

RÉPARATION D'UN MUR DE SOUTÈNEMENT MAÇONNÉ ET RENFORCEMENT DU REMBLAI PAR GÉOSYNTHÉTIQUE

REPAIR OF A MASONRY WALL AND REINFORCEMENT OF THE EMBANKMENT FILL BY GEOSYNTHETICS

Alain NANCEY, Anna LE FAOUDER
TenCate Geosynthetics, Bezons France

RÉSUMÉ – En janvier 2014, une fuite d'une conduite d'eau a provoqué l'affaissement de la chaussée sur la rampe d'accès à un pont traversant la Seine à l'ouest de Paris. La réparation de la structure a dû faire face à deux problèmes majeurs. Le premier était lié à la mauvaise qualité du sous-sol avec un risque élevé de tassements et la présence de canalisations. Le second était la nécessité de maintenir en place le mur de béton existant partiellement endommagé afin de limiter la durée et l'emprise des travaux. C'est pourquoi il a été décidé de construire un remblai renforcé en évitant toute pression horizontale sur la structure en béton.

Mots-clés : Mur, Renforcement, Remblai, Sols fins.

ABSTRACT – In January 2014, a leak in a water pipe caused the pavement to sag on the ramp to a bridge across the Seine west of Paris. The repair of the structure had to face two major problems. The first was related to the poor quality of the subsoil with a high risk of settlements and the presence of pipes. The second was the need to keep the existing partially damaged concrete wall in place in order to limit the duration and reach of the work. The proposed solution was to build a reinforced embankment avoiding any horizontal pressure on the concrete structure.

Keywords: Wall, Reinforcement, Embankment, Fine soils.

1. Introduction

Fin janvier 2014, un affaissement de la chaussée a été constaté sur la rampe d'accès nord au pont Georges Pompidou traversant la Seine sur la commune de Le Pecq à l'ouest de Paris. La cause principale s'est avérée être une fuite d'une conduite d'eau enterrée sous le quai Voltaire et située le long de la rampe du côté opposé à la rivière (Fig. 1). La rampe est constituée d'un remblai routier confiné par deux murs en béton armé sur semelle superficielle.



Figure 1. Vue aérienne et désordres observés au parement

Des investigations approfondies ont montré des désordres partiellement cachés par les parements du mur en béton armé. Les fuites d'eau ont provoqué un lessivage du sol en profondeur en entraînant les fines particules du sol, ce qui a provoqué des tassements. La fondation des murs de soutènement latéraux maçonnés a été affaiblie avec, pour conséquences, l'apparition de fissures et une rupture d'alignement de la corniche et des garde-corps et des décalages au niveau des parements des murs de soutènement (Fig. 1). Une partie du mur s'est inclinée contre le mur adjacent, ajoutant ainsi une surcharge locale à la fondation qui aurait pu perturber l'équilibre général de la paroi et induire d'autres déplacements et déformations à plus ou moins long terme.

Pour limiter l'impact sur le trafic de 43000 véhicules par jour au niveau du pont, il fallait maintenir une voie de circulation. Mais il fallait aussi soulager le mur béton en attendant la réalisation de la réparation complète de l'ouvrage. Il a été décidé d'enlever le remblai sur un côté de la rampe et ainsi de supprimer la poussée des terres appliquée sur le mur. Dans l'attente des réparations la largeur de la route a donc été réduite (Fig. 2). Pour la phase de reconstruction, le remblai a été dégagé sur toute la largeur de la rampe.

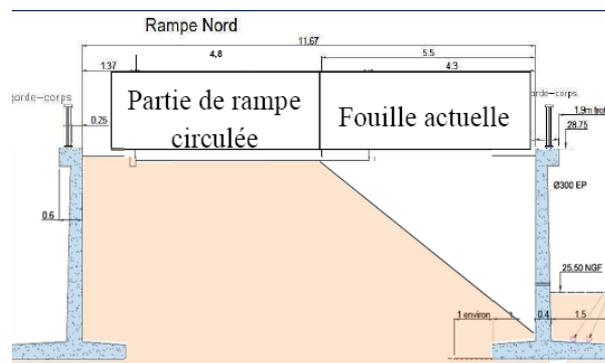


Figure 2. Profil en travers de la rampe avant la phase de reconstruction

2. L'ouvrage et sa réparation

La réparation de la structure a dû faire face à deux problèmes majeurs. Le premier était lié à la mauvaise qualité du sous-sol avec un risque élevé de tassements et à la présence de canalisations d'eau. Le second était la nécessité de maintenir en place le mur de béton existant pour limiter la durée et l'étendue des travaux. Cependant, une simple remise en état n'aurait pas suffi à garantir que les murs béton seraient en mesure de supporter les charges d'un trafic croissant. Il a été décidé de construire un remblai renforcé par géosynthétique pour éviter toute pression horizontale sur la structure en béton. Cette solution souple a également été jugée la meilleure pour absorber les tassements différentiels dû à la mauvaise qualité du sol de fondation. Pour limiter le coût des travaux, le matériau de remblai était un sol limoneux provenant du site. L'utilisation d'un géocomposite de renforcement avec de bonnes caractéristiques hydrauliques, capable à la fois de renforcer et de dissiper la pression interstitielle a permis un bon compactage du remblai, réduisant ainsi le risque de déformation supplémentaire et assurant la stabilité de la rampe. Les travaux de terrassement ont été réalisés en août 2016 et la réouverture de la largeur totale de la route s'est effectué fin 2016.

2.1. Description de l'ouvrage et contexte géotechnique

La rampe de longueur 100 m est dissociée du pont par un joint de dilatation et de hauteur croissante avec l'élévation qui atteint 5,4 m au niveau du pont. Les relevés et essais effectués sur le site ont mis en évidence des couches successives de chaussées et des remblais ayant une faible compacité à l'arrière et sous le mur de soutènement. Des matériaux sablonneux bruns hétérogènes ont été rencontrés depuis le sommet de la plate-forme de la rampe jusqu'à environ 6,5 à 9 m de profondeur.

Les remblais techniques, confinés entre les murs de la rampe, peuvent se différencier de ceux, plus anciens, vus sous les murs de fondation. Une couche de forme recouvre la partie supérieure des remblais. Des matériaux bitumineux, dont l'épaisseur atteint près de 30 centimètres, sont observés sur le dessus, témoignant des recharges successives probables pour compenser les tassements du remblai qui se sont régulièrement développés depuis la construction. En dessous de 6 m de profondeur et sur une épaisseur de 7/8 m, le sable alluvionnaire peut être dissocié en deux parties :

- une première couche de 4 à 5 m d'épaisseur considérée comme normalement consolidée et constituée de gravier et de sable limoneux gris brun ;
- une couche inférieure d'environ 3 m d'épaisseur, constituée d'un sable coquillier grisâtre, avec une très faible compacité, qui contribue à expliquer les désordres observés sur la structure depuis sa construction.

2.2. Choix de la solution remblai renforcé par géosynthétique

Pour limiter la charge exercée par le mur de soutènement en béton, la solution retenue consistait à reconstruire un remblai renforcé autoporteur sur l'ensemble de la rampe de 100 m de longueur. Un géosynthétique de renforcement est installé à la base de chaque couche de remblai de 50 cm d'épaisseur. Le nombre de nappes sur un profil est fonction de la hauteur, on a donc une disposition en escalier entre le début de la rampe et la jonction avec le pont. Les nappes sont orientées dans la direction perpendiculaire à l'axe de circulation et couvrent toute la largeur du remblai. A chaque extrémité, les géosynthétiques sont rabattus, confinant totalement le matériau de remblai et évitant toute poussée des terres sur la maçonnerie existante. Par conséquent, les murs en béton ne sont plus une structure de soutènement, mais deviennent simplement une composante du parement.

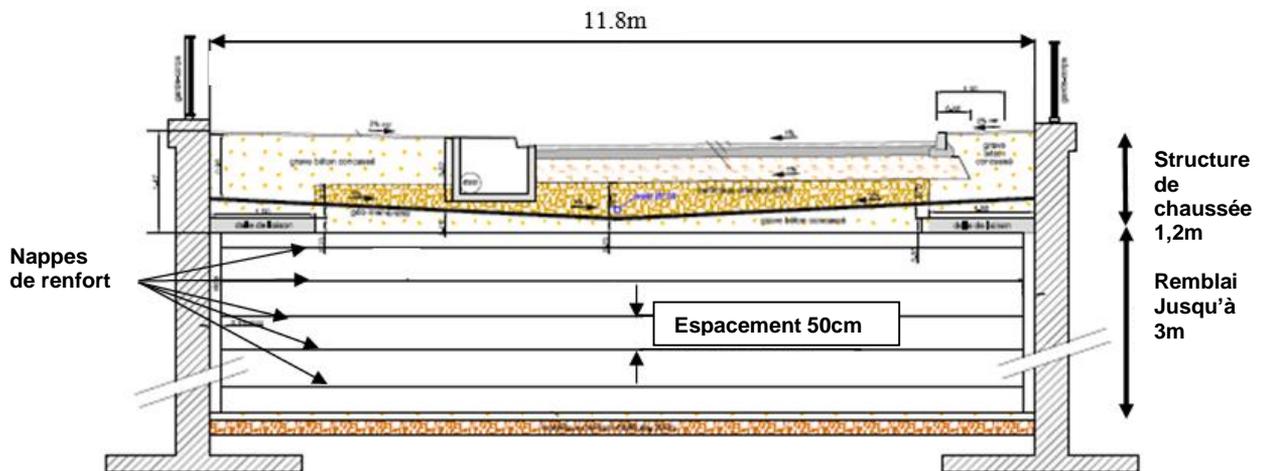


Figure 3. Profil type

2.3. Matériau de remblai

Afin de minimiser les conséquences des travaux de terrassement sur la circulation aux alentours, la plupart des matériaux sur le site ont été réutilisés comme matériaux de remblai. Cela a également réduit fortement le coût et l'impact environnemental par rapport à une solution où le matériau du site doit être retiré et remplacé par un meilleur matériau granulaire provenant d'une carrière. Des échantillons ont été prélevés sur l'ancien remblai et étudiés pour vérifier leurs propriétés mécaniques et hydriques. À la lecture des résultats de l'étude de sol, il apparaît que les matériaux prélevés dans le remblai appartiennent aux classes B3/B4 au sens de la classification GTR. Il s'agit de graves argileuses sensibles à l'eau.

Le tableau 1 montre les caractéristiques hydriques et de frottement du matériau. La différence entre la teneur en eau naturelle et celle à l'optimum Proctor montre que le matériau prélevé est très sec et très sensible à l'eau.

Tableau 1. Caractéristiques du matériau prélevé sur site

		Teneur en eau	Densité à l'optimum Proctor	Teneur en eau à l'optimum Proctor	w_n / w_{opn}	Angle de frottement
	Symbole	w_n	γ_d	w_{opn}		ϕ
	Unité	%	kN/m ³	%	%	°
Graves argileuses	Echantillon P1	4,1	19,2	7,8	50%	25
	Echantillon P2	5,1	19,6	9,5	50%	25

Lors de l'installation, si le matériau est très sec, la teneur en eau doit être ajustée par arrosage. Au contraire, s'il est très humide, il peut être très difficile de le compacter. L'utilisation d'un géotextile composite assurant la fonction de renfort, mais possédant également des propriétés hydrauliques appropriées, permet de réduire la pression interstitielle qui se produit lors du compactage et de faciliter le contrôle de la teneur en eau. La proportion de particules fines et la teneur en eau peuvent avoir un effet important sur la résistance au cisaillement du matériau.

La distribution granulométrique des différents échantillons est reportée sur la figure 4a. Cette figure montre également la limite définissant les matériaux de remblai purement frottant et ceux contenant des particules fines (Lawson, 2005) et traduisant un changement de comportement avec la teneur en eau. La grave argileuse brun clair vu sur la figure 4b et extraite de l'ancien remblai, est exactement dans la zone de chevauchement entre les types de matériaux confirmant que ce matériau pourrait être frottant et sensible à l'eau. Cela signifie qu'il était possible de l'utiliser comme matériau de remblai sur ce site, mais en prenant soin de la teneur en eau lors de l'installation et du compactage du matériau.

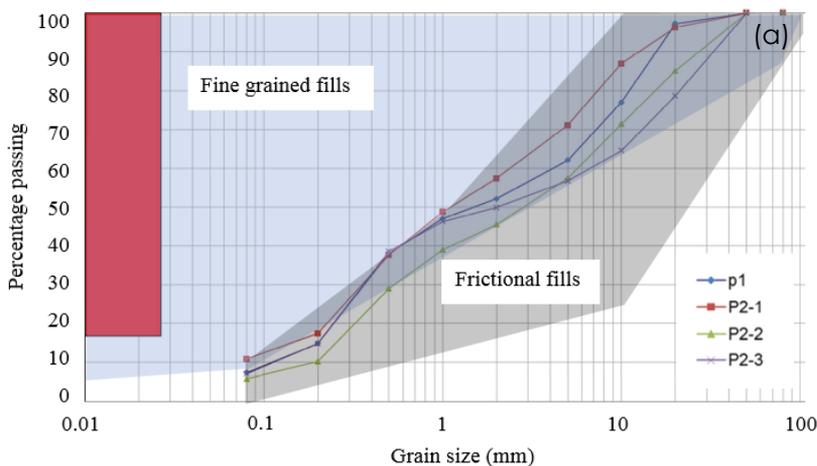


Figure 4. (a) Courbe granulométrique et fuseaux de sols granulaires et sols fins, (b) Matériau de remblai

2.4. Géosynthétiques

Le renforcement d'un mur de soutènement ou d'un talus raidi est généralement réalisé en utilisant un matériau granulaire et des géogrilles en raison d'une interaction normalement plus élevée par rapport aux autres géosynthétiques. L'interaction est régie par deux phénomènes possibles : le frottement direct des particules du sol avec le produit et le blocage qui correspond à l'insertion de graviers dans le maillage de la géogrille. Mais cet emboîtement ne se produit que si la taille du matériau granulaire correspond au maillage de la géogrille. Avec les sols granulaires contenant des fines, l'interaction est principalement donnée par le frottement et d'autres géosynthétiques que les géogrilles peuvent être utilisées tels que des géotextiles tissés ou géocomposites.

Dans le cas de l'utilisation de sols résiduels à forte teneur en eau, un géosynthétique composite combinant renforcement et capacité de drainage lui confère une meilleure interaction avec le matériau. Loke et al. (2002) ont remarqué une réduction de la résistance à l'arrachement de 20% seulement avec le composite non tissé lorsque la réduction de la résistance au cisaillement du sol était supérieure à 70% dans des conditions complètement saturées.

Les mêmes auteurs montrent que la dissipation de la pression interstitielle est plus rapide (Figure 5) pour le géotextile composite comparé à une géogrille ou au sol sans géosynthétique (contrôle), donnant une résistance au cisaillement plus élevée à l'interface composite-sol. La géogrille agit dans des conditions de sol saturé alors que le composite peut être considéré en sol non saturé.

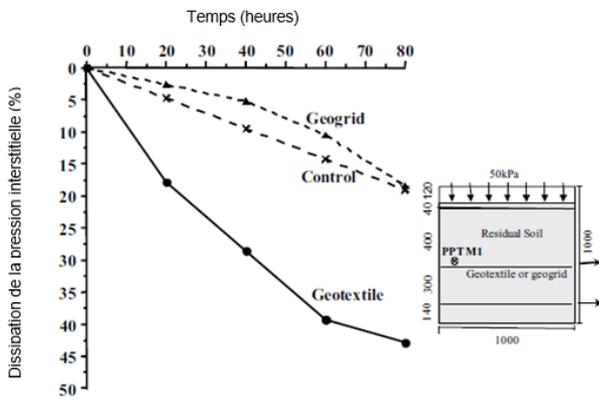


Figure 5. Pression interstitielle à 1 m du parement (Loke et al., 2002)

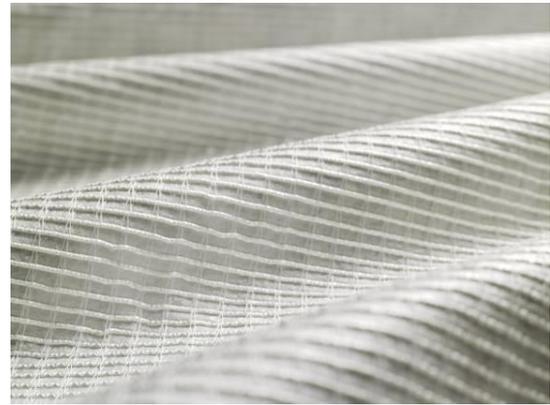


Figure 6. Géosynthétique composite de renforcement

En raison de la sensibilité à l'eau du matériau de remblai prélevé sur le site et décrit ci-dessus, le bureau d'étude a choisi un géocomposite à haute résistance constitué de fils de polyester multi-filaments cousus sur un non-tissé de filaments continus (Figure 6).

Lors du compactage du remblai, le non-tissé permet la réduction de la pression interstitielle et assure une protection des fils à haute résistance assurant la fonction de renfort. En effet, bien que la teneur en eau du matériau fût faible lors du prélèvement, celle-ci aurait pu s'accroître significativement dans le cas d'intempéries lors de la période des travaux.

3. Dimensionnement

La structure vérifiée dans la conception est composée d'un remblai renforcé de 3 m d'épaisseur avec 6 nappes géosynthétiques espacées verticalement de 50 cm dans la section critique. La longueur des nappes prises en compte dans le calcul correspond à la moitié de largeur de la rampe, car les nappes étaient susceptibles d'être posées séparément de chaque côté avec recouvrement au milieu. Mais lors de la construction, ce sont des nappes traversantes de part et d'autre de la rampe qui ont été installées. La solution mise en œuvre est donc conservatrice puisque la continuité du renforcement n'avait pas été prise en compte initialement dans le dimensionnement. Une charge permanente de 30 kPa représentant la structure de chaussée de 1,5 m de haut (Fig.3) et une charge de trafic de 13 kPa ont été considérées. Un angle de frottement interne de 25 degrés a été considéré pour le matériau de remblai. Une base drainante de 20 cm d'épaisseur a été insérée entre le remblai et le sol support, avec une cohésion à 0 kPa et un angle de frottement de 35 degrés. L'étude a été réalisée avec le logiciel ReSSA (3.0) suivant un calcul aux états limites ultimes. La stabilité du remblai renforcé, y compris la rupture profonde, a été vérifiée en utilisant la méthode de Bishop, comme le montre la figure 7.

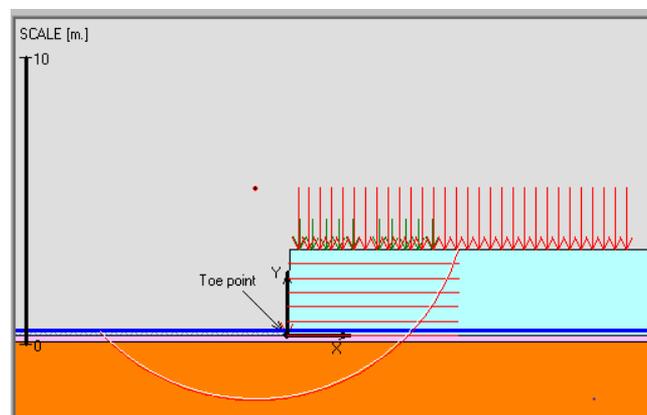


Figure 7. Cercle de rupture le plus critique

Les facteurs partiels du tableau 2 ont été pris en compte pour les actions et les matériaux suivant l'approche 3 de l'Eurocode 7 et son annexe nationale NF EN 1997-1/NA (2005). Un coefficient de sécurité global de $F_s > 1$ a été vérifié pour justifier la stabilité mixte telle que définie dans la norme NF P 94-270 (2009) et pour l'ensemble des surfaces de ruptures étudiées.

Tableau 2. Facteurs partiels

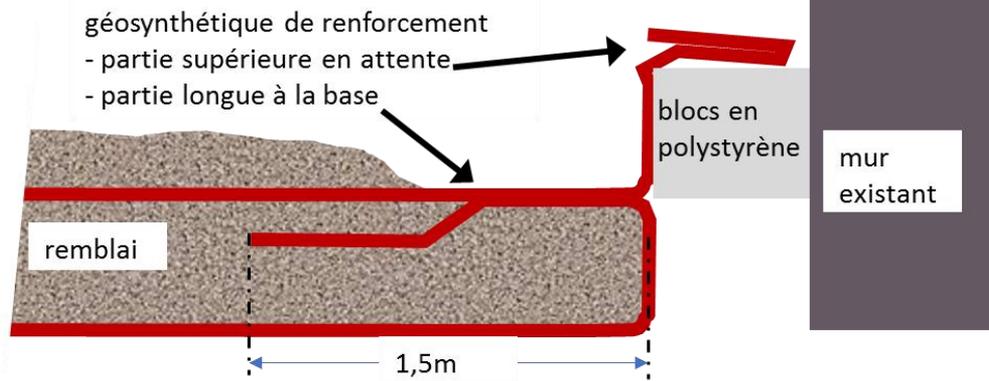
Actions	permanentes	temporaires
	$\gamma_{Gsup} = 1,35$	$\gamma_{Qsup} = 1,5$
Matériaux		
poids volumique	$\gamma_g = 1$	
angle de frottement	$\gamma_{\phi'} = 1,25$	
cohésion effective	$\gamma_c = 1,25$	
frottement/ arrachement	$\gamma_{M;t} = 1,1$	
résistance du géosynthétique	$\gamma_{M;t} = 1,25$	

Avec l'application de tous ces facteurs partiels et des facteurs de réduction sur le renforcement géosynthétique en polyester, une résistance ultime à la traction de 125 kN/m fournit la justification de la stabilité à long terme.

4. Installation

Le renforcement géosynthétique a été installé avec une méthode classique de retournement au parement (Fig. 8) et un espacement vertical de 50 cm. Des blocs de polystyrène (Fig. 9) ont été utilisés comme coffrage entre le remblai renforcé et la structure en béton. Les blocs ont été déplacés vers le haut après l'achèvement de chaque couche compactée pour la mise en œuvre de la couche suivante, créant un espace entre le sol renforcé et l'ancien mur de soutènement. L'ancienne maçonnerie était alors protégée de toute pression horizontale provenant du remblai.

Couche en cours de réalisation



Couche terminée

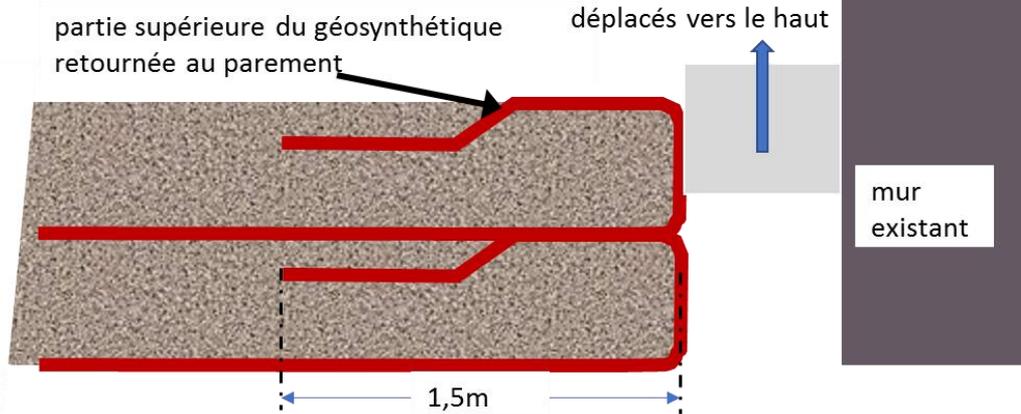


Figure 8. Schéma de réalisation des couches renforcées



Figure 9. Coffrage temporaire en polystyrène

Cette technique de construction permet d'assurer le maintien du sol pendant sa mise en œuvre et donc un bon compactage du remblai (Fig.10) sur toute la surface.



Figure 10. Coffrage temporaire en appui sur le mur existant, couche terminée

5. Conclusion

Dès l'achèvement des travaux de réhabilitation, la rampe a été réouverte à la circulation à la fin de l'année 2016, soit près de deux ans après l'apparition des désordres. Il faut noter cependant que les travaux de réparation ont été plutôt rapides puisqu'il a fallu moins d'un mois pour mettre en œuvre la solution de renforcement par géosynthétiques. L'utilisation d'un géocomposite combinant le renforcement et l'absorption de la pression de l'eau a facilité l'utilisation du matériau à grain fin prélevé sur le site. Le remblai renforcé a été construit pour éviter toute pression horizontale sur la maçonnerie de béton existante qui avait été partiellement endommagée par l'affaissement. Enfin, cette solution évite des solutions onéreuses comme l'amélioration du sol par inclusions étudiée initialement.

6. Références bibliographiques

- Lawson C. (2005). Geosynthetic Reinforced MSE Walls and Slopes with Fine Grained Fills: International Perspectives. *NAGS 2005/GRI-19 Conference, Las Vegas, Nevada, USA*.
- Loke K.H., Lim C.S, Chew S.H., Loh S.L., Karunaratne G.P., Tan S.A., Loh S.L. (2002). Large-scale studies on contribution of high strength composite geotextile reinforcing poor draining backfill. *Proc. 7th Intl. Geosynthetic Conference, Nice, France, pp. 1047-1050*.
- NF EN 1997-1/NA (2005) Eurocode 7 — Calcul géotechnique — Partie 1 : Règles générales - Annexe Nationale à la NF EN 1997-1:2005, Association Française de Normalisation, La Plaine Saint-Denis, France.
- NF P 94-270 (2009) Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Remblais renforcés et massifs en sol cloué, Association Française de Normalisation, La Plaine Saint-Denis, France.
- ReSSA 3.0, 2012. Reinforced Slope Stability Analysis. ADAMA Engineering. Inc USA