

Développement d'un protocole expérimental pour l'évaluation de l'efficacité des géosynthétiques de renforcement de plateformes routières sous chargement cyclique.

Experimental protocol development to evaluate the geosynthetics reinforcement efficacy in roads platforms under cyclic load

Nicole Khoueiry¹, Laurent Briançon², Ali Daouadji³, Abdelkader Abdelouhab⁴

¹Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, France, nicole.khoueiry@insa-lyon.fr

²Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, France, laurent.briancon@insa-lyon.fr

³Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, France, ali.daouadji@insa-lyon.fr

⁴TEXINOV, St Didier de la Tour, F-38110, France, aabdelouhab@texinov.fr

RÉSUMÉ – Un essai de laboratoire à échelle réelle est conçu et développé pour caractériser l'effet de renforcement d'une couche d'agrégats par géosynthétiques sur un sol de faible portance. Cet essai consiste à tester le comportement d'un géosynthétique dans une plateforme routière granulaire sur un sol de faible portance soumis à une charge verticale roulante cyclique. Un protocole de mise en place similaire à celui sur chantier permet d'évaluer en plus l'endommagement à la mise en œuvre des nappes géosynthétiques.

ABSTRACT – A full-scale laboratory test is designed and developed to characterize the geogrid-reinforced base course over weak subgrade. In this test, a layer of reinforced aggregates is placed over a soft subgrade layer, and this unpaved platform is subjected to a vertical cyclic traffic load. Moreover, an installation protocol similar to the in-situ ones allows the study of geosynthetics installation damage.

1. Introduction

L'élargissement des réseaux routiers et l'exploitation de nouvelles régions amènent à construire des voies routières sur des sols de faible portance. L'excavation et le remplacement de ces « mauvais » sols, sols présentant de faibles caractéristiques mécaniques, par une couche de remblais est une solution traditionnelle mais peu économique. Les géosynthétiques sont utilisés dans ce type d'ouvrage pour mettre en place directement la couche de forme sur le sol existant sans substitution. En effet, le renforcement de la couche d'agrégats par géosynthétique augmente sa rigidité et lui confère une portance suffisante, s'il est correctement dimensionné. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont proposé des méthodes de dimensionnement de ce type d'ouvrage en tenant compte du renforcement par géosynthétique. Mais, due à la complexité du phénomène d'interaction sol-géosynthétique et la variété des paramètres qui influencent ce phénomène, le dimensionnement de ce type d'ouvrage reste une problématique de recherche.

Dans le cadre de ce travail, un essai de laboratoire à échelle réelle est conçu et développé pour caractériser l'effet des géosynthétiques dans le renforcement des agrégats sur le sol de faible portance. Cet essai consiste à tester le comportement d'un géosynthétique dans une plateforme routière granulaire sur un sol de faible portance soumis à une charge roulante, cyclique et normale à la surface. Cet essai sur des routes non revêtues renforcées par des géosynthétiques, permet de comparer l'influence de différents produits géosynthétiques et évaluer leur efficacité.

Cette communication présente l'appareillage et le protocole expérimental qui ont été spécifiquement développés pour évaluer l'efficacité de géosynthétiques de renforcement sous chargement cyclique de trafic.

2. Revue bibliographique

Les géosynthétiques sont utilisés pour le renforcement des plateformes granulaires dans l'application des routes non revêtues depuis 1970. En 1980, des géogrilles développées par Mercer, ont été utilisées pour la première fois dans ce type d'ouvrage (Giroud, 2009).

L'effet du renforcement par géosynthétiques dans les structures routières a été mis en évidence par plusieurs auteurs, en se basant sur des essais sur site et des essais à échelle réelle et réduite au laboratoire. Il a été montré que le géosynthétique facilite le compactage Bloise & Ucciardo (2000) et permet de réduire l'épaisseur de la couche d'agrégat (Bloise & Ucciardo, 2000; Cancelli & Montanelli, 1999; Huntington & Ksaibati, 2000; Jenner & Paul, 2000).

Plus généralement le géosynthétique améliore la portance du sol, il apporte un confinement de la couche d'agrégats et permet une diffusion de la charge sur une surface plus grande diminuant donc la contrainte locale appliquée. Le mécanisme de confinement est dû au blocage du déplacement horizontal des agrégats par un enchevêtrement des particules de sol dans la géogrille.

L'essai effectué par Palmeira & Antunes (2010) est un essai à la plaque, avec deux méthodes d'application d'une charge de 566 kPa, à savoir un essai à charge monotone et un essai à charge cyclique avec une fréquence de 1Hz. En se basant sur les résultats de ces essais, il a été démontré que les géogrilles sont plus efficaces que les géotextiles concernant le blocage du déplacement latéral des agrégats. De plus, en comparant les résultats des deux méthodes d'application de charge, ces auteurs concluent que l'essai à charge monotone sous-estime l'efficacité du renforcement.

Christopher & Perkins (2008) présentent les résultats d'un essai à échelle réelle suivant la procédure de l'AASHTO 4E-SR, avec une charge verticale cyclique de 40 kN appliquée sur une plaque circulaire. Dans ces travaux les auteurs testent des géogrilles et des géocomposites. Ils concluent que la présence d'un géotextile non tissé diminue le développement de la pression interstitielle dans le sol de base en assurant le drainage. Ils concluent de plus, que le développement de la pression interstitielle dans le sol de base est largement relié au développement de l'orniérage observé en surface.

Qian et al. (2011 & 2013) se basent sur les résultats de l'essai de chargement cyclique à la plaque de l'université de Kansas, pour tester l'efficacité des géosynthétiques. Les auteurs comparent les résultats d'un essai de référence sans renforcement aux résultats d'essais renforcés par des géogrilles. Ils concluent que les géogrilles améliorent le comportement de la plateforme granulaire sur des sols de faible portance.

Gabr (2001) propose aussi un essai de chargement cyclique sur plaque. Il illustre la variation de l'angle de diffusion de la charge dans la couche d'agrégats renforcée en fonction du nombre de cycle. Giroud & Han (2004) et Leng & Gabr (2006) se basent sur les résultats de Gabr (2001) pour calibrer leurs méthodes de dimensionnement analytiques.

Watts et al. (2004) présentent les résultats d'un essai à échelle réelle avec charge cyclique roulante. La charge est appliquée sur la surface du banc d'essai par l'intermédiaire d'un essieu composé de deux roues jumelées soumis à une charge de 40 kN. Ils concluent que la méthode de dimensionnement empirique proposée par Giroud & Noiray (1981) amène à un surdimensionnement pour tous les produits qu'ils ont testés.

Tang et al. (2008) utilisent l'appareil MMLS3, qui est un simulateur de Trafic à une échelle réduite de 1/3, pour évaluer l'efficacité des géosynthétiques. Dans cet essai, les épaisseurs des couches sont réduites à l'échelle 1/3, alors que les caractéristiques des géosynthétiques ne sont pas réduites. En se basant sur les résultats de ces essais, les auteurs ont calibré un modèle M-E (Mechanistic - empirical model).

Hufenus et al. (2006) présentent un essai in situ à échelle réelle. Plusieurs types de géotextiles et de géogrilles sont testés dans différentes planches d'essais. En faisant varier l'épaisseur de la couche d'agrégats pour différentes capacités portantes du sol support les auteurs distinguent les cas les plus sensibles à la présence d'un renforcement.

Cuelho & Perkins (2009) présentent également des essais in situ à échelle réelle. C'est l'un des rares articles où les méthodes de mise en place des matériaux et de contrôle sont détaillées. Plusieurs types de géogrilles et de géotextiles sont testés. Les auteurs comparent les résultats expérimentaux aux résultats analytiques de la méthode proposée par Giroud & Han (2004) et concluent que cette méthode analytique sous-estime l'épaisseur des agrégats utile pour supporter la charge de trafic sous les conditions de cet essai.

Depuis 1970, plusieurs méthodes empiriques (Hammitt & Iii, 1970; Giroud & Noiray, 1981) et analytiques (Giroud & Han, 2004; Leng & Gabr, 2006) ont été développées pour dimensionner les plateformes routières sur des sols de faible portance, en tenant compte de la présence du renforcement par géosynthétiques. Leur application sur des expérimentations à échelle réelle n'a pas permis de valider ces méthodes analytiques.

Les essais au laboratoire sont ceux qui permettent un meilleur contrôle des caractéristiques du sol de faible portance et donc sont les plus répétables. La plupart des essais à échelle réelle au laboratoire sont des essais de chargement cyclique verticaux et ne permettent pas de reproduire correctement les effets d'une charge roulante.

Enfin, dans la plupart des essais au laboratoire, la méthode de mise en place des géosynthétiques et des agrégats n'est pas décrite précisément. Pourtant elle influence grandement l'interaction sol / géosynthétique et donc les mécanismes de renforcement. Ce point mérite d'être traité avec attention afin que les résultats obtenus prennent en compte au mieux les conditions réelles de chantier.

Sur la base de cette synthèse bibliographique, différents éléments ont été mis en avant et permettent d'orienter les choix du développement de l'appareillage d'essai et les caractéristiques des matériaux à utiliser.

3. Expérimentation

3.1. Appareillage

L'appareil développé dans le cadre de ce projet (Figure 1) est un Simulateur-Accélérateur de Trafic (SAT). Cet appareil simule un trafic unidirectionnel, sous une charge normale de 40 kN qui correspond à la charge d'un demi-essieu (ESAL : Equivalent Single Axle Loads) donnée par la norme américaine AASHTO (1993), avec une contrainte au contact roue-surface de 566 kPa. Le SAT a été conçu pour avoir deux mètres de longueur effective de roulement entre deux zones tampons. Les structures routières testées par ce dispositif sont soumises à 10 000 cycles, avec une profondeur maximale d'orniérage de 75 mm selon la FHWA (2008). La vitesse de circulation de la roue est fixée entre 7 et 10 km/h. Les différentes couches de sols sont placées dans un bac de 5 m de longueur, 1.8 m de largeur et 1 m de hauteur (Figure 2).

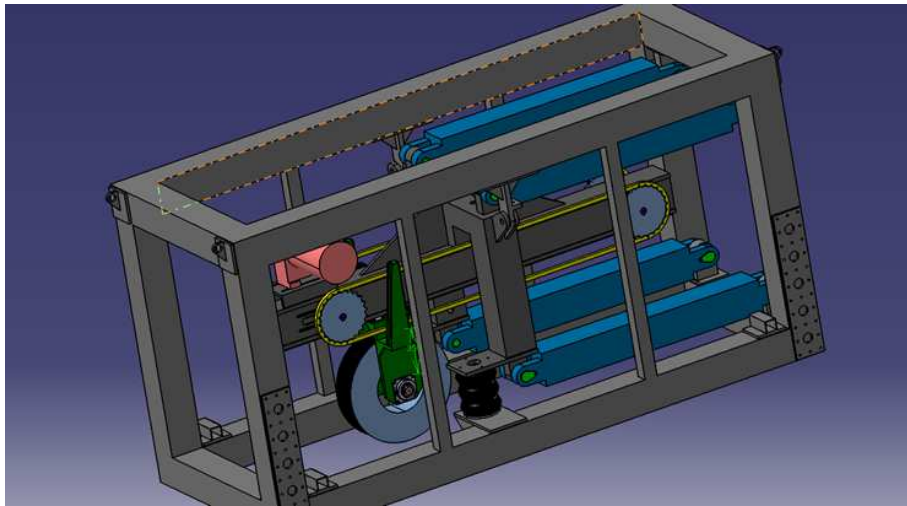


Figure 1. Illustration de l'appareil SAT

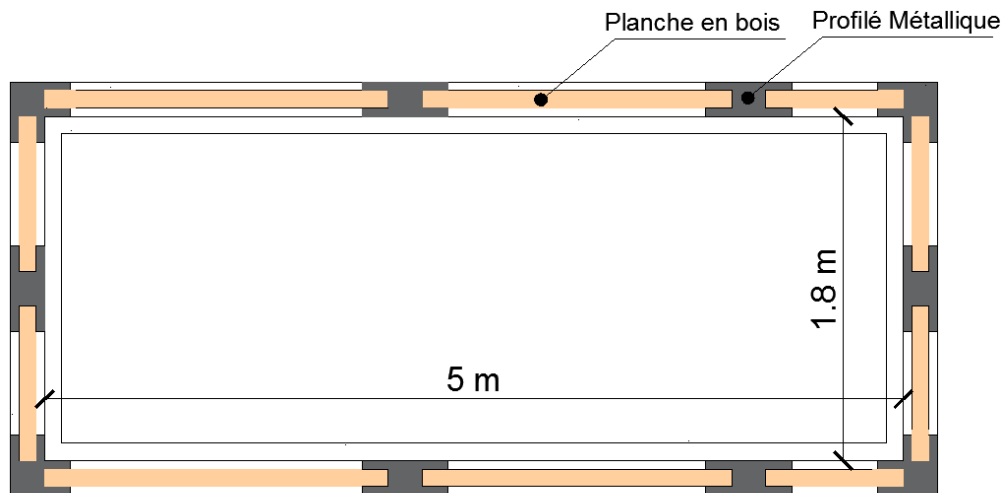


Figure 2. Plan du bac

3.2. Matériaux

La structure routière testée, est formée d'une couche de sol de faible portance de 60 cm d'épaisseur surmontée par une couche d'agrégats de 30 cm d'épaisseur renforcée ou non à sa base par un géosynthétique.

3.2.1. Sol de faible portance

Selon la norme de la [FHWA \(2008\)](#) un renforcement par géosynthétique est nécessaire dans le cas d'un sol de faible portance ayant un indice CBR < 3 %, l'indice CBR étant déterminé par la norme ASTM-D4429.

Pour modéliser le sol de faible portance et pouvoir reproduire ce sol avec les mêmes propriétés à chaque essai, un sol constitué d'un mélange de sable et d'argile est utilisé. Le sable utilisé pour le mélange est le sable d'Hostun (HN 34). Deux types d'argile ont été testés : une bentonite calcique et une kaolinite. Pour chaque type d'argile trois différents pourcentages de mélange sont testés : M1 (25 % Argile, 75 % Sable), M2 (30 % Argile, 70 % Sable), M3 (40 % Argile, 60 % Sable). Pour s'assurer que les deux sols se mélangent bien, une courbe granulométrique est tracée pour chaque mélange (Figure 3).

Pour chaque combinaison de mélange une courbe Proctor et une courbe CBR sont tracées. En se basant sur ces courbes, la teneur en eau sous laquelle il faut compacter le sol pour obtenir un CBR de 2 % est déterminée. Les figure 4 & 5 illustrent les courbes Proctor et CBR des deux Mélanges M1 avec la Bentonite et la Kaolinite respectivement.

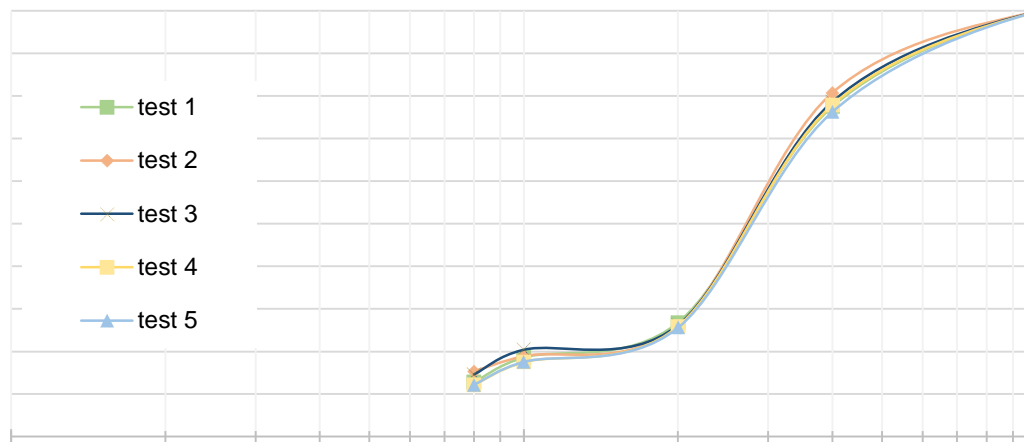


Figure 3. Granulométrie du mélange 25 % Bentonite et 75 % Sable d'Hostun.

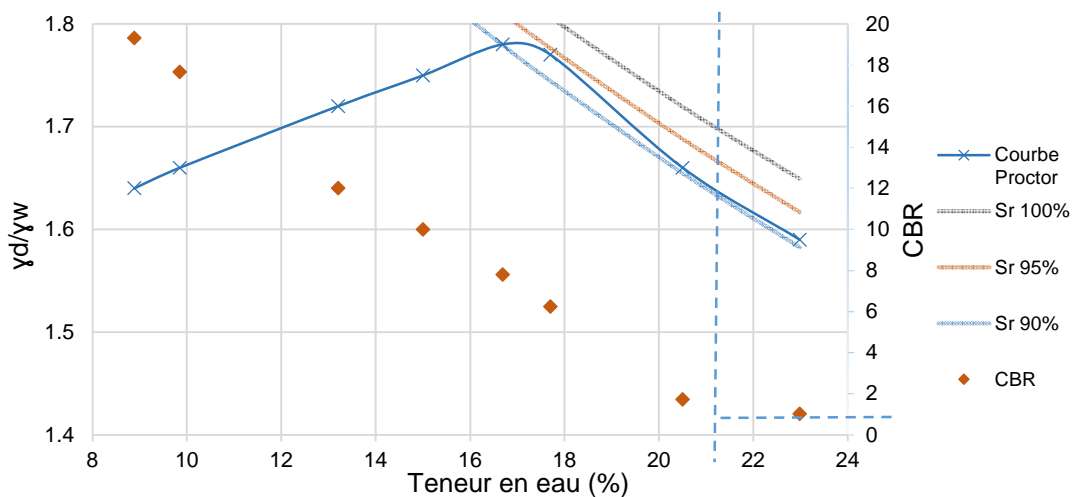


Figure 4. Courbes Proctor et CBR du mélange 25 % Bentonite et 75 % Sable d'Hostun.

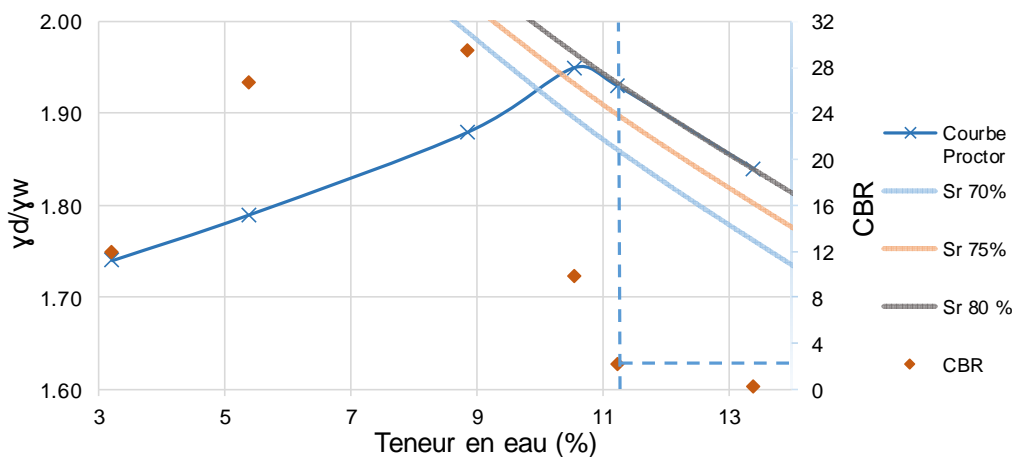


Figure 5. Courbes Proctor et CBR du mélange 25 % Kaolinite et 75 % Sable d'Hostun.

Ces essais montrent que plus le pourcentage d'argile dans le mélange augmente plus la teneur en eau pour un CBR de 2 % augmente (Tableau 1). Le mélange choisi est le mélange M1 (25 % Argile, 75 % Sable) pour les deux types d'argile, c'est le mélange ayant une teneur en eau plus faible que les autres mélanges (M2 et M3).

Pour les mélanges avec la bentonite calcique un CBR de 2 % est atteint pour un degré de saturation supérieur à 90%, alors que cette valeur de CBR est atteinte pour une saturation supérieure à 80 % pour le mélange avec la Kaolinite (Figures 4 et 5).

Tableau 1. Tableau récapitulatif des résultats des courbes Proctor et CBR des différents mélanges

Mélange	25 % Argile 75 % Sable	30 % Argile 70 % Sable	40 % Argile 60 % Sable
Kaolinite	Sr (CBR 2%) = 80 %	Sr (CBR 2%) = 90 %	Sr (CBR 2%) = 95 %
Bentonite Calcique	Sr (CBR 2%) = 90 %	Sr (CBR 2%) = 95 %	Sr (CBR 2%) = 95 %

3.2.2. Géosynthétiques

Deux géogrilles tricotées enduites seront utilisées lors des premiers essais de circulation (Tableau 2).

Tableau 2. Propriétés des géosynthétiques testés

Nomenclature	Type	Nature	déformation à la rupture (%)	Ouvertures (mm)	Résistance en traction (kN/m)	
					SP*	ST*
GSY1	Notex C PET	PET	< 11	40	100	100
GSY2	Notex C PVA	PVA	< 6	40	100	100

*SP : sens production *ST : sens travers

3.2.3. Agrégats

Le matériau granulaire utilisé pour la plateforme est une grave non traitée GNT 0/31.5, couramment utilisées en France dans les ouvrages routiers. Dans les premiers essais, l'épaisseur de la couche est fixée à 30 cm, son influence sera évaluée lors d'essais ultérieurs. La couche d'agrégats est compactée à l'aide d'une plaque vibrante de façon à atteindre un CBR de 20 % d'après les recommandations de la [FHWA \(2008\)](#). Le CBR est contrôlé à l'aide d'un pénétromètre dynamique léger.

3.3. Mise en place et contrôle de qualité

L'étude bibliographique a mis en évidence que, la procédure de mise en place des agrégats sur géosynthétiques dans la plupart des essais à échelle réelle au laboratoire n'était pas détaillée.

La mise en place des différentes couches de sol est importante pour avoir les mêmes propriétés de sol à chaque début d'essai et pour comparer les résultats. D'autre part, la mise en place des géosynthétiques et des agrégats influence les résultats de l'essai à cause de l'endommagement des géosynthétiques lors de la mise en œuvre des granulats.

Un grand malaxeur (EIRICH R08) est utilisé pour la préparation du mélange de sol de faible portance, et ce sol est compacté à l'aide d'une plaque vibrante. Cette couche est ensuite contrôlée par des mesures de teneurs en eau, de densité (densitomètre à membrane) et de caractérisation mécaniques in situ (essais scissométriques, pénétrométriques statiques et dynamiques).

La mise en place des géosynthétiques et des agrégats est faite à l'aide d'une mini-pelle et d'un compacteur à plaque afin de simuler les conditions réelles de mise en place et d'évaluer l'endommagement à la mise en œuvre. Certains essais seront spécifiquement destinés à cette évaluation. Dans ce cas, la plateforme granulaire sera retirée avec soin et les géosynthétiques seront testés par des essais de traction. Cette évaluation sera aussi réalisée à la fin d'un essai de trafic.

3.4. Mesure et instrumentation

Une instrumentation est installée pour d'une part s'assurer que les conditions de trafic sont les mêmes pendant toute la durée de l'essai (vitesse, charge appliquée) et pour d'autre part évaluer le comportement du massif de sol renforcé (répartition de la contrainte, déplacements, déformation du géosynthétique...).

Pour contrôler la force appliquée durant l'essai, un capteur de force est placé sur l'essieu. Le système d'application de la charge est asservi à ce capteur pour maintenir constant l'effort de 40 kN sur la roue pendant l'essai. Un inclinomètre est placé sur l'essieu pour s'assurer de sa verticalité. La vitesse de circulation est aussi contrôlée et le moteur est asservi pour assurer une vitesse constante.

L'orniérage en surface est mesuré à l'aide d'un capteur laser. Des capteurs de pression totale et des capteurs de tassement sont placés dans le sol compressible pour mesurer la distribution des contraintes et le tassement.

La mesure de la déformation du géosynthétique se fait par l'intermédiaire de fibres optiques directement intégrées dans la nappe. Deux différentes technologies de mesure par fibres optiques seront utilisées.

4. Conclusions

Dans le cadre de ce travail, un simulateur-accélérateur de trafic sur des plateformes routières non revêtues renforcées par géosynthétiques est conçu. Les dimensions de l'appareil, les charges appliquées, la reconstitution du sol de faible portance et le protocole de mise en œuvre permettront de reproduire fidèlement le comportement d'une couche d'agrégats renforcés sur sol de faible portance.

Les conditions d'essais, telles que la charge appliquée et la vitesse, seront contrôlées et maintenues constantes pour les cycles de trafic imposés. Le comportement de la couche renforcée et l'efficacité de la nappe géosynthétique sera évalués pendant les cycles de circulation. Une attention particulière sera apportée pour mesurer le transfert de charge, le champ de déplacement dans le massif de sol et la déformation de la nappe géosynthétique.

Les essais réalisés sur cet appareil apporteront des éléments de compréhension sur les mécanismes complexes d'interaction entre le géosynthétique et son environnement et aideront au dimensionnement de nappes géosynthétiques spécifiquement conçues pour cette application.

5. Remerciements

Ce travail de recherche se fait dans le cadre du LabCom PITAGOR associant le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon et la société TEXINOV. Ce LabCom est soutenu financièrement par l'ANR pour une durée de trois ans.

Plus précisément, ce travail se fait dans le cadre d'une thèse CIFRE soutenu financièrement par l'ANRT.

6. Références bibliographiques

- AASHTO, 1993. AASHTO guide for design of pavement structures,. In p. li-69.
- Bloise, N., & Ucciaro, s. (2000). On site test of reinforced freeway with high-strength geosynthetics. In *eurogeo 2000: proceedings of the 2nd european geosynthetics conference. Volume 1: mercer lecture, keynote lectures, geotechnical applications (vol. 1)*
- Cancelli, A., & Montanelli, F. (1999). In-ground test for geosynthetic reinforced flexible paved roads. In *twelfth european conference on soil mechanics and geotechnical engineering (proceedings) (no. Volume 2)*.
- Christopher, B. R., & Perkins, S. W. (2008). Full scale testing of geogrids to evaluate junction strength requirements for reinforced roadway base design. In *proceedings of the fourth european geosynthetics conference, edinburgh, united kingdom, international geosynthetics society*.
- Cuelho, E., & Perkins, S. (2009). Field investigation of geosynthetics used for subgrade stabilization (no. FHWA/mt-09-003/8193). Montana department of transportation.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2008). "Geosynthetic design and construction guidelines reference manual." FHWA NHI-07-092, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Gabr, M. (2001). Cyclic plate loading tests on geogrid reinforced roads. Research rep. To Tensar earth technologies, inc.
- Giroud, J. P. (2009, september). An assessment of the use of geogrids in unpaved roads and unpaved areas. In *jubilee symposium on polymer geogrid reinforcement. Identifying the direction of future research, ice, London, 8th september*.
- Giroud, J. P., & Noiray, L. (1981). Geotextile-reinforced unpaved road design. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 107(ASCE 16489).
- Giroud, J. P., & Han, J. (2004). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. li. Calibration and applications. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(8), 787-797.
- Hammit, G. M., & Aspinall III, W. (1970). Thickness requirements for unsurfaced roads and airfields; bare base support (no. AEWES-TR-S-70-5). Army engineer waterways experiment station vicksburg miss.
- Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S. M., & Brönnimann, R. (2006). Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. *Geotextiles and geomembranes*, 24(1), 21-37.
- Huntington, G., & Ksaibati, K. (2000). Evaluation of geogrid-reinforced granular base. *Geotechnical fabrics report*, 18(1).
- Jenner, C. G., & Paul, J. (2000). Lessons learned from 20 years experience of geosynthetic reinforcement on pavement foundations. In *eurogeo 2000: proceedings of the 2nd european geosynthetics conference. Volume 1: mercer lecture, keynote lectures, geotechnical applications (vol. 1)*.
- Leng, J., & Gabr, M. (2006). Deformation-resistance model for geogrid-reinforced unpaved road. *Transportation research record: journal of the transportation research board*, (1975), 146-154.
- Martin, D. (1988). Die trennfunktion der geotextilien in ungebundenen verkehrswegebefestigungen. 1. *Tagung kunststoffe in der geotechnik, hamburg*, 77-86.
- Miura, N., Sakai, A., Taesiri, Y., Yamanouchi, T., & Yasuhara, K. (1990). Polymer grid reinforced pavement on soft clay grounds. *Geotextiles and geomembranes*, 9(1), 99-123.
- Palmeira, E. M., & Antunes, I. G. (2010). Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. *Geotextiles and geomembranes*, 28(6), 547-558.
- 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*, 25(8), 1013-1021.
- 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*, (2204), 83-91.
- Tang, X., Chehab, G. R., & Palomino, A. (2008). Evaluation of geogrids for stabilising weak pavement subgrade. *International journal of pavement engineering*, 9(6), 413-429.
- Watts, G. R. A., Blackman, D. I., & Jenner, C. G. (2004). The performance of reinforced unpaved sub-bases subjected to trafficking, *Transport research board*.