cette réduction est très importante jusqu'à ce que la colonne soit 100 fois plus raide que le sol, au-delà l'augmentation du module de la colonne n'est pas significative sur le comportement de la voie. Cette information est très importante, car elle nous permet ainsi d'optimiser la teneur en ciment du mélange.

Si nous regardons l'amplitude de variation du rail (Figure 5b) nous constatons également l'influence de ce ratio E_{col}/E_{sol} sur l'apparition de points durs. Ce graphique met en évidence un point d'inflexion, identifiant l'amplitude maximum du rail, dont le pic varie entre 25 et 100 et qui est fonction de l'espacement entre colonnes. Au-delà de ces valeurs maximums, l'amplification de raideur tend à se stabiliser voire décroître légèrement.

L'effet de la longueur de la colonne sur la géométrie de la voie est mis en évidence par la Figure 6 (a) et (b) (1 colonne/4 traverses). Les résultats montrent que la déflexion du rail diminue à mesure que la longueur de la colonne augmente, mais parallèlement les points durs sont plus marqués.

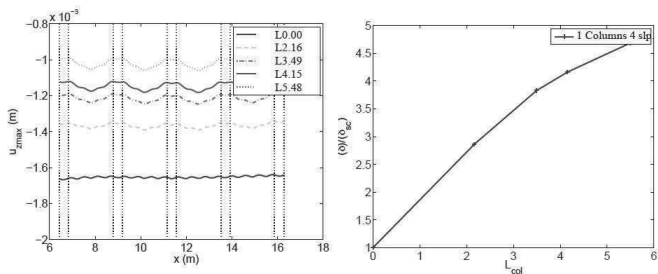


Figure 6. Impact de la longueur de la colonne sur la géométrie du rail

2.2 Conclusion

Ces modélisations ont mis en évidence l'influence des colonnes de soil-mixing sur la réponse globale de la voie et par conséquent sur la création de points durs. En parallèle, les calculs menés sur le ratio module sol/colonne, ainsi que ceux réalisés sur l'espacement inter colonne et la profondeur d'ancrage de celles-ci doivent permettre d'optimiser le maillage du renforcement et ainsi que la qualité du coulis.

3 CONCLUSION

L'intérêt de développer une technique de renforcement de plateforme par des colonnes de soil-mixing, et ce, sans enlever la voie, était devenu une nécessité pour la SNCF. Si peu de doute concernait le procédé de mise en œuvre de ces colonnes, il était nécessaire de vérifier leur impact sur la tenue de la géométrie du rail, et donc sur l'absence de création de points durs. Les essais menés en laboratoire et par simulations numériques ont permis d'une part de valider l'apport des géosynthétiques pour homogénéiser les contraintes appliquées au sol et donc de

gommer ces points et d'autre part de vérifier l'influence des colonnes sur le renforcement d'une portion de voie.

Par la suite, les travaux de modélisation 3D permettront de définir le maillage optimum des colonnes (profondeur, espacement, positionnement) et également intégrer les géosynthétiques dans le modèle pour avoir une modélisation plus représentative. Pour ce qui concerne le développement du renforcement par géosynthétique il est nécessaire de définir un produit standard qui répondra aux différentes exigences de fonctionnement (séparation / filtration / renforcement) mais également de mise en œuvre (légèreté, maniabilité).

4 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Direction Générale de la Compétitivité et des Services (DGCIS) et le Conseil Général du 93 qui cofinancent cette recherche. Nous tenons également à remercier tous les acteurs du projet RUFEX qui contribuent à son bon déroulement : Soletanche Bachy, Terrasol, IFSTTAR, INSA de Lyon et l'Ecole des Ponts ParisTech et la SNCF.

5 REFERENCES

Ajorloo A. M. (2010). Characterization of the mechanical behavior of improved loose sand for application in soil cement deep mixing. Thèse de docteur d'université, université Lille 1 science et technologie, University of Illinois, USA.

Aubry D., Chouvet D., Modaressi A., and Modaressi H. (1986). GEFDYN: Logiciel d'Analyse de Comportement Mécanique des Sols par Eléments Finis avec Prise en Compte du Couplage Sol-Eau-Air. Manuel scientifique, Ecole Centrale Paris, LMSS-Mat

Brown, S.F., Kwan, J. & Thom, N.H. 2007. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast, *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (6): 326-335.

Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W. and Christie, D. 2006. Geotechnical Properties of Ballast and the Role of Geosynthetics, *Journal of Ground Improvement*, 10(3): 91-102.

Kennedy, J.H., Woodward, P.K. Medero G. & McKinney J. 2009. Full-scale cyclic geopavement & railway accelerated fatigue testing, *Proc in the 10th International Conference on Railway Engineering, June 24-25, 2009, London, UK.*

Saez E. (2009). Dynamic nonlinear Soil-Structure interaction. Mémoire de Thèse, Ecole Centrale de Paris.

Tan T. S., Goh T. L., and Yong K. Y. (2002). Properties of Singapore marine clays improved by cement mixing. *Geotechnical Testing Journal* 25(4).

Trinh V.N. 2011. Comportement hydromécanique des matériaux constitutifs de plateformes ferroviaires anciennes. Mémoire de Thèse, Ecole Nationales des Ponts et Chaussées - Université Paris - Est

Trinh V.N., Tang A.M., Cui Y.J., Dupla J.C., Canou J., Calon N., Lambert L., Robinet A., Schoen O. (2012) Mechanical characterisation of the fouled ballast in ancient railwaytrack substructure by large-scale triaxial tests. *Soils and Foundations* 52(3), 511-523