

ETUDE EXPERIMENTALE DU RENFORCEMENT GEOSYNTHETIQUE DES PLATEFORMES GRANULAIRES SUR SOL DE FAIBLE PORTANCE

Experimental study of the geosynthetic reinforcement of granular platforms overcoming soft soil

Nicole KHOUIERY¹, Laurent BRIANÇON², Ali DAOUADJI³ et Mathilde RIOT⁴

¹ AFITEXINOV, La Tour du Pin, France

² Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France

³ Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France

⁴ AFITEXINOV, La Tour du Pin, France

RÉSUMÉ – Un appareil expérimental permettant des essais à l'échelle 1 a été conçu et développé pour étudier le comportement des plateformes granulaires renforcées ou non par géosynthétiques construites sur des sols de faible portance. Des sollicitations cycliques ponctuelles et de circulation ont été appliquées sur ces plateformes. Les résultats de ces essais ont permis d'estimer l'efficacité des géosynthétiques testés.

ABSTRACT – An experimental apparatus allowing large-scale tests was designed and developed. These experimental tests aimed to study the behavior of reinforced and unreinforced unpaved roads overcoming soft subgrade. The prepared platform was subjected to traffic circulation and plate load tests. The results of these tests allowed the estimation of the reinforcement efficiency.

1. Introduction

Depuis cinquante ans, les géosynthétiques (GSYs) ont été de plus en plus utilisés en génie civil et plus spécialement en géotechnique. Les géosynthétiques (GSYs) peuvent assurer différentes fonctions selon les applications : la séparation, la filtration, le drainage, le renforcement, la protection, l'anti-érosion et l'étanchéité. Les GSYs ont été utilisés dans le renforcement des plateformes granulaires routières non revêtues sur des sols de faible portance depuis 1970. Le renforcement est généralement placé à l'interface entre le sol de faible portance et la plateforme granulaire. Dans ces applications, les GSYs peuvent assurer la fonction de renforcement, de séparation, de filtration et de drainage. Avec les années, l'expérience a prouvé l'efficacité du renforcement par GSYs dans ce domaine. L'hétérogénéité de la structure et surtout la présence du renforcement a complexifié les mécanismes développés dans ces plateformes. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont essayé de comprendre et d'expliquer le fonctionnement de ces plateformes granulaires renforcées. Cependant, les nombreux mécanismes mis en jeu, la variété des GSY employés n'ont pas permis à ce jour de disposer d'une méthode de dimensionnement faisant l'unanimité. Dans le cadre du travail de recherche exposé dans cet article, des essais expérimentaux à grande échelle ont été effectués pour apporter des connaissances sur le comportement du renforcement et sa dépendance de plusieurs variables.

2. Synthèse bibliographique

Plusieurs auteurs dans la littérature ont étudié le renforcement des plateformes granulaires sur des sols de faible portance. Palmeira & Antunes (2010) ont proposé des

essais sous sollicitations ponctuelles cycliques sur plaque. Les résultats de ces essais ont permis de comparer l'effet de plusieurs types de géosynthétiques sur l'amélioration du comportement de la plateforme. Les résultats de cette étude ont montré que l'efficacité des géogrilles est plus importante que celle des géotextiles. D'autre part, la comparaison entre le chargement cyclique et monotone a montré que le chargement monotone sous-estime l'effet du renforcement. Qian et al. (2011 & 2013) proposent aussi un banc d'essai avec un chargement cyclique sur plaque dans lequel ils testent des géogrilles extrudées et montrent l'efficacité de ces produits. Christopher & Perkins (2008) présentent les résultats d'un essai à échelle réelle suivant la procédure de l'AASHTO 4E-SR. Dans ces essais le sol de faible portance est un sol saturé, et les produits testés sont des géogrilles et des géocomposites. Les auteurs ont étudié l'effet de la pression interstitielle sur le comportement de la plateforme et ont conclu que la présence d'un géosynthétique non tissé diminue la pression interstitielle dans le sol de faible portance.

D'autre part, pour s'approcher plus des conditions du site, des auteurs ont proposés des essais in-situ. Par exemple, Hufenus et al. (2006) ont testé une plateforme composée d'un sol de faible portance de silt argileux existant sur site, surmonté par une couche granulaire renforcée ou pas. 12 sections avec 8 m de long chacune ont été testées. Sept différents types de géosynthétiques ont été utilisés pour renforcer les 12 différentes sections. Un camion surchargé a été utilisé pour appliquer une circulation de charges lourdes sur les plateformes. Les résultats ont permis de comparer les différents types de renforcements. En se basant sur les résultats les auteurs ont noté l'efficacité du renforcement, même pour une plateforme granulaire épaisse avec $h > 0,5$ m. Cuelho & Perkins (2009 & 2017) and Cuelho et al. (2014) ont aussi présenté des essais sur site avec plusieurs configurations. Ils ont testé l'effet de l'épaisseur de la plateforme granulaire, l'effet de la portance du sol de faible portance et l'effet du type de renforcement. En se basant sur les résultats, les auteurs ont conclu que l'efficacité du produit dépend de la rigidité de ces nœuds, de la rigidité du produit, de sa résistance maximale en traction et de sa rigidité résiduelle sous chargement cyclique.

Les essais in-situ sont des essais qui se rapprochent le plus de l'ouvrage réel et de sa sollicitation, ils présentent cependant quelques limitations. En effet, ces essais ont été réalisés à l'extérieur, les paramètres et les propriétés des couches de sol sont difficilement contrôlables en fonction des conditions climatiques. De plus, l'application de la charge n'est pas automatisée, un nombre limité de circulations a été appliqué dans ces essais.

Dans les essais de plateforme routière, pour éviter les limites des essais in-situ, des essais ont été développés en utilisant des machines qui ont fait une révolution dans ce domaine, les f-sAPT (full-scale Accelerated Pavement Facility). En effet, ces machines ont permis l'automatisation des charges de circulation, et l'exécution des essais dans des grands hangars sans dépendance des conditions climatiques.

Ces machines ont été développées pour tester essentiellement les routes revêtues, mais ils ont été aussi utilisés pour tester l'efficacité des géosynthétiques dans les routes non revêtues sur des sols de faible portance.

Watts et al. (2004) et Cook et al. (2016) ont utilisé la machine TRL (Transport Research Laboratory) présente à Crowthorne au Royaume Uni pour caractériser l'effet du renforcement dans les plateformes non revêtues. Cook et al. (2016) ont présenté les résultats de 8 essais effectués depuis l'année 2000. La plateforme testée à chaque essai a été divisée en plusieurs sections et chaque section a été renforcée par un type de géosynthétique. Il est important de souligner l'importance du protocole de mise en place du sol à grande échelle. La machine TRL applique une charge par un demi-axe de 40 kN avec une pression au contact de 700 kPa, bidirectionnelle avec une vitesse de 15 km/h. En se basant sur les résultats les auteurs ont souligné la contribution importante du

mécanisme de confinement de la plateforme granulaire apporté par le renforcement dans l'amélioration de la plateforme renforcée.

Watts et al. (2004) présentent des essais en se basant sur le même protocole mais avec différents types de géosynthétiques. Les auteurs ont comparé les résultats expérimentaux à la méthode de dimensionnement analytique de Giroud and Noiray (1981) et ont conclu que l'épaisseur de la plateforme granulaire proposée par cette méthode est surdimensionnée dans les conditions de ces essais.

D'autre part, aux Etats-Unis la machine développée au sein de U.S. Army Corps of Engineers a été utilisée par Jersey et al. (2012), Norwood & Tingle (2014) et Robinson et al. (2017), pour tester l'effet du renforcement de la plateforme granulaire sur des sols de faible portance, mais dans le cas de routes revêtues. La charge de circulation a été appliquée par un demi-axe avec un double essieu, avec une charge de 40 kN. Les auteurs dans ces programmes de recherche ont testé l'efficacité d'une géogrille spécifique extrudée. La présence de la couche d'asphalte dans les routes revêtues réduit significativement les déformations, et change le comportement du renforcement. En effet, il faut bien distinguer entre l'applications des géosynthétiques dans des routes revêtues et non revêtues. Yang et al. (2012) ont utilisé la machine APT (Accelerated Pavement Testing) de l'Université du Kansas aux Etats-Unis pour tester l'efficacité des géocellules dans le renforcement de ce type d'ouvrage. Cette machine applique une charge de 80 kN en utilisant un axe complet, apportant une contrainte au contact de 552 kPa. Les résultats de ces travaux ont permis de voir l'efficacité de la géocellule récemment introduite dans ce domaine d'application. Ces dispositifs d'application de circulation ont permis une importante avancée dans ce domaine. Cependant ces dispositifs ont été conçus essentiellement pour tester les couches superficielles des routes revêtues. La complexité des mécanismes développés dans les plateformes granulaires non revêtues sur sol peu porteur et la diversité des produits de renforcement n'ont pas permis à ce jour de disposer de recommandations ou de norme de dimensionnement dans ce domaine.

Dans le cadre du LabCom PITAGOR, une nouvelle étude a été engagée pour identifier les mécanismes mis en jeu et proposer des règles de dimensionnement. Au laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon, un nouveau dispositif expérimental a été développé pour tester les plateformes routières non revêtues renforcées à échelle réelle au laboratoire. Un soin particulier a été apporté pour définir un protocole expérimental permettant de disposer d'un même état initial du sol à chaque essai. La plateforme à tester est sollicitée par un chargement ponctuel cyclique et par un chargement de circulation pour tester l'effet du type de sollicitation sur le comportement de la plateforme. La sollicitation sous chargement de circulation est faite en utilisant la machine SAT (Simulateur Accélérateur de Traffic) développée spécialement dans le cadre de ce projet. En effet la machine SAT a été conçue de façon à appliquer une charge de circulation lourde sur une longueur effective de 2 m, et de garder la même intensité de charge même après une déformation excessive, grâce à son mécanisme d'application de charge particulier.

3. Principe de l'essai et moyens expérimentaux

L'essai consiste à appliquer deux types de chargement cycliques à une plateforme granulaire renforcée ou non par géosynthétique disposée sur un sol de faible portance.

Le banc d'essai de 5 m de long, 1,8 m de large et 1,1 m de haut permet d'installer 60 cm de sol de faible portance et la couche granulaire de 22 cm d'épaisseur.

Le premier type de chargement cyclique est appliqué à l'aide d'un vérin hydraulique sur une plaque d'appui (Figure 1). Une charge maximale de 28 kN est appliquée sur une plaque métallique rigide d'une forme semblable à la forme d'empreinte de la roue de circulation. La contrainte verticale appliquée à la surface est de 650 kPa. Le chargement cyclique est appliqué sous une fréquence de 0,77 Hz. Le chargement cyclique roulant est appliqué sur la surface de la plateforme par l'intermédiaire d'un appareil développé dans

le cadre de ce projet (Figure 2). Cet appareil est un Simulateur-Accélérateur de Traffic (SAT), il simule un trafic uni ou bidirectionnel, sous chargement normal de 28 kN, avec une contrainte au contact roue-surface de 650 kPa. Le SAT applique cette charge sur 2 m de long en dehors des zones tampons. La vitesse de circulation de la roue est fixée à 4 km/h. Sous le chargement cyclique ponctuelle 10 000 cycles ont été appliqués sur la plateforme, mais sous le chargement circulaire un tassement important a été plus rapidement atteint et un maximum de 1 200 cycles a été appliqué.

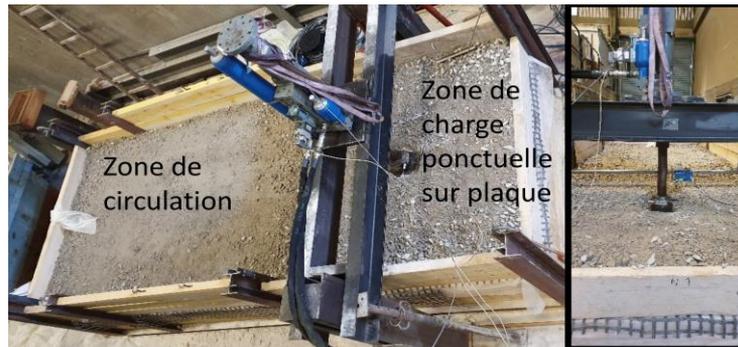


Figure 1. Application de la charge cyclique par vérin



Figure 2. Simulateur-Accélérateur de Traffic

4. Matériaux

Un sol artificiel de faible portance a été spécialement développé pour correspondre aux critères de la norme (FHWA, 2008) qui définit une portance avec un indice CBR inférieur à 3 %. Après de nombreux d'essais réalisés sur plusieurs mélanges de sable et d'argile, le mélange constitué de 80 % de sable d'Hostun et 20 % de kaolinite à une densité sèche de 19,3 kN/m³ et une teneur en eau de 11 % a donné un indice CBR de 2 % et a été retenu pour tous les essais. Une grave non traitée 0/31,5 a été utilisée pour constituer la plateforme granulaire. Ce sol est une grave mal graduée ($C_u = 20$, $C_c = 5$), avec un angle de frottement de 37° et une cohésion nulle. Le sol a été mis en place à une teneur en eau de 4 % pour obtenir une plateforme avec un indice CBR de 20 % (FHWA, 2008). Différentes géogrilles ont été testées dans le but de comparer leur efficacité par rapport à l'essai de référence non renforcé :

- GSY 1: Géogrille extrudée, avec des ouvertures triangulaires de 40 mm le côté, une rigidité radiale de 360 kN/m à 2 % de déformation, et une stabilité des nœuds de 6.1 kg-cm/°.
- GSY 2: Géogrille tricotée, avec des ouvertures carrées de 40 mm, et une rigidité de 2500 kN/m à 2 % de déformation.

5. Instrumentation

Une instrumentation a été installée dans le sol de faible portance pour suivre son tassement par des capteurs de pression connectés en série à un réservoir d'eau de

niveau de référence, et pour estimer la répartition des contraintes à l'aide de capteurs de pression totale. Des inclinomètres ont été installés sur les capteurs de pression totale pour vérifier leur horizontalité tout au long de l'essai. Le tassement en surface de la plateforme granulaire a été mesuré à l'aide d'un capteur de déplacement à visée laser. Enfin, la déformation de la nappe géosynthétique a été mesurée par une fibre optique par réflectométrie Rayleigh OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) permettant une résolution spatiale millimétrique.

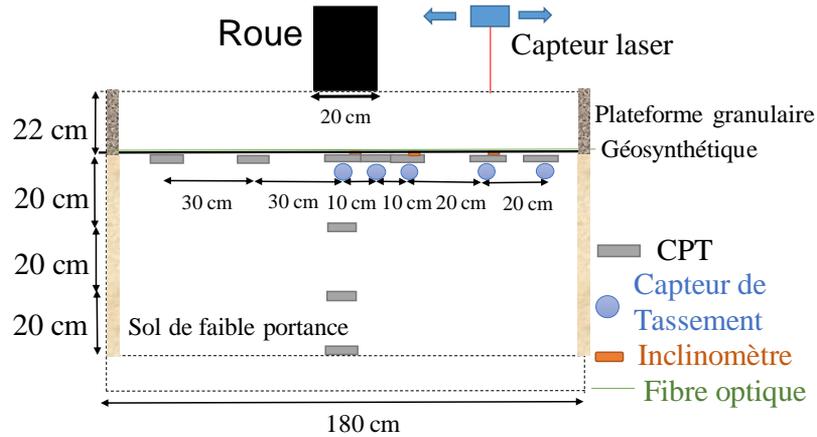


Figure 3. Instrumentation

6. Protocole expérimental

Le sol de faible portance a été préparé à l'aide d'un malaxeur spécifique pour obtenir un sol homogène à la bonne teneur en eau. De nombreux protocoles de compactage de ce sol dans le banc expérimental ont été nécessaires pour définir la bonne méthode d'installation afin d'obtenir un indice CBR de 2 % sur toute la hauteur du sol. Le sol de faible portance et le matériau granulaire ont été mis en place par couches et compactés à l'aide d'une plaque vibrante.

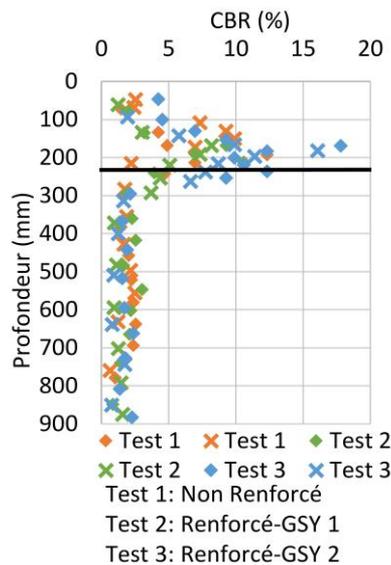


Figure 4. Résultats du pénétromètre dynamique après corrélation avec le l'indice CBR

Après la mise en place et à la fin des essais de chargement des essais de contrôle ont été menés :

- La teneur en eau des deux sols mis en place a été contrôlée,
- Des essais pénétrométriques statiques et dynamiques ont été effectués pour déterminer la portance des deux couches de sol. Les résultats de ces essais ont été corrélés au CBR (Figure 4),

- Un essai scissométrique a été utilisé pour vérifier l'homogénéité du sol, Ces essais de contrôle nous ont permis de conclure que le protocole de mise en place permettait d'obtenir deux couches de sol homogènes avec les bonnes caractéristiques de portance et reproductible à chaque nouvel essai. De plus la répétabilité de ce protocole a été validée en réalisant plusieurs fois le même type d'essai dans un banc d'essai plus petit et pour un chargement cyclique sur plaque.

7. Résultats et analyse

Les résultats ont permis la comparaison entre les deux types de géosynthétique et les deux sollicitations. La sollicitation de circulation appliquée par la machine SAT (Figure 5b) apporte plus d'endommagement pour la plateforme testée que la sollicitation cyclique sur plaque (Figure 5a).

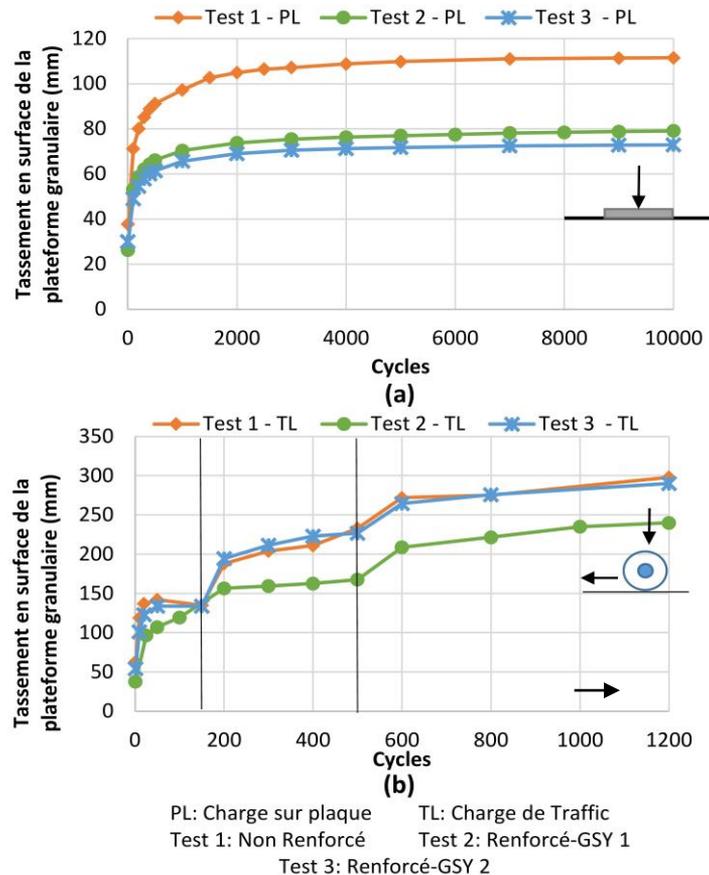


Figure 5. Evolution du tassement en surface de la plateforme granulaire, (a) sous chargement cyclique sur plaque, (b) sous le chargement de circulation.

En effet, le tassement en surface sous la circulation atteint plus que 100 mm dès les premiers cycles alors que ce critère de tassement n'est jamais atteint pour les plateformes renforcées soumises à un chargement cyclique à la plaque. Après 150 cycles, la limite de tassement de la machine SAT est atteinte car la roue ne peut plus s'enfoncer dans le sol. Pour pouvoir continuer l'essai, l'orniérage a été remblayé et les cycles repris jusqu'à atteindre 500 cycles, puis il a été à nouveau remblayé pour atteindre 1 200 cycles. La figure 5a montre le tassement sous la plaque des trois essais, on observe que les deux types de renforcements (GSY 1 et GSY 2) apportent la même réduction de tassement. En effet, la plateforme non renforcée présente un tassement maximal après 10 000 cycles de 111 mm, tandis qu'avec le renforcement ce tassement est réduit de 30 % et 35 % avec respectivement le GSY 1 et GSY 2. La figure 5b montre un tassement de plus que 100 mm après seulement 10 cycles, pour les trois plateformes, ce qui confirme que la sollicitation sous chargement cyclique roulant apporte plus

d'endommagement que la plaque. Ce tassement continu à augmenter même après le remblayage de la zone d'orniérage pour atteindre plus que 250 mm après 1 200 cycles. Pour ces essais l'évolution de l'orniérage en surface de la plateforme granulaire ne peut pas être utilisée pour comparer l'efficacité du renforcement. Pour voir l'effet du renforcement plus précisément, l'évolution du tassement sous l'axe central du chargement à la surface du sol de faible portance, qui est donné par les capteurs de tassement, est présentée dans la Figure 6.

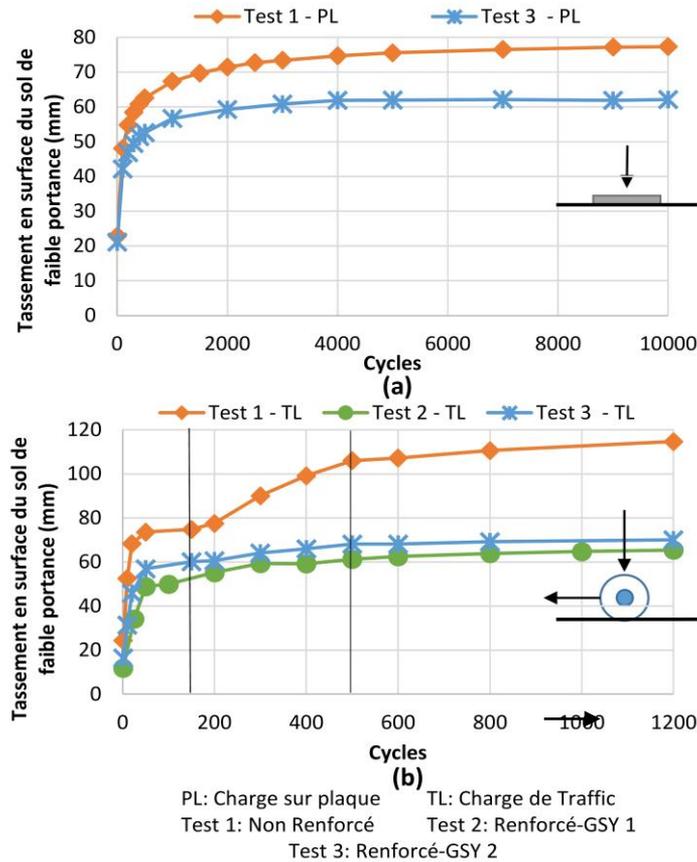


Figure 6. Evolution du tassement en surface du sol de faible portance, (a) sous chargement cyclique sur plaque, (b) sous le chargement de circulation.

La figure 6a présente l'évolution du tassement sous l'axe de chargement à la surface du sol de faible portance pour l'essai non renforcé et l'essai renforcé par GSY 2. Pour des problèmes techniques, les résultats de l'essai renforcé par GSY 1 manquent. Nous observons que la géogrille GSY 2 réduit significativement le tassement du sol de faible portance. D'autre part, la figure 6b montre que les géogrilles GSY 1 et GSY 2 apportent la même réduction de tassement sur le sol de faible portance sous le chargement de circulation. Enfin, la figure 6 montre que le chargement de circulation apporte aussi plus d'endommagement que le chargement sur plaque, pour le tassement du sol de faible portance.

8. Conclusion

Un nouveau protocole expérimental a été développé et validé pour tester les routes non revêtues reposant sur des sols de faible portance, et pour comparer l'effet de plusieurs types ou configurations de renforcement. Un simulateur de circulation a été développé pour tester ce type d'ouvrage et optimiser les travaux liés à l'installation. Ces essais ont permis de mieux comprendre les mécanismes de transfert de charge dans ces plateformes renforcées. Les résultats ont notamment montré l'efficacité du renforcement

sous les deux types de sollicitations. La géogrid extrudée (GSY 1) et la géogrid tricotée (GSY 2) ont présenté à peu près le même taux d'amélioration de la plateforme sous les conditions de cet essai. Pour toutes les configurations, le chargement de circulation apporte toujours plus d'endommagement pour la déformation de la plateforme granulaire et pour le tassement du sol de faible portance que le chargement sur plaque. Beaucoup d'autres résultats ont été apportés par cette étude et sont présentés en détail dans la thèse de Khoueiry (2020).

9. Remerciements

Ce travail de recherche s'est fait dans le cadre du LabCom PITAGOR associant le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon et la société AFITEXINOV. Ce LabCom a été soutenu financièrement par l'ANR de 2015 à 2018.

10. Références bibliographiques

- AASHTO Committee 4E, Geosynthetic reinforcement of the aggregate base/subbase courses of pavement structures: Report prepared by AASHTO Committee 4E
- Christopher B. R., Cuelho E. V., & Perknis S. W. (2008). Development of geogrid junction strength requirements for reinforced roadway base design. Proceedings, GeoAmericas 2008 Conference, Cancun, Mexico, pp. 1003-1012.
- Cook J., Dobie M., & Blackman D. (2016). The development of APT methodology in the application and derivation of geosynthetic benefits in roadway design. The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability, Springer, Cham, pp. 257-275.
- Cuelho E, Eli V., & Perkins S. (2017). Geosynthetic subgrade stabilization—Field testing and design method calibration. Transportation Geotechnics, pp. 22-34.
- Cuelho E., Perkins S., & Morris Z. (2014). Relative operational performance of geosynthetics used as subgrade stabilization, No. 7712-251/TPF-5 (251). Montana. Dept. of Transportation. Research Programs.
- Cuelho, E., & Perkins, S. (2009). Field investigation of geosynthetics used for subgrade stabilization (no. FHWA/mt-09-003/8193). Montana department of transportation.
- FHWA, Federal Highway Administration. (2008). "Geosynthetic design and construction guidelines reference manual." FHWA NHI-07-092, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Giroud J. P., & Noiray L. (1981). Geotextile-reinforced unpaved road design. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, vol. 107, n° 9, pp 1233-1254 .
- Hufenus R., Rueegger R., Banjac R., Mayor P., Springman S., & Brönnimann R. (2006). Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. Geot & Geom, vol. 24, n°1, pp. 21-37.
- Jersey S.R., Tingle J.S., Norwood G.J., Kwon J., Wayne M. (2012). Full-scale evaluation of geogrid-reinforced thin flexible pavements. Transportation Research Record, vol. 2310? n° 1, pp. 61-71.
- Khoueiry N., (2020). Study of granular platforms behaviour over soft subgrade reinforced by geosynthetics: experimental and numerical approaches. Thèse de l'Université de Lyon 1.
- Norwood G.J., Tingle J.S. (2014). Performance of Geogrid-Stabilized Flexible Pavements. US Army Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory. Vicksburg, Mississippi.
- Palmeira E. M., & Antunes I. G. (2010). Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. Geot & Geom, vol. 28, n°6, pp. 547-558.
- Qian Y., Han J., Pokharel S., & Parsons R. (2011). Stress analysis on triangular-aperture geogrid-reinforced bases over weak subgrade under cyclic loading: an experimental study. Transportation research record: journal of the transportation research board, vol. 2204, pp. 83-91.
- Qian Y., Han J., Pokharel S. K., & Parsons R. L. (2013). Performance of triangular aperture geogrid-reinforced base courses over weak subgrade under cyclic loading. Journal of materials in civil engineering, vol. 25, n° 8, pp.1013-1021.
- Robinson W. J., Tingle J. S., & Norwood G. J. (2017). *Full-Scale Accelerated Testing of Multi-axial Geogrid Stabilized Flexible Pavements* (No. ERDC/GSL TR-17-9). ERDC-GSL vicksburg United States.
- Watts G.R.A., Blackman D.I. and Jenner C.G. (2004). The Performance of Reinforced Unpaved Sub-bases subjected to Trafficking. Proceedings, EuroGeo 3, the Third European Geosynthetics Conference, Munich, Germany
- Yang X., Han J., Pokharel S. K., Manandhar C., Parsons R. L., Leshchinsky D., & Halahmi I. (2012). Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases. Geot & Geom, vol. 32, pp. 95-103.