

APPROCHE EXPÉRIMENTALE ET ANALYTIQUE DU DIMENSIONNEMENT DE RENFORCEMENTS GÉOSYNTHÉTIQUES AU SEIN DE PLATEFORMES DE TRANSFERT DE CHARGES SUR INCLUSIONS RIGIDES

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL APPROACH OF THE DESIGN OF A GEOSYNTHETIC-REINFORCED LOAD TRANSFER PLATFORM OVER RIGID INCLUSIONS

Audrey HUCKERT¹, Sébastien REYNAUD¹, Pascal VILLARD², Germain AURAY³, Olivier GUERIN⁴

¹ EGIS Géotechnique, Seyssins, France

² Laboratoire 3SR : Sols, Solides Structures et Risques, UJF – INP - CNRS, Grenoble, France

³ Texinov, La Tour-du-Pin, France

⁴ COSEA SGI, Paris, France

RÉSUMÉ – La technique d'amélioration des sols par inclusions rigides est associée de plus en plus souvent à une géogridde de renforcement positionnée en base de remblai ou au sein de la plateforme de transfert de charges. Le dimensionnement du renforcement géosynthétique reste cependant délicat car les mécanismes de reports de charges sont peu connus. De récents développements (dont ceux de Van Eekelen *et al.*, 2012, 2013) ont permis une avancée sur le plan théorique en intégrant notamment la réaction du sol présent entre les inclusions rigides. Cependant ces développements ne tiennent pas compte de l'interaction entre ce sol et les inclusions. Une méthodologie de dimensionnement alternative est proposée et confrontée aux méthodes analytiques existantes pour des cas d'instrumentation d'ouvrages en vraie grandeur.

Mots-clés : Renforcement géosynthétique, inclusions rigides, plateforme de transfert de charges, dimensionnement

ABSTRACT – Rigid inclusions used to limit settlements of embankments over soils with low mechanical characteristics are more and more associated with a geogrid, placed at embankment base, or into the transfer layer. Design of this geogrid remains difficult, since load transfers within the embankment and solicitation of these reinforcements remain not well known. Some recent developments (Van Eekelen *et al.*, 2012, 2013) enabled to include the response of the soil between inclusions, but they don't take into account interaction between it and rigid inclusions. An alternative design methodology is proposed here and its results are confronted to existing analytical methods and measurements.

Keywords: Geosynthetic reinforcement, rigid inclusions, load transfer platform, design

1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude

Les aménagements de nouvelles infrastructures de transport, notamment ferroviaires, sont contraints par la traversée de régions dont les terrains présentent de faibles caractéristiques mécaniques. La construction d'un remblai nécessite alors l'amélioration du sol afin de limiter l'ampleur des tassements de surface sous l'effet du poids de l'ouvrage et des charges de trafic, voire d'assurer la stabilité même du remblai. Parmi les solutions existantes, la technique de renforcement par inclusions rigides en béton peut être avantageusement optimisée par l'emploi d'un géosynthétique de renforcement positionné à la base du matelas de transfert de charge pour limiter le poinçonnement de la base du remblai sus-jacent.

Les méthodes de dimensionnement analytique actuelles de renforcements géosynthétiques sur inclusions rigides sont généralement issues d'études expérimentales. Elles sont fondées sur des hypothèses fortes qui définissent les mécanismes de transfert de charge dans le remblai vers les inclusions, et la forme de la distribution de charge sur les géosynthétiques. Les travaux récents sur le sujet impliquent le projet de recherche français A.S.I.RI (Amélioration de Sols par Inclusions Rigides), dont les expérimentations en vraie grandeur ont permis de localiser les principales déformations du renforcement géosynthétique sur une bande de géosynthétique au droit des inclusions rigides et de préciser son comportement mécanique (Briançon et Simon, 2012). Enfin, des études en laboratoire (Eekelen van *et al.*, 2012a) ont précisé la forme de la distribution de la contrainte verticale sur ces bandes de renforcement géosynthétique. Ces études ont permis de définir un nouveau modèle de

transfert de charges au sein du remblai. Il reste cependant à quantifier l'apport réel du géosynthétique dans les transferts de charges.

Afin de compléter les connaissances actuelles sur le sujet, des études expérimentales en vraie grandeur et analytiques ont été entreprises dans le cadre du projet de recherche français Geolnov. Ce projet regroupe des partenaires issus de l'industrie et de la recherche : les entreprises Texinov (porteur du projet) et Afitex, le bureau d'études Egis Géotechnique, l'IFTH, le laboratoire 3SR et le Cnam. Le projet est co-labellisé par les pôles de compétitivité Techtera et Fibreset financé dans le cadre du FUI (AAP 10). L'objectif principal de ce projet est de développer des solutions nouvelles, tant en termes de méthodes de calcul que de produits géosynthétiques, pour le renforcement et le drainage des sols atypiques. Le renforcement de plateformes de transfert de charges sur inclusions rigides constitue l'un des axes d'application du projet. L'étude analytique s'intègre ainsi dans le cadre du développement de techniques internes du bureau d'études.

1.2. Fonctionnement d'un renforcement géosynthétique sur inclusions rigides

Le renforcement géosynthétique est inséré au sein de la plateforme de transfert de charges (PTC), elle-même située en base du remblai sur inclusions rigides. Ce renforcement géosynthétique de la PTC a pour rôles de contribuer au transfert de charges vers les inclusions rigides, de diminuer la sollicitation du sol entre les inclusions (sols de caractéristiques mécaniques faibles), et donc de contribuer à la réduction des tassements du remblai.

Concrètement, lors de la mise en œuvre du remblai, une partie des charges provenant du poids de ce remblai est directement transmise aux inclusions grâce à des mécanismes de transfert de charges développés dans la PTC. Le restant de la charge est repris en partie par le sol support, et en partie par le renforcement géosynthétique. Le géosynthétique se déforme ainsi par « effet membrane » avec un déplacement vertical plus important au centre d'une maille d'inclusions rigides qu'au droit des inclusions elles-mêmes (Figure 1).

La différence de déplacement vertical du géosynthétique entre le centre de la maille et le bord des inclusions induit sa mise en tension, les principales déformations du renforcement étant localisées au droit de l'arrête des têtes d'inclusions rigides.

Par ailleurs, étant disposé en base du remblai, le géosynthétique permet d'en limiter le poinçonnement par les inclusions sous-jacentes.

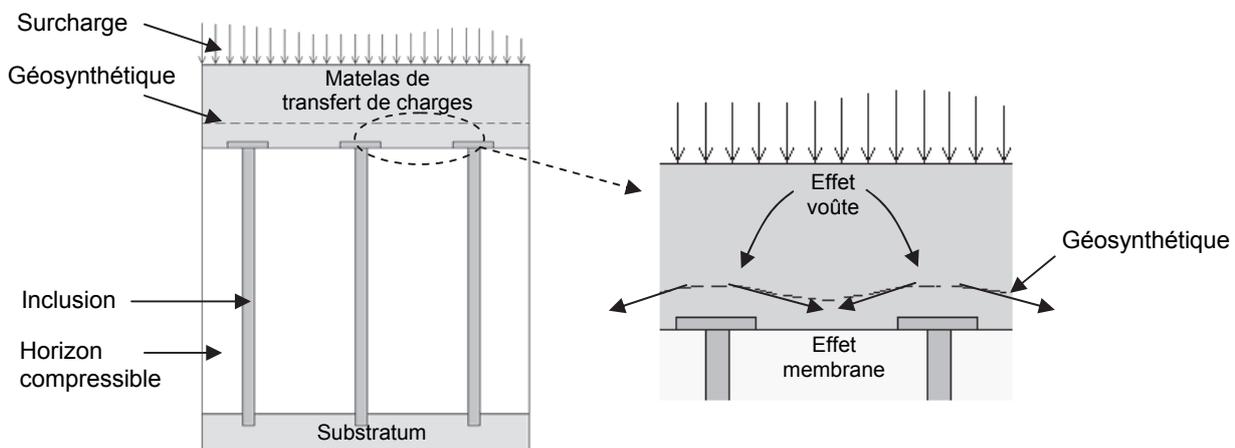


Figure 1. Fonctionnement d'un renforcement géosynthétique sur inclusions rigides

Au sein de la plateforme de transfert de charges, on constate par ailleurs entre les inclusions la présence d'un volume de remblai qui se déplace vers le bas en même temps que le renforcement géosynthétique qui se déforme par « effet membrane ». Le remblai localisé au droit des inclusions rigides reste quand à lui stable. Les efforts supportés par le volume de remblai en mouvement sont reportés par effet voûte vers la zone de remblai stable au droit des inclusions. Un report de charges partiel vers le renforcement géosynthétique a également lieu.

2. Méthodes de dimensionnement analytique existantes

Les principales méthodes de dimensionnement disponibles dans la littérature diffèrent principalement par leurs hypothèses de transfert de charge du remblai vers les inclusions, et par le type de distribution de charge sur les géosynthétiques (Figure 2). Ainsi, la révision de la norme anglaise BS8006 (BSI, 2010) propose deux méthodes de calcul des transferts de charges sur le renforcement géosynthétique : d'après la formulation de Marston (John, 1987) ou les travaux d'Hewlett et Randolph (1988), où les transferts de charges sont représentés par un dôme hémisphérique dans le remblai au-dessus de la maille d'inclusions. Plus récemment, les travaux de Kempfert (Kempfert *et al.*, 1997, 1999) et de Zaeske (Zaeske, 2001) ont défini la base des recommandations allemandes et néerlandaises (EBGEO, 2010 ; CUR226, 2010), pour lesquelles les transferts de charges sont représentés par des hémisphères non concentriques dans le remblai.

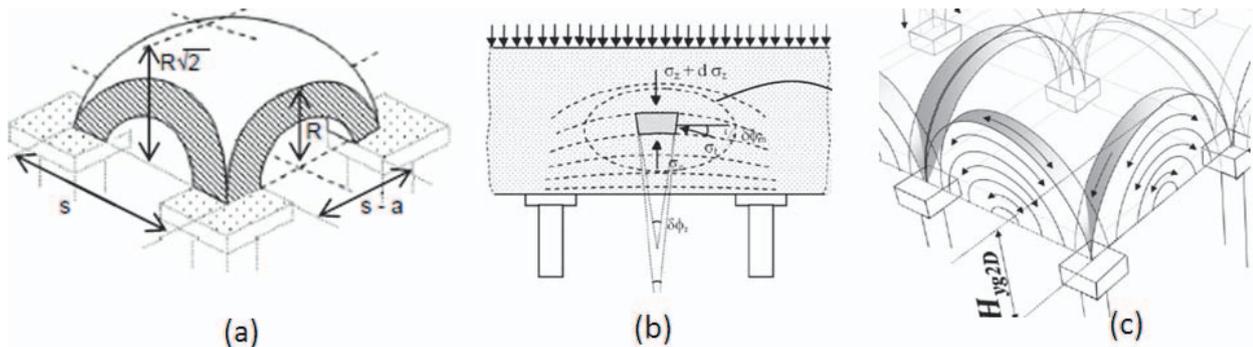


Figure 2. Méthodes analytiques existantes – Mécanismes de transfert de charges dans le matelas (a : Hewlett & Randolph, 1998, b : Zaeske, 2001 ; c : Van Eekelen *et al.*, 2013)

Ainsi, on peut résumer comme suit les spécificités de chacune de ces méthodes :

- *Norme anglaise BS8006 (2010)* : La révision de cette norme (British Standard, 2010) permet d'utiliser une formulation tridimensionnelle, suivant un dôme hémisphérique en appui sur les inclusions d'une même maille (Hewlett et Randolph, 1988) (Figure 2a). Le dimensionnement de la géogrille repose sur une distribution homogène constante de la contrainte verticale sur le renforcement, sans modélisation de la réaction du sol de fondation.
- *Recommandations allemandes EBGEO (2010)* : Les recommandations allemandes considèrent un transfert de charge selon une succession d'hémisphères non concentriques en appui sur les inclusions (Kempfert *et al.*, 1997, 1999, Zaeske, 2001) (Figure 2b). Dans cette approche, seule la bande de géosynthétique reliant deux inclusions voisines est sollicitée par un chargement triangulaire (contrainte minimale au droit des inclusions). Le calcul intègre une possible réaction du sol support.
- *Recommandations néerlandaises CUR 226 (2010)* : Les recommandations néerlandaises consistent en une optimisation de l'approche allemande en intégrant notamment le calcul d'un coefficient de réaction à l'échelle d'une maille d'inclusion, ou la prise en compte de la mise en œuvre du renforcement dans le calcul des géosynthétiques (déformation initiale).
- *Travaux de Van Eekelen (2012 et 2013)* : Sur la base de ces approches, les travaux de Van Eekelen *et al.* (2012b) ont permis d'étendre le comportement de la bande de géosynthétique, par correction du coefficient de réaction du sol. Par analogie avec des mesures expérimentales, la distribution de contraintes sur le géosynthétique est triangulaire inversée (contrainte maximale au droit des inclusions). Enfin une alternative proposée par Van Eekelen *et al.* (2013) tient compte d'un mécanisme de report de charge dans le remblai par une succession d'hémisphères concentriques (Figure 2c), ce qui permet de justifier des valeurs de contraintes plus élevées sur la portion de nappe géosynthétique située au voisinage de la tête des pieux.

3. Proposition d'optimisation du dimensionnement analytique

3.1. Lacunes des méthodes de dimensionnement existantes

Les méthodes de dimensionnement analytique existantes peuvent faire appel à des hypothèses simplificatrices relativement fortes. Ainsi, les transferts de charges et le type de distribution de contraintes sur le géosynthétique sont estimés selon différents mécanismes : voûtes hémisphériques

concentriques ou non, distribution de contrainte de forme triangulaire ou triangulaire inversée sur le géosynthétique. Une réaction du sol support peut également être prise en compte.

Ces méthodes considèrent que les tassements sont homogènes sur la maille d'inclusions rigides lors du calcul du coefficient de réaction du sol support. Elles ne tiennent donc pas compte de « l'effet d'accrochage » du sol sur les inclusions par frottement négatif sol/inclusion (Combarieu, 1974).

3.2. Développements analytiques proposés

Afin d'ajouter la prise en compte de l'effet d'accrochage du sol sur les inclusions dans le calcul du coefficient de réaction du sol support, une méthodologie de dimensionnement a été proposée et testée.

La première étape de cette méthode consiste à tracer une courbe, qui caractérise le comportement de l'ouvrage sous le niveau des têtes d'inclusions, reliant tassements et contrainte appliquée sur le sol (Figure 3) par la méthode de Combarieu (1990). Cette méthode (Combarieu, 1990) considère un transfert de charges du remblai vers les inclusions par le biais d'une colonne de sol fictive prolongeant les inclusions au sein de la PTC. Le cisaillement à l'interface de ces colonnes de sol fictives est à l'origine du report de charges vers les inclusions.

La courbe obtenue (Figure 3) permet alors de déterminer une valeur du coefficient de réaction du sol en tenant compte du niveau de tassement attendu en présence d'un renforcement géosynthétique. Ce coefficient de réaction correspond à la pente de la courbe pour la valeur de tassement du sol considérée.

L'étape suivante consiste alors à dimensionner le renforcement géosynthétique par la méthode de Van Eekelen *et al.* (2012b), en intégrant le coefficient de réaction du sol précédemment déterminé.

Enfin, ce processus est répété à partir de la première étape, jusqu'à atteindre une convergence entre le comportement du géosynthétique (traction et déflexion) et la réponse du sol (contraintes transmises au sol sous le renforcement géosynthétiques et tassements induits).

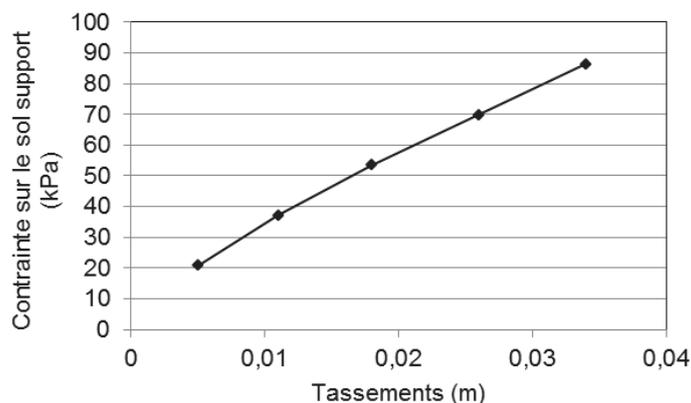


Figure 3. Tassement du sol sous le renforcement géosynthétique pour une contrainte donnée (exemple : cas du chantier expérimental) (Combarieu, 1990)

4. Confrontation des méthodes analytiques sur des cas de chantier réels

Les résultats des méthodes de dimensionnement analytiques sont confrontés sur deux zones d'instrumentations en vraie grandeur, localisées sur le chantier de la Ligne Nouvelle à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique (LGV SEA). La section reliant Tours à Bordeaux comprend en effet plusieurs zones renforcées par inclusions rigides avec plateforme de transfert de charges. Les géosynthétiques, objet de la présente étude, sont proposés en renforcement de ces plateformes.

4.1. Chantier expérimental

L'instrumentation d'un remblai sur le lot 12 de la LGV SEA, à proximité d'Angoulême, a été réalisée dans le cadre du projet de recherche. L'objectif est de mesurer les contraintes verticales et les tassements en base de remblai de 2,4 m de haut mis en œuvre sur un réseau d'inclusions en béton de type CMC © de 8,3 m de long et 0,3 m de diamètre, agencées selon un maillage carré de 1,7 x 1,7 m. La base du remblai comprend une plateforme de transfert de charges de 0,8 m d'épaisseur en grave 0/63 mm, le

reste du remblai étant constitué de grave 0/150 mm. Les caractéristiques minimales des matériaux de la plateforme de transfert de charge, données par les hypothèses du projet, sont :

- poids volumique : 21 kN/m³ ;
- cohésion : 0 kPa ;
- angle de frottement interne : 35 degrés.

La plateforme de transfert de charges est renforcée par deux géogrilles Notex PVA C ® croisées, de résistance en traction 800 kN/m et équipées de fibres optiques avec réseaux de Bragg permettant de mesurer leurs déformations. Ces fibres optiques sont directement intégrées dans la géogrille de renforcement au cours de sa fabrication, les déformations de la géogrille étant ainsi mesurées sans structure support intermédiaire. Le reste de l'instrumentation consiste en des cellules de pression totale et des capteurs de tassement de type transducteurs de pression, permettant respectivement d'estimer les reports de charges et tassements au sein de la maille d'inclusions rigides.

Les différentes méthodes analytiques de dimensionnement existantes, ainsi que la méthode proposée, ont été appliquées en modélisant le remblai situé au-dessus de la PTC comme une surcharge uniforme.

Pour ce cas d'étude, on constate que les reports de charges suivant un dôme hémisphérique (BS8006) ou une succession d'hémisphères concentriques (Van Eekelen *et al.*, 2013) tendent à surévaluer la charge transmise en tête d'inclusions par rapport aux mesures expérimentales (Tableau 1). Par contre, les résultats obtenus à partir d'un report de charge suivant une succession d'hémisphères non concentriques (EBGEO, CUR226, Van Eekelen *et al.*, 2012) sont en adéquation avec les mesures expérimentales.

Tableau 1. Reports de charge au sein de la PTC dans les zones renforcées par géogrille (chantier expérimental)

H (m)	Résultat	Expérimental	BS8006 (Hewlett & Randolph)	EBGEO, CUR226 & Van Eekelen <i>et al.</i> (2012b)	Van Eekelen <i>et al.</i> , 2013, 2012b	Méthode proposée
1,6	Effort vertical sur l'inclusion (kN)	10,4	33,2	10,5	22,8	10,5
	Report de charge sur l'inclusion (%)	10,7	34,17	10,8	23,5	10,8
2,0	Effort vertical sur l'inclusion (kPa)	15,4	41,5	13,1	28,6	13,1
	Report de charge sur l'inclusion (%)	12,7	34,17	10,8	23,5	10,8
2,4	Effort vertical sur l'inclusion (kN)	16,4	49,8	15,7	34,3	15,7
	Report de charge sur l'inclusion (%)	11,2	34,17	10,8	23,5	10,8

Afin de pouvoir comparer les résultats de transfert de charges vers les inclusions, les reports de charges obtenus par la méthode proposée sont calculés au sein de la PTC, sans tenir compte de l'interaction sol/inclusion ayant lieu sous la PTC. Le calcul est donc effectué selon Kempfert *et al.* (1997, 1999) et Zaeske (2001).

Dans l'ensemble, les méthodes analytiques aboutissent à des déformations maximales du géosynthétique bien plus élevées que que les mesures expérimentales effectuées dans la géogrille supérieure (Tableau 2). Plus spécifiquement, on constate que les méthodes basées sur une distribution triangulaire de la contrainte sur le renforcement (EBGEO, CUR226) conduisent à des déformations maximales plus élevées que les approches reposant sur distribution triangulaire inversée (Van Eekelen).

On notera que les déformations mesurées expérimentalement sont données pour une seule géogrille située à 0,4 m au-dessus de la tête des inclusions (nappe la moins sollicitée), alors que les approches analytiques considèrent deux nappes croisées localisées à 0,3 m (cote moyenne des deux nappes) au-dessus des inclusions. La confrontation entre les résultats analytiques et les mesures expérimentales souligne la pertinence de la méthode proposée pour ce cas d'étude.

Tableau 2. Déformation maximale des géogrilles

H (m)	Expérimental	BS8006 (Hewlett & Randolph)	EBGEO	CUR226	Van Eekelen et al. (2012b)	Van Eekelen et al. 2013, 2012b	Méthode proposée
1,6	0,23	0,49	1,17	0,75	0,50	0,43	0,56
2,0	0,26	0,61	1,52	1,02	0,62	0,53	0,72
2,4	0,32	0,72	1,92	1,33	0,74	0,64	0,85

4.2. Plot expérimental de la Virvée

La seconde instrumentation en vraie grandeur correspond à un plot expérimental réalisé lors du chantier du lot 15 de la LGV SEA (La Virvée) par COSEA-SGI.

Le plot étudié consiste en un remblai de 4,3 m de hauteur sur un réseau d'inclusions rigides en béton de 0,3 m de diamètre disposées selon un maillage de 1,8 x 1,8 m. Les caractéristiques retenues pour le matériau de remblai sont :

- poids volumique : 21 kN/m³ ;
- cohésion : 0 kPa ;
- angle de frottement interne : 35 degrés.

Comme pour le cas du chantier expérimental précédent, deux géogrilles croisées de résistance en traction 800 kN/m et équipées également de fibres optiques avec réseaux de Bragg sont installées en base du remblai. Le reste de l'instrumentation mise en œuvre est similaire au chantier expérimental précédent (cellules de pression totale et capteurs de tassement).

Pour ce cas d'étude (à la différence du cas précédent qui met en œuvre une plateforme de transfert de charges), les méthodes de dimensionnement analytiques sont appliquées en supposant que les reports de charges peuvent s'effectuer sur toute la hauteur du remblai.

La comparaison des résultats de transfert de charges (Tableau 3) montre pour ce cas d'étude que les méthodes de dimensionnement existantes tendent à sous-évaluer le transfert de charges sur les inclusions rigides. L'analyse des valeurs de déformations maximales des géogrilles (Tableau 4) indique que la méthode de Van Eekelen *et al.* (2012b, 2013) fournit des résultats proches des mesures expérimentales. Cela confirme que la distribution de contrainte de forme triangulaire inversée est pertinente. Enfin, il semble que la méthode proposée, qui prend aussi en compte de l'interaction entre le sol support et les inclusions, permette de fournir des résultats encore plus proches des mesures expérimentales. À nouveau, la confrontation des résultats analytiques et expérimentaux souligne, pour ce cas d'étude, la pertinence de la méthode proposée.

Comme pour le cas du chantier expérimental, on note qu'afin de pouvoir comparer les résultats de transfert de charges vers les inclusions, les reports de charges obtenus par la méthode proposée sont calculés au sein de la PTC, sans tenir compte de l'interaction sol/inclusion ayant lieu sous la PTC. Le calcul est donc effectué selon Kempfert *et al.* (1997, 1999) et Zaeske (2001).

Tableau 3. Reports de charge au sein de la PTC dans les zones renforcées par géogrille

H (m)	Résultat	Expérimental	BS8006 (Hewlett & Randolph)	EBGEO, CUR226 & Van Eekelen et al. (2012b)	Van Eekelen et al. 2013, 2012b	Méthode proposée
4	Effort vertical sur l'inclusion (kN)	254	97,8	97,8	100,6	97,8
	Report de charge sur l'inclusion (%)	86,9	33,4	33,4	34,4	33,4

Tableau 4. Déformation maximale des géogrilles au droit des inclusions

H (m)	Expérimental	BS8006 (Hewlett & Randolph)	EBGEO	CUR226	Van Eekelen et al. (2012b)	Van Eekelen et al. 2013, 2012b	Méthode proposée
4	1,1 à 1,3 %	1,74 %	3,4 %	3,0 %	1,7 %	1,6 %	1,2 %

5. Conclusions

Les hypothèses considérées dans les méthodes de dimensionnement analytiques existantes des géosynthétiques disposés en tête d'inclusions rigides diffèrent sur trois points : le type de transfert de charges au sein du remblai, celui de la sollicitation du renforcement géosynthétique, et la prise en compte ou non d'une réaction du sol entre les inclusions. Cette dernière hypothèse permet de ne pas surestimer le transfert de charge vers les inclusions rigides, en permettant au sol de reprendre une partie des charges transmises par le remblai. Néanmoins, la réaction du sol actuellement considérée dans les méthodes existantes ne tient pas compte de son interaction avec les inclusions rigides. La nouvelle méthode proposée ici prend en considération l'effet d'accrochage sol/inclusion (Combarieu, 1990) pour la détermination du coefficient de réaction du sol.

Les méthodes analytiques existantes et la proposition d'optimisation sont comparées sur deux cas d'instrumentation en vraie grandeur mises en œuvre dans le cadre du chantier de la future ligne ferroviaire à grande vitesse reliant Tours à Bordeaux. Il en ressort que les développements récents de Van Eekelen *et al.* (2012, 2013), portant sur mode de sollicitation du géosynthétique et sur les reports de charges dans le remblai, permettent une bonne approximation des mesures expérimentales. Dans le cas du plot de la Virvée en particulier, la concordance entre les résultats analytiques et les mesures expérimentales est meilleure par la prise en considération de l'interaction entre les inclusions rigides et le sol qui les contient.

6. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les partenaires techniques et financiers du projet qui ont rendu possible les expérimentations, ainsi que les équipes COSEA-SGI pour leur aide sur le site instrumenté et la mise à disposition de données expérimentales.

7. Références bibliographiques

- British Standard Institute. (1995) BS8006:1995 – Code of practice for strengthened/reinforce soils and other fills, 160 pages.
- Combarieu O. (1974) Effet d'accrochage et méthode d'évaluation du frottement négatif, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 71, pp. 93-107.
- Combarieu O. (1990) Fondations superficielles sur sol amélioré par inclusions rigides verticales, *Revue Française de Géotechnique*, n°53, pp. 33-44.
- CUR-publicatie 226. (2010) Ontwerprichtlijn Paalmatrassystemen: Stichting CUR, Gouda, ISBN 978-90-376-0518-1, 140 pages.
- EBGEO (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.) (2008). Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen, 280 pages.
- Eekelen S. van, Bezuijen A., Lodder H.J., Tol A.F. van. (2012a). Model experiments on piled embankments - Part I, *Geotextiles and Geomembranes Vol. 32*, Juin 2012, pp 69-81.
- Eekelen S. van, Bezuijen A., Lodder H.J., Tol A.F. van. (2012b) Model experiments on piled embankments - Part II, *Geotextiles and Geomembranes Vol. 32*, Juin 2012, pp 82-94.
- Eekelen S. van, Bezuijen A., Tol A.F. van (2013). An analytical model for arching in piled embankments, *Geotextiles and Geomembranes Vol. 39*, Août 2013, pp. 78-102.
- Hewlett, W.J., Randolph, M.A. (1988). Analysis of piled embankments, *Ground Engineering*, April 1988, pp 12-18.
- Huckert A. (2014). Approches expérimentale et numérique du dimensionnement de renforcements géosynthétiques sur cavités et inclusions rigides. *Thèse de doctorat, Université de Grenoble*, 224 pages.
- John N.W.M. (1987). *Geotextiles*, Blackie, Glasgow.
- Kempfert H.G., Stadel M., Zaeske D. (1997). Berechnung von geokunststoffbewerten Tragschichten über Pfahlelementen, *Bautechnik* 74, Heft 12, pp. 818-825.
- Kempfert H.G., Zaeske D., Alexiew D. (1999). Interactions in reinforced bearing layers over partial supported underground, *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, Barends et al. (ed), Balkema, Rotterdam, pp. 1527-1532.
- Zaeske D. (2001). Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. *PhD thesis, Uni Kassel, Zeitschriftenreihe Geotechnik*, Heft 10, Kassel.

