

DÉVELOPPEMENT ET DIMENSIONNEMENT DE GÉOSYNTHÉTIQUES DANS LE RENFORCEMENT DES PLATEFORMES ROUTIÈRES SUR SOL DE FAIBLE PORTANCE

DEVELOPMENT AND DESIGN OF GEOSYNTHETICS IN THE REINFORCEMENT OF ROADS ON SOFT SUBGRADE

Nicole KHOUEIRY ¹, Laurent BRIANÇON ¹, Ali DAOUADJI ¹, Abdelkader ABDELOUHAB ²

¹ Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS

² TEXINOV, St Didier de la Tour, France

RÉSUMÉ – Le renforcement par géosynthétique de plateformes granulaires reposant sur un sol de faible portance est obtenu par des mécanismes complexes. Un protocole expérimental a été développé dans ce sens pour tester l'effet du renforcement géosynthétique sur ces plateformes soumises à des charges cycliques de circulation et des charges cycliques sur plaque. Durant chaque essai, l'orniérage, la distribution de la contrainte dans le sol et la déformation du géosynthétique sont mesurés. En se basant sur ces mesures, l'efficacité du renforcement géosynthétique peut être évaluée. Un modèle numérique tridimensionnel a parallèlement été développé et calibré pour proposer des règles de dimensionnement pour ce type d'ouvrage renforcé par géosynthétiques.

Mots-clés : Géosynthétiques, géotechnique, renforcement, expérimentations en laboratoire

ABSTRACT – The geosynthetics reinforcement of a granular platform placed on a soft soil involves complex mechanisms. An experimental protocol was developed in order to test the effect of geosynthetics reinforcement in this platform subjected to a cyclic circulation loading and a cyclic plate loading. During the tests, the surface rutting, the soil stress distribution and the geosynthetic strain were measured. A three-dimensional numerical model was developed and calibrated in order to propose a design method for this structure reinforced by geosynthetics.

Keywords: Geosynthetics, geotechnical, reinforcement, laboratory tests

1. Introduction

Les géosynthétiques ont été utilisés dans le renforcement des routes revêtues et non revêtues reposant sur des sols compressibles depuis de nombreuses années (Koerner, 1990). Cette application a montré durant ces années une efficacité dans l'amélioration du comportement de ces structures.

Plusieurs auteurs dans la littérature, en se basant sur des essais sur site et des essais à grande échelle au laboratoire, ont montré que les géosynthétiques améliorent le compactage des agrégats sur le sol de faible portance (Bloise et Ucciardo, 2000 ; Hufenus et al., 2006), améliorent la capacité portante (Meyer et Elias, 1999 ; Hufenus et al., 2006), augmentent la durée de service (Collin et al., 1996 ; Watts et al., 2004), permettent une réduction de l'épaisseur de la plateforme granulaire, et une diminution de la déformation en surface en retardant la formation d'orniérage (Giroud et Noiray, 1981 ; Meyer et Elias, 1999 ; Hufenus et al., 2006).

Les géosynthétiques, dans ces ouvrages, peuvent assurer plusieurs fonctions, mais principalement la séparation et le renforcement. La séparation entre les deux couches de sol permet la conservation des bonnes propriétés de la plateforme granulaire, et empêche la perte des particules dans le sol de faible portance et la migration des particules fines dans la plateforme granulaire. Cette fonction est généralement assurée par des géotextiles (tissés ou non tissés), mais selon Giroud (2009) une géogrille avec une dimension d'ouvertures de maille appropriée peut aussi assurer la fonction de séparation. Le renforcement par géosynthétiques de ces plateformes met en jeu plusieurs mécanismes complexes : le confinement de la plateforme granulaire et l'effet membrane. Le confinement de la plateforme granulaire consiste à réduire le déplacement latéral des agrégats par l'intermédiaire de leur imbrication dans les ouvertures de la géogrille ou par frottement à l'interface. Palmeira & Antunes (2010), ont testé l'efficacité du renforcement

d'un géotextile et d'une géogrille en se basant sur les résultats d'un test cyclique sur plaque. Les auteurs ont conclu que le renforcement par géogrille est plus performant que le renforcement par géotextile due à l'effet d'imbrication des particules. L'effet membrane consiste à supporter la force verticale des roues par la résultante des forces de tractions développées dans un géosynthétique déformé. Dans les premières études sur ce domaine, l'effet membrane était considéré comme le mécanisme le plus influençant (Giroud and Noiray, 1981), mais les dernières études mettent en avant l'effet du confinement (Giroud & Han, 2004; Giroud, 2009; Qian et al., 2011).

La performance du renforcement dans ces ouvrages dépend des propriétés et de l'épaisseur de la couche granulaire, les propriétés du sol de faible portance, la position, le nombre de couches, la rigidité et la force maximale en traction des géosynthétiques. Dans le cas de renforcement par géogrilles les paramètres suivants entrent aussi en jeu : la forme et la dimension des ouvertures, la rigidité des joints et des brins. Dans le but de caractériser l'effet de chaque variable, plusieurs auteurs ont développé des essais au laboratoire à échelle réelle (Dong et al., 2010; Abu-Farsakh et al., 2016; Palmeira & Antunes, 2010; Qian et al., 2011; Qian et al., 2013; Sun et al., 2015; Kim et al., 2006; Christopher & Perkins, 2008; Gabr 2001) et des essais sur site (Hufenus et al., 2006; Cuelho & Perkins, 2009; Cuelho et al., 2014; Watts et al., 2004b; Jersey et al., 2012; Norwood & Tingle, 2014; Cook et al., 2016). Etant donné la complexité des mécanismes mis en jeu et les paramètres intervenant dans l'efficacité du renforcement, ce sujet demande encore d'être approfondi.

Dans le cadre du présent travail, un essai à échelle réelle a été conçu et développé pour tester les plateformes granulaires renforcées reposant sur des sols de faible portance. Cet essai sera utilisé pour tester plusieurs types de géosynthétiques et comparer leur efficacité. Dans cet article, la constitution, la caractérisation et la mise en place de la plateforme à tester sont largement détaillées. Parallèlement, le problème a été modélisé à l'aide du logiciel Flac 3D. Les résultats de ce modèle mettent en évidence l'avantage du renfort dans ces ouvrages.

2. Protocole expérimental

Dans le cadre de ce travail un protocole expérimental a été conçu pour tester le renforcement des plateformes granulaires reposant sur des sols de faible portance dans des voies routières.

2.1. Matériaux

La plateforme testée est formée de 60 cm de sol de faible portance surmonté par une plateforme granulaire de 30 cm d'épaisseur renforcée ou non par un géosynthétique. Cette plateforme est placée dans un banc expérimental de 5 m de long et 1,9 m de large.

2.1.1. Sol de faible portance

Un sol de faible portance selon la norme (FHWA, 2008) doit avoir une portance telle que son indice CBR soit inférieur à 3 (%). Pour pouvoir reproduire à chaque essai le même sol de faible portance, un sol artificiel a été constitué d'un mélange de sable et d'argile. Pour avoir la bonne constitution du sol, deux types d'argile ont été testés, une bentonite et une kaolinite. Pour chaque argile, trois mélanges différents avec des pourcentages différents ont été testés M1 (25 % Argile, 75 % Sable), M2 (30 % Argile, 70 % Sable), M3 (40 % Argile, 60 % Sable). Pour chaque mélange une courbe Proctor et une courbe CBR a été tracée pour déterminer la teneur en eau pour laquelle il faut compacter le sol pour obtenir un indice CBR de 2 (%). Parmi ces mélanges, celui qui a donné un indice CBR de 2 (%) avec une teneur en eau éloignée de la courbe de saturation a été choisi, il s'agit du mélange constitué de 25 % de kaolinite et 75 % de sable. Ce mélange a une densité sèche de 19,3 kN/m³ à une teneur en eau de 11 %.

2.1.2. Agrégats:

Une Grave Non Traitée (GNT) 0/31.5 a été utilisée pour constituer la plateforme granulaire. Ce sol est une grave mal graduée (Gm) selon la classification LPC ($C_U = 20$, $C_C = 5$), avec un angle de frottement de 37 degrés et une cohésion nulle. Des essais Proctor ont été faits de façon à déterminer la teneur en eau sous laquelle il faut compacter ce sol pour atteindre un indice CBR de 20 (%) (FHWA, 2008). Les essais Proctor

ne sont pas représentatifs du compactage de la plateforme granulaire sur un sol de faible portance, mais cela donne une idée de la teneur en eau qui aboutit à l'optimum ($w = 4\%$). Par ailleurs, des essais de compactage à échelle réelle à une teneur en eau de 4% seront effectués pour déterminer le bon protocole de compactage sur un sol de faible portance d'une façon à atteindre un indice CBR de 20%.

2.1.3. Géosynthétiques

Un essai de référence sans géosynthétique sera initialement réalisé. Des essais avec différentes géogrilles seront réalisés (géogrille tricotée, géogrille extrudée, géogrille soudée...) dans le but de comparer leur efficacité par rapport à l'essai de référence.

Dans tous les essais, un géotextile non tissé (70 g/m^2) sera placé à l'interface pour séparer le sol de faible portance de la GNT, et pour faciliter le démontage et la réutilisation du sol dans les autres essais.

2.1.4. Procédure de mise en place et de contrôle de qualité

Le sol de faible portance est constitué par un mélange du sable et d'argile à une teneur en eau de 11%. Un malaxeur spécifique est utilisé pour réaliser ce mélange d'une façon homogène et répétable. Dans le but de déterminer un bon protocole de mise en place du sol de faible portance, Plusieurs protocoles de compactage ont été testés pour obtenir une couche de sol de faible portance homogène sur son épaisseur. Chaque protocole correspond à un nombre de couches compactées, à une masse de sol par couche et à un nombre de passages du compacteur par couche.

Des essais de contrôles ont été réalisés sur le sol mis en place :

- la teneur en eau du mélange mis en place a été contrôlée sur plus que cinq semaines, pour vérifier qu'elle n'évolue pas avec le temps (Figure 1),
- des essais pénétrométriques statiques et dynamiques ont été effectués pour déterminer la portance du sol. Les résultats de ces essais ont été corrélés à l'indice CBR (Figure 2) et les corrélations utilisées pour les deux appareils donnent des résultats satisfaisants.
- un essai scissométrique a été utilisé pour vérifier l'homogénéité du sol mis en place sur son épaisseur.

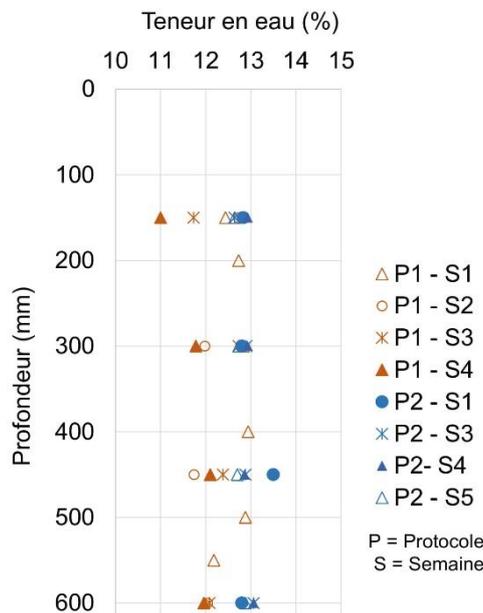


Figure 1. Variation de la teneur en eau en fonction du temps.

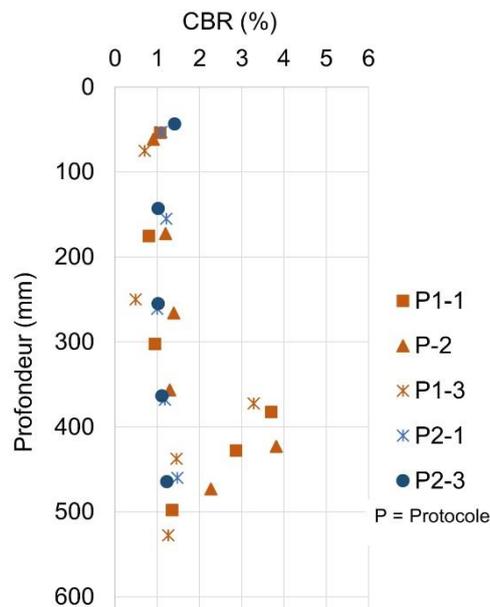


Figure 2. Indice CBR obtenu par corrélation des résultats du pénétromètre dynamique pour le premier et le deuxième protocole.

On observe que le second protocole permet d'obtenir un sol plus homogène mais il doit être encore amélioré pour atteindre un indice CBR de 2 (%).

2.1.5. Instrumentation

Durant les essais, la plateforme testée est instrumentée par différents capteurs: un capteur à visée laser pour mesurer le déplacement en surface, des capteurs de pression totale et des capteurs de tassement pour mesurer la distribution des contraintes et les déformations dans le sol de faible portance. La nappe de géogrille est elle aussi instrumentée par une fibre optique à la réflexion de Rayleigh OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry), pour déterminer très précisément sa déformation avec une résolution spatiale millimétrique.

2.2. Appareillage

Deux types de chargement seront appliqués sur la surface d'une plateforme renforcée ou non renforcée, un chargement cyclique roulant (le chargement le plus proche du chargement réel) et un chargement cyclique sur plaque (le chargement le plus utilisé et le plus simple). Les deux chargements seront appliqués sur la même plateforme, mais chaque chargement sur une tranche suffisamment éloignée de l'autre. Le chargement cyclique roulant sera appliqué sur la surface de la plateforme par l'intermédiaire d'un appareil développé dans le cadre de ce projet (Figure 3). Cet appareil est un Simulateur-Accélérateur de Traffic (SAT), il simule un trafic unidirectionnel, sous chargement normal de 40 kN ce qui correspond à la charge d'un demi-essieu (ESAL : Equivalent Single Axle Loads) (AASHTO, 1993), avec une contrainte au contact roue-surface de 565 kPa. Le SAT applique cette charge sur 2 m de long en dehors des zones tampons. Les structures routières non revêtues sont soumises à 10 000 cycles, avec une profondeur maximale d'orniérage de 75 mm (FHWA, 2008). La vitesse de circulation de la roue est fixée entre 7 et 10 km/h. Le chargement cyclique sur plaque sera appliqué sur la surface de la plateforme par un vérin hydraulique. Une charge maximale de 40 kN est appliquée sur une plaque métallique rigide de 0,3 m de diamètre, avec une pression de 565 kPa. Le chargement cyclique varie entre 0,5 kN et 40 kN à une fréquence de 0,77 Hz. De même par cet appareil, la plateforme est soumise à 10 000 cycles, avec une déformation maximale de 75 mm.

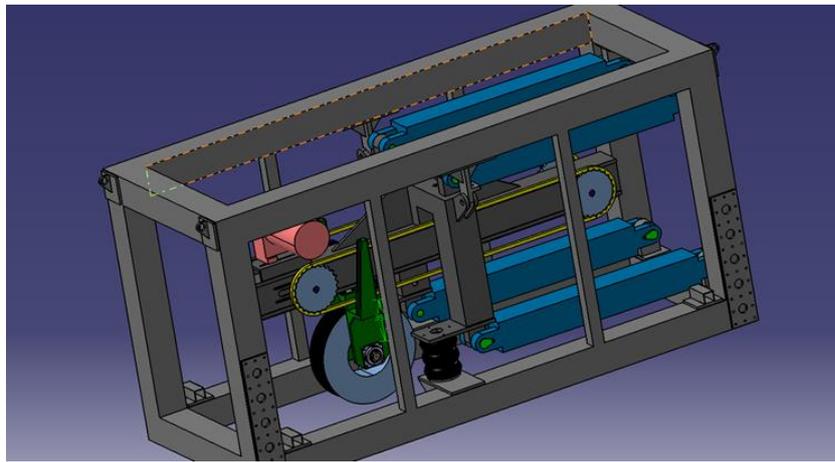


Figure 3. Illustration de l'appareil SAT

3. Modèle numérique

Un premier modèle 3D a été développé en différences finies avec le logiciel Flac 3D pour évaluer l'effet du renfort dans ce type d'ouvrage. Ce modèle sera élaboré par la suite dans le but de modéliser les essais cycliques sur plaque, et comparer les résultats numériques et les résultats expérimentaux.

3.1. Géométrie du modèle

La géométrie du modèle est basée sur la géométrie du modèle physique. Vue la symétrie, le quart de ce domaine est modélisé (Figure 4) (0,9 m de long, 0,9 m de large et 0,9 m de haut).

Le modèle numérique comme le modèle physique est constitué de deux couches de sol, une couche de 60 cm de sol de faible portance, surmontée par une plateforme granulaire rigide de 30 cm. Le milieu continu est discrétisé avec des quadrilatères, de dimension graduellement variable (7875 zones et 9472 nœuds). Des conditions aux limites dues à la symétrie sont imposées dans ce modèle. Une charge monotone de 565 kPa est appliquée en surface. Les résultats de deux modèles sont comparés, un modèle avec un renforcement (MAR) à l'interface et un modèle sans renforcement (MSR).

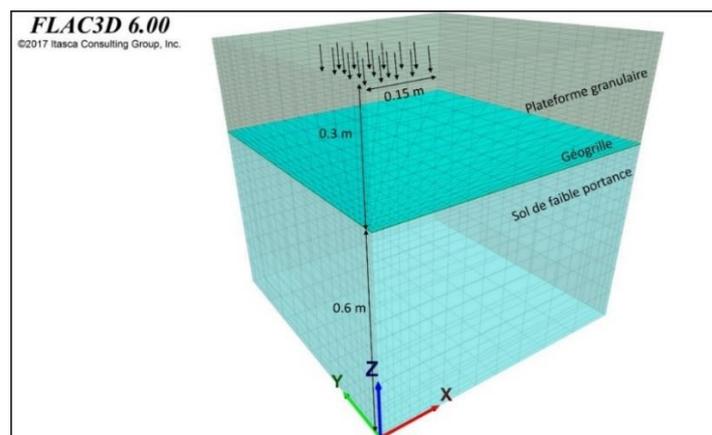


Figure 4. Illustration de la géométrie du modèle.

3.2. Lois de comportement et paramètres

Dans un premier temps, un chargement monotone est simulé, la loi de comportement élastique parfaitement plastique de Mohr-coulomb est utilisée pour les deux couches de sol et pour les interfaces. Pour les simulations élaborées avec une charge cyclique, un autre modèle sera utilisé pour simuler le comportement des sols soumis à des chargements cycliques.

3.2.1. Couches de sols

Les propriétés des deux couches utilisées dans ce modèle sont présentées dans le Tableau 1. Une cohésion est imposée à la couche granulaire pour éviter les problèmes de convergence due aux déplacements excessifs en surface aux bords de la plaque.

Tableau 1. Propriétés des couches de sol.

Propriétés Couches	K (kPa)	G (kPa)	ν	φ (deg)	c (kPa)
Sol de faible portance	$5,75 \cdot 10^3$	$2,65 \cdot 10^3$	0,3	5	20
Plateforme granulaire	$5,75 \cdot 10^4$	$2,65 \cdot 10^4$	0,3	37	15

K = module volumique (kPa)

G = module de cisaillement (kPa)

ν = coefficient de Poisson

φ = angle de frottement (degrés)

c = cohésion du sol (kPa)

3.2.2. Géosynthétique

Le comportement mécanique de l'élément géogrille implémenté en Flac 3D se divise en deux parties, le comportement de l'élément et l'interaction entre l'élément et le milieu externe.

Par défaut, avec Flac 3D, l'élément géogrille est simulé comme une membrane qui a une rigidité en plan mais une rigidité nulle en flexion. Cette membrane se comporte en plan comme un matériau élastique sans limite de rupture. Les éléments « géogrille » implantés dans Flac 3D sont généralement utilisés pour modéliser le comportement d'une membrane flexible dont l'interaction de cisaillement avec le sol est importante, comme les géotextiles et les géogrilles. La géogrille modélisée correspond à la géogrille tricotée avec une rigidité à 2% de déformation de 1000 kN/m qui sera utilisée dans le premier essai (Tableau 2).

Tableau 2. Propriétés de la géogrille.

Propriétés	E (kPa)	Épaisseur (mm)
Géogrille	$3,33 \cdot 10^5$	3

3.2.3. Interface:

Dans le modèle sans renforcement (MSR), il y a une interface entre le sol de faible portance et la plateforme granulaire. Les éléments d'interface introduits dans Flac 3D adaptent le critère de Mohr-Coulomb. Les raideurs k_n et k_s (raideur normale et tangentielle d'une interface) ont été choisis dans ce travail d'une façon à limiter le temps de calcul. Flac 3D propose la règle suivante : prendre des valeurs de raideurs k_n et k_s égales à dix fois la valeur de rigidité équivalente de la région voisine la plus rigide. La rigidité apparente d'une zone, exprimée en contrainte par unité de longueur est :

$$\max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

où K et G sont respectivement le module volumique et le module de cisaillement et Δz_{\min} est la plus petite dimension dans la direction normale des zones adjacentes. Cette approche reste vraie dans le cas où les deux sols mis en contact sont rigides. Mais dans le cas où un sol rigide est en contact avec un sol compressible, l'équation (1) reste applicable mais avec K et G égaux aux raideurs du sol de faible portance (Tableau 3).

Tableau 3. Propriétés de l'interface sol de faible portance/ Plateforme granulaire.

Propriétés	k_n (kPa)	k_s (kPa)	φ (deg)	c (kPa)
Interface Sol de faible portance/Plateforme granulaire	$9,28.10^6$	$9,28.10^6$	5	20

Dans le modèle avec renforcement (MAR) l'interface entre la plateforme granulaire et la géogrille s'ajoute. Le comportement de l'interface entre l'élément « géogrille » et les zones de sol est simulé par une liaison rigide à chaque nœud avec une limite du domaine élastique simulée par la loi de Mohr-Coulomb (Tableau 4).

Tableau 4. Les paramètres de l'interface géogrille/plateforme granulaire.

Propriétés	E (kPa)	φ (deg)	c (kPa)
Interface Géogrille/Plateforme granulaire	$1,76.10^6$	37	15

4. Résultats

La comparaison du tassement en surface du sol de faible portance et la distribution des contraintes dans ce dernier met en relief l'efficacité du renforcement dans cette application. En effet, le renforcement géosynthétique réduit de 8% le tassement à la surface sous le centre de la plaque (Figure 5).

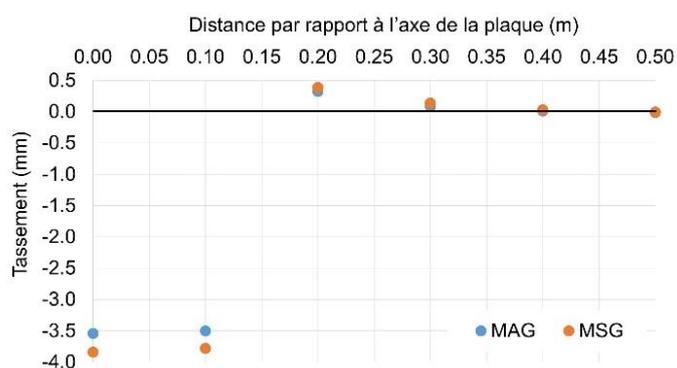


Figure 5. Le déplacement en surface.

Cet apport est aussi illustré par la distribution des contraintes verticales le long de l'épaisseur des deux couches au-dessous du centre de la plaque et le périmètre de la plaque (Figure 6). En effet, la contrainte verticale sous l'axe de la plaque diminue entre les deux couches de sol de 371 kPa à 258 kPa en présence du renforcement (Figure 6). La diminution des contraintes verticales est aussi observée le long de l'épaisseur de la couche du sol compressible. La contrainte verticale est ainsi diffusée sur une plus grande surface, ce qui génère une diminution de déformation dans le sol de faible portance et par conséquent une diminution de l'orniérage en surface.

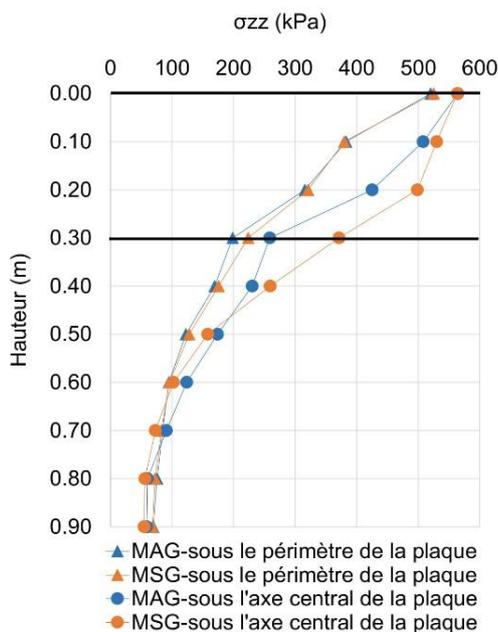


Figure 6. Profil vertical de la contrainte sous le périmètre de la plaque.

5. Conclusion

Dans le cadre de ce travail, un protocole expérimental a été développé pour tester les plateformes granulaires renforcées par géosynthétique et reposant sur un sol de faible portance. Ces ouvrages seront testés sous chargement cyclique sur plaque et sous chargement cycliques de circulation par l'intermédiaire de la machine SAT (Simulateur-Accélérateur de Traffic) qui a été conçu spécialement pour cette application.

Une attention spéciale a été portée à la constitution, la mise en place et le contrôle du sol de faible portance, pour avoir un essai répétable et pouvoir comparer les résultats des différents essais.

Les résultats de ces essais permettront de comparer l'effet d'un chargement cyclique roulant à un chargement cyclique sur plaque. D'autre part, ces essais apporteront des éléments de compréhension sur les mécanismes complexes d'interaction entre le géosynthétique et son environnement et aideront au dimensionnement des nappes géosynthétiques spécialement conçues pour cette application.

Une simulation numérique en 3D a été développée pour voir l'effet du renforcement dans ces ouvrages. Un premier modèle avec un chargement monotone sur plaque a été étudié. Les résultats de ce modèle montrent le rôle du géosynthétique dans l'amélioration de la distribution des contraintes verticales sur la surface du sol de faible portance, ce qui réduit les déformations du sol de faible portance et par conséquent réduit l'orniérage en surface. Un développement de ce modèle est en cours pour pouvoir simuler un chargement cyclique, il sera calibré par les premiers résultats expérimentaux.

6. Références bibliographiques

- AASHTO, 1993. *AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures*, In p. II-69.
- Abu-Farsakh M. Y., Akond I., Chen Q. (2016). Evaluating the performance of geosynthetic-reinforced unpaved roads using plate load tests. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(10), 901-912.
- Bloise N., Ucciardo S. (2000). On site test of reinforced freeway with high-strength geosynthetics. *In eurogeo 2000: proceedings of the Second European geosynthetics conference. Volume 1: mercer lecture, keynote lectures, geotechnical applications (vol.1)*.
- 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*.

- Collin J. G., Kinney T. C., Fu X. (1996). Full-scale highway load test of flexible pavement systems with geogrid reinforced base courses. *Geosynthetics International*, 3(4), 537-549.
- Cook J., Dobie M., Blackman D. (2016). The development of APT methodology in the application and derivation of geosynthetic benefits in roadway design. In *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability* (pp. 257-275). Springer, Cham.
- Cuelho E., Perkins S. (2009). Field investigation of geosynthetics used for subgrade stabilization (No. FHWA/MT-09-003/8193). *Montana Department of Transportation*.
- Cuelho E., Perkins S., Morris, Z. (2014). Relative Operational Performance of Geosynthetics Used as Subgrade Stabilization (No. FHWA/MT-14-002/7712-251).
- Don Y.L., Han J., Bai X.H. (2010). Bearing capacities of geogrid-reinforced sand bases under static loading. In *Ground Improvement and Geosynthetics* (pp. 275-281). FHWA, 1998. *Geosynthetic Design and Construction Guidelines*. In p. 150.
- 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. II. Calibration and applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 787-797.
- 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.
- Jersey S., Tingle J., Norwood G., Kwon J., Wayne M. (2012). Full-scale evaluation of geogrid-reinforced thin flexible pavements. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, (2310), 61-71.
- Kim W.H., Edil T., Benson C., Tanyu B. (2006). Deflection of prototype geosynthetic-reinforced working platforms over soft subgrade. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, (1975), 137-145.
- Koerner R.M., (1990). *Designing with geosynthetics*, Prentice Hall.
- Meyer N., Elias J.M. (1999). Design methods for roads reinforced with multifunctional geogrids for sub-base stabilisation. In *German Conference on Geosynthetics "KUNSTSTOFFE IN der GEOTECHNIK"*. Technical University Munich, D.
- Norwood G.J., Tingle J.S. (2014). Performance of Geogrid-Stabilized Flexible Pavements. US Army Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory.
- Palmeira E.M., Antunes L.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. (2012). 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.
- Sun X., Han J., Kwon J., Parsons R.L., Wayne M.H. (2015). Radial stresses and resilient deformations of geogrid-stabilized unpaved roads under cyclic plate loading tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5), 440-449.
- Watts G.R.A., Blackman D.I., Jenner C.G. (2004). The performance of reinforced unpaved sub-bases subjected to trafficking.
- Watts G.R.A., Blackman D.I., Jenner C.G. (2004). The performance of reinforced unpaved sub-bases subjected to trafficking.

