

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

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 prouvée 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.

2. Synthèse bibliographique

Plusieurs auteurs dans la littérature ont étudié ces ouvrages. Palmeira & Antunes (2010) ont proposés des essais sous sollicitation ponctuelle cyclique 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. Des géogrilles extrudées ont été testés dans ces travaux. En se basant sur les résultats, les auteurs ont souligné 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, comme les essais proposés par Hufenus et al. (2006). La plateforme testée a été composée d'un sol de faible portance de silt argileux existant sur site, surmonté par une plateforme renforcée ou pas. 12 sections avec 8 m de long chacune ont été testés. Sept différents types de géosynthétiques ont été utilisés pour renforcer les 12 différentes sections. Un camion surchargé a été utilisé pour appliquer le chargement de Traffic lourde sur les plateformes. Les résultats ont permis de comparer les différents types de renforcements. Cuelho & Perkins (2009 & 2017) and Cuelho et al. (2014) ont aussi présentés 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 réelle et de sa sollicitation, mais cependant ils présentent des limitations. En effet, ces essais ont été réalisés à l'extérieur, les paramètres et les propriétés des couches de sol ne sont pas contrôlables vue les 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 Platform routières 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 à l'abris des conditions climatiques.

Ces machines ont été développés pour tester essentiellement les routes revêtues, mais ils ont été utilisés dans la littératures 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. Vue les dimensions de la plateforme testée, les travaux de mise en place sont important. 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) and 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 Traffic 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 geogridde spécifique extrudée. La présence de la couche d'asphalte dans les routes revêtues réduit les déformations, et change le comportement du renforcement. En effet, il faut bien distinguer entre l'application des géosynthétiques dans des routes revêtues et non revêtues. Yang et al. (2012) ont utilisé la machine APT (Accelerated Pavement Testing) de Kansas université aux Etats-Unis pour tester l'efficacité des géocellules dans le renforcement de ce type d'ouvrage. Cette machine applique la charge en utilisant un axe complet, avec une charge de 80 kN donnant 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 Traffic ont permis un important avancement de la recherche dans ce domaine. Mais comme ces dispositifs ont été conçus essentiellement pour tester les couches superficielles des routes revêtues, les dimensions des plateformes préparées sont importantes et ceci nécessite un travail important de mise en place si on s'intéresse au comportement de couche profonde. D'où l'idée de développer un dispositif d'application de charge de Traffic avec des dimensions optimisées et adaptées à ce type d'application.

Une nouvelle étude a été engagée dans le cadre du LabCom PITAGOR pour identifier les mécanismes mis en jeu et proposer des règles de dimensionnement. 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 le tassement a été plus rapide et un maximum de 1,200 cycles ont été appliqués.

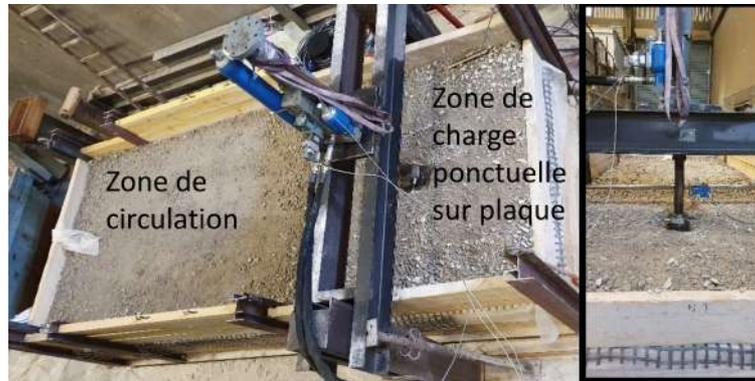


Figure 1. Application de la charge cyclique par vérin



Figure 2. Simulateur-Accélérateur de Traffic

4. Matériaux

Un sol de faible portance artificiel a été spécialement développé pour correspondre aux critères de la norme (FHWA, 2008) qui définit une portance avec un 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 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 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 récipient de référence et 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.

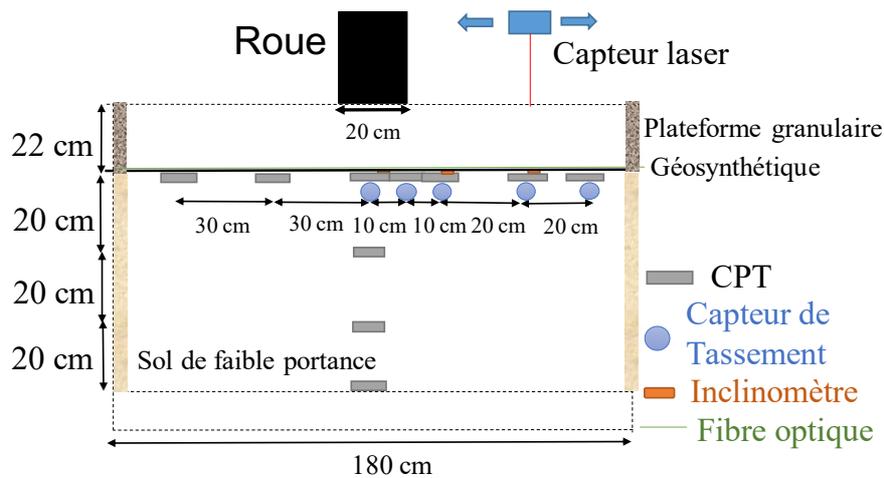


Figure 3. Instrumentation

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 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. Après leur mise en place et à la fin des essais de chargement des essais de contrôle ont été menés (Figure 4) :

- La teneur en eau des deux sols mis en place a été contrôlée pour vérifier son homogénéité et sa non évolution avec le temps,
- 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) et les corrélations utilisés pour les deux appareils donnent des résultats satisfaisants,
- Un essai scissométrique a été utilisé pour vérifier l'homogénéité du sol de faible portance sur son épaisseur.

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 testée avec des essais de répétabilité effectués ultérieurement dans un box plus petit et sous un chargement cyclique sur plaque.

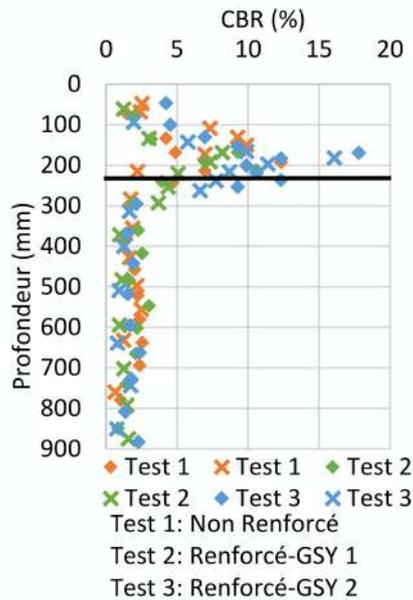


Figure 4. Résultats du pénétromètre dynamique après corrélation avec le CBR %

7. Résultats et analyse

Les résultats ont permis la comparaison entre les deux types de géosynthétique et entre les résultats des deux sollicitations. La sollicitation par charge de Traffic en utilisant la machine SAT, est une sollicitation apporte plus d'endommagement pour la plateforme testée que la sollicitation sur plaque ponctuelle. En effet, comme le montre la Figure 5 le tassement en surface sous le Traffic atteint plus que 100 mm dès les premiers 10 cycles.

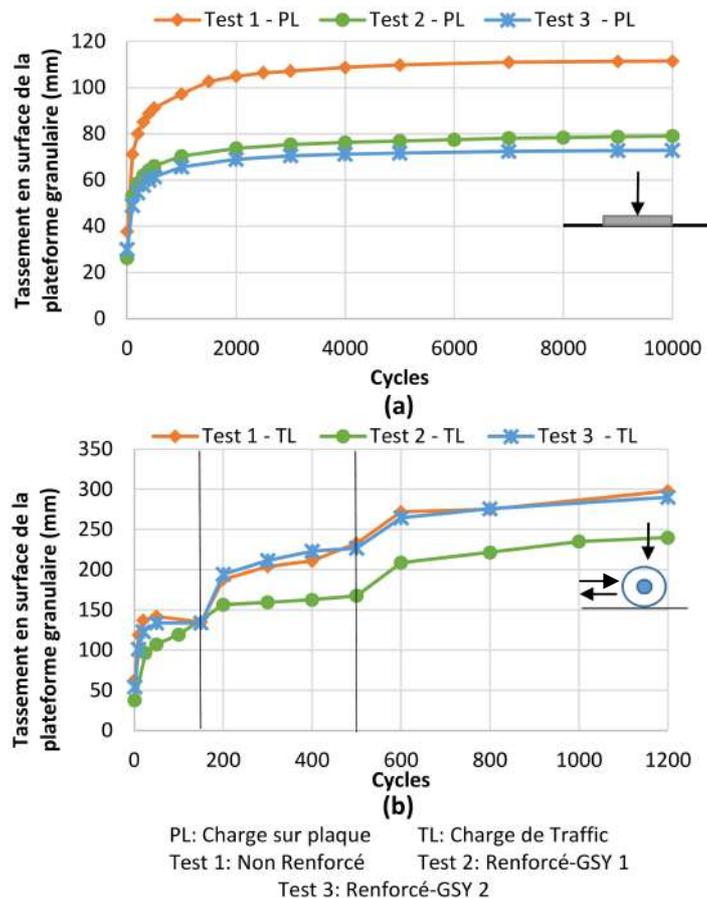


Figure 5. Evolution du tassement en surface de la plateforme granulaire, (a) sous chargement cyclique sur plaque, (b) sous le chargement de Traffic.

Après 150 cycles et 500 cycles la limite de tassement de la machine SAT est atteinte en terme de tassement. Pour pouvoir continuer l'essai, l'orniérage a été remblayé et les cycles repris jusqu'à atteindre 1,200 cycles. Figure 5 (a) montre le tassement sous la plaque des trois essais, et ce graph montre que les deux types de renforcements apportent le même taux de 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. Figure 5 (b) 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 utiliser pour comparer entre la plateforme renforcée et la plateforme non renforcée. Pour voir l'effet du renforcement plus précisément, l'évolution de tassement au centre du sol de faible portance donné par les capteurs de tassement est présentée dans la Figure 6.

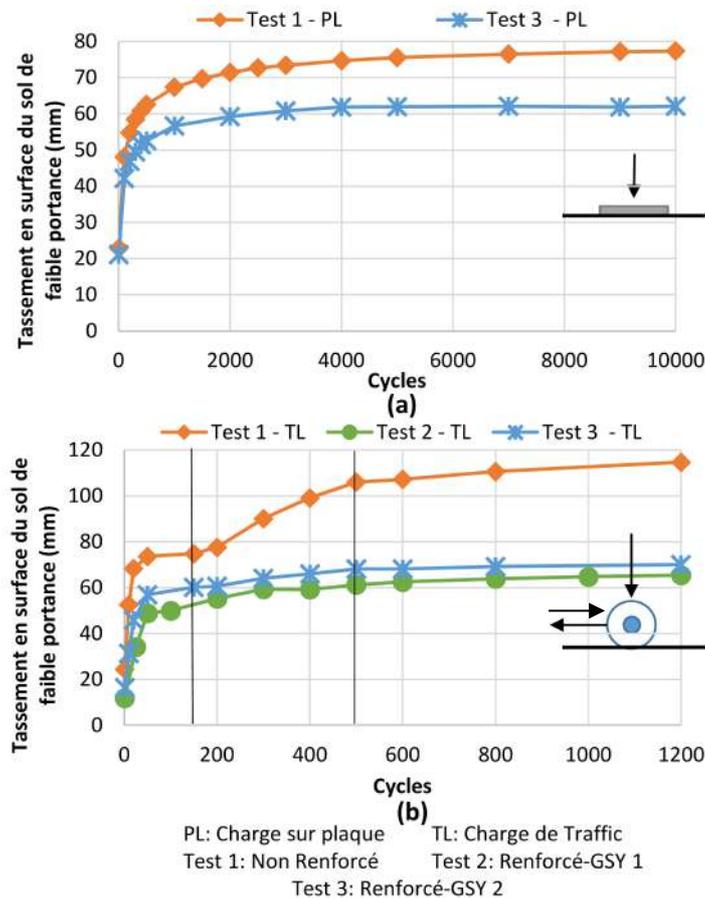


Figure 6. Evolution du tassement en surface du sol de faible portance, (a) sous chargement cyclique sur plaque, (b) sous le chargement de Traffic.

Figure 6 (a) présente l'évolution de tassement au centre du sol de faible portance pour l'essai de référence et l'essai renforcé par GSY 2. Pour des problèmes techniques les résultats de l'essai renforcé par GSY 1 manquent. Mais les résultats montrent que la géogrille GSY 2 réduit significativement le tassement du sol de faible portance. D'autre part, Figure 6 (b) montre que les géogrilles GSY 1 et GSY 2 présente le même taux de réduction de tassement sur le sol de faible portance sous le chargement de Traffic. De plus, Figure 6 montre que le chargement de Traffic apporte plus d'endommagement non

seulement pour le tassement en surface mais pour le tassement du sol de faible portance aussi.

8. Conclusion

Dans ce projet, 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. De plus l'appareil SAT qui a été développée pour tester ce type d'ouvrage et optimiser les travaux reliés à l'installation.

Les résultats ont montré l'efficacité du renforcement sous les deux sollicitations. La géogridde extrudée (GSY 1) et la géogridde tricotée (GSY 2) ont présenté à peu près le même taux d'amélioration de la plateforme sous les conditions de cet essai.

D'autre part, les résultats ont montré que le chargement de Trafic apporte plus d'endommagement pour la déformation de la plateforme granulaire et pour le tassement du sol de faible portance que le chargement sur plaque.

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

- Christopher, B. R., E. V. Cuelho, and S. W. Perknis. "Development of geogrid junction strength requirements for reinforced roadway base design." Proceedings of GeoAmericas 2008 Conference, Cancun, Mexico. 2008.
- Cook, Jonathan, Michael Dobie, and David Blackman. "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, 2016. 257-275.
- FHWA. (1998). *Geosynthetic Design and Construction Guidelines* (p. 150).
- Giroud, Jean-Pierre, and Laure Noiray. "Geotextile-reinforced unpaved road design." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 107.ASCE 16489 (1981).
- Hufenus, Rudolf, et al. "Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade." *Geotextiles and Geomembranes* 24.1 (2006): 21-37.
- Palmeira, Ennio M., and Luiz GS Antunes. "Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance." *Geotextiles and Geomembranes* 28.6 (2010): 547-558.
- Qian, Yu, et al. "Comparative evaluation of different aperture geogrids for ballast reinforcement through triaxial testing and discrete element modeling." *Proceedings of Geosynthetics*. 2013.
- Qian, Yu, et al. "Stress analysis on triangular-aperture geogrid-reinforced bases over weak subgrade under cyclic loading: An experimental study." *Transportation Research Record* 2204.1 (2011): 83-91.
- Robinson, W. Jeremy, Jeb S. Tingle, and Gregory J. Norwood. *Full-Scale Accelerated Testing of Multi-axial Geogrid Stabilized Flexible Pavements*. No. ERDC/GSL TR-17-9. ERDC-GSL vicksburg United States, 2017.
- Watts, G. R. A., D. I. Blackman, and C. G. Jenner. "The performance of reinforced unpaved sub-bases subjected to trafficking." (2004).
- Yang, Xiaoming, et al. "Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases." *Geotextiles and Geomembranes* 32 (2012): 95-103