

Etude expérimentale des plateformes granulaires renforcées par géosynthétiques sur sol mou

Nisrine Abou Chaz, Laurent Briancon, Pascal Villard, Claire Silvani, Alain Nancey, Abdelkader Abdelouhab

▶ **To cite this version:**

Nisrine Abou Chaz, Laurent Briancon, Pascal Villard, Claire Silvani, Alain Nancey, et al.. Etude expérimentale des plateformes granulaires renforcées par géosynthétiques sur sol mou. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03719825

HAL Id: hal-03719825
https://hal.science/hal-03719825

Submitted on 11 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDE EXPERIMENTALE DES PLATEFORMES GRANULAIRES RENFORCÉES PAR GÉOSYNTHETIQUE SUR SOL MOU

EXPERIMENTAL STUDY OF THE GEOSYNTHETIC REINFORCED PLATEFORMS LAID OVER SOFT SUBGRADE SOIL

Nisrine ABOU CHAZ[1,3], Laurent BRIANÇON[2], Pascal VILLARD[1], Claire SILVANI[2], Alain NANCEY[3], Abdelkader ABDELOUHAB[3]
1 Univ, Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France
2 INSA LYON, GEOMAS, 69621, Villeurbanne, France
3 TENCATE GEOSYNTHETICS, 95870, Bezons, France

RÉSUMÉ – Pour étudier les avantages d'utilisation de géosynthétiques dans les routes non revêtues, des plateformes non renforcées et renforcées par géotextile ont été élaborées dans un banc d'essai à grande échelle et testées sous des charges verticales cycliques. Deux geotextiles ont été placés à l'interface entre la plateforme granulaire et le sol de faible portance. Les résultats ont permis d'estimer l'efficacité des géotextiles.

ABSTRACT – To investigate the benefits obtained from inclusion of geosynthetic layer in unpaved roads, non-reinforced and geosynthetic reinforced platforms were built in a large-scale box and tested under cyclic vertical loads. Two geotextiles were placed at the interface between the base layer and the subgrade. The results allowed the estimation of reinforcement efficiency.

1. Introduction

L'expansion urbaine et l'augmentation du trafic de marchandises qui en résulte ont fait que l'homme a construit sur des sols à faible portance. Au fil des années, l'homme a imaginé plusieurs solutions pour améliorer les caractéristiques de ce type de sol. L'utilisation de géosynthétique est considérée comme l'une des plus innovantes de ces dernières décennies tant d'un point de vue technique qu'économique. Le géosynthétique peut avoir une ou plusieurs fonction(s) selon les applications : le renforcement, la séparation, le drainage, la filtration… Dans les applications des routes non revêtues, le géosynthétique est recommandé dans le cas où le sol support a un CBR inférieur à 3% FHWA (2008).

Selon la littérature, la présence d'un géosynthétique peut : 1) réduire l'orniérage (Hufenus et al, 2006 et Khoueiry, 2020), 2) augmenter la capacité portante de la plateforme granulaire (Sun et al., 2015 ; Akond, 2012), 3) réduire l'épaisseur de la couche de forme Giroud and Han, 2004), 4) augmenter la durée de vie de la structure (Palmeira and Antunes, 2010), et 5) améliorer le compactage du matériau d'apport granulaire (Hufenus et al., 2006)… Ses contributions à l'amélioration du comportement de la structure routière dépendent de différents mécanismes développés dans ce type de structure : 1) la séparation entre la couche du sol mou et la couche de grave, 2) le confinement des agrégats (stabilisation), et 3) l'effet membrane du géosynthétique (renforcement). De nombreuses interrogations subsistent dans la littérature quant au taux de déformation du géosynthétique dans les mécanismes de stabilisation et de renforcement. La part de chaque mécanisme dans le renforcement global est encore mal perçue et dépend de nombreux paramètres dont notamment le type de géosynthétique utilisé et son niveau de déformation dans le sol. En effet, le confinement est le mécanisme dominant dans le cas où la déformation du géosynthétique est faible (inférieur à 1%), mais si des niveaux de déformation élevés sont

attendus, l'effet membrane de tension (renforcement) devient dominant (ISO/TC 221/WG 6, 2019). Dans ce contexte, Qian et al. (2013) ont considéré que le confinement fourni par l'imbrication géogrille-agrégats serait le mécanisme clé pour l'amélioration des performances, notamment pour les petites déformations permanentes et pour des couches granulaires épaisses (égales à 30 cm). Alors que l'effet membrane (capacité de la nappe à supporter des efforts perpendiculaires à son plan grâce à une déformation en membrane) serait le mécanisme clé pour l'amélioration des performances lorsque la déformation permanente est supérieure à un tiers de l'épaisseur de la couche de base (Qian et al., 2013). Afin de clarifier les mécanismes mis en œuvre, plusieurs auteurs dans la littérature ont essayé de définir les paramètres qui influencent le comportement du renforcement par des essais expérimentaux en laboratoire et in situ. Les chargements appliqués aux plateformes testées étaient principalement des charges verticales à la plaque (cycliques ou statiques) ou bien des charges roulantes (simulateurs de circulation ou passages de camions). Parmi ces paramètres on identifie l'épaisseur de la couche granulaire, la portance du sol support, le type de géosynthétique, le nombre de géosynthétique et leur position.

1.1. Epaisseur de la couche granulaire (h) et portance du sol support (CBR)

Hufenus et al. (2006) ont observé que, pour un sol support de CBR ≤ 3, la présence d'un géosynthétique positionné à l'interface entre le sol support et la couche granulaire sous une charge roulante est efficace jusqu'à h ≤ 50 cm. En revanche Sun et al. (2015) ainsi que Khoueiry (2020) ont conclu que le géosynthétique placé à l'interface entre un sol support de CBR=2 et la couche granulaire d'épaisseur égale respectivement à 30 cm et 35 cm n'a pas apporté d'efficacité supplémentaire sous un chargement cyclique. Pour de plus faibles épaisseurs, de l'ordre de 20 cm, Khoueiry (2020) et Palmeira and Antunes (2010) ont observé une efficacité du géosynthétique pour des CBR de la couche inférieure égale respectivement à 3 et 8,5.

1.2. Type du géosynthétique

Hufenus et al. (2006) ont conclu de leurs essais en vraie grandeur que chaque géosynthétique de renforcement devait avoir au moins une résistance à la traction à 2% de déformation axiale ($T_{2\%}$) dans le sens de production longitudinal et le sens transversal $T_{2\%}$ ≥ 8 kN/m.

Cuelho and Perkins (2009) et Cuelho et al. (2014) ont essayé de corréler certaines propriétés de géosynthétique avec sa performance dans les applications de routes non revêtues. Notamment, ils ont montré que la résistance à la traction définie à 2% et celle à 5% ($T_{2\%}$ et $T_{5\%}$) de déformation axiale dans le sens transversal de la géogrille contrôlent le comportement de la géogrille sous un développement d'ornières relativement élevé sous des plateformes de faibles épaisseurs.

Qian et al. (2013) ont conclu que la géogrille triaxiale qui possède les propriétés mécaniques les plus élevées (module de stabilité des ouvertures, rigidité radiale à 0,5% de déformation) a montré sa supériorité dans l'amélioration de performance de la plateforme granulaire par rapport aux autres plateformes granulaires (15, 20 et 30 cm) renforcées par des géogrilles de moindre résistance ou non renforcées. Dans le même contexte, mais avec deux géogrilles tricotées ayant des grandes résistances à la traction, Khoueiry (2020) a montré que la géogrille tricotée avec $T_{2\%}$=2500 kN/m, placée à l'interface entre la plateforme granulaire (h =22 cm) et le sol support (CBR = 2), était la plus efficace pour réduire le tassement de la plateforme granulaire sous des sollicitations cycliques, par rapport à une géogrille avec $T_{2\%}$ =1000 kN/m.

1.3. Nombre et position du géosynthétique

Le géotextile est généralement placé à l'interface entre le sol support et la couche de base pour qu'il accomplisse son rôle de séparation en plus du rôle de renforcement.

Hufenus et al. (2006), Cuelho and Perkins (2009), Palmeira and Antunes (2010), Qian et al. (2013), Cuelho et al. (2014) et Khoueiry (2020) ont montré l'efficacité des géosynthétiques (géogrilles et géotextiles) placés à l'interface entre le sol support et la plateforme granulaire. Par ailleurs, Khoueiry (2020) a montré que la géogrille tricotée placée à mi-hauteur dans la plateforme granulaire, sur un sol compressible (CBR=2), était moins efficace que dans le cas où elle était placée entre les deux couches.

Akond (2012) a noté que pour une plateforme granulaire de faible épaisseur (h=20 cm), positionner le géosynthétique à l'interface est très efficace tandis que pour des couches de forme épaisses (h⩾45 cm), l'emplacement optimal d'une géogrille est au tiers supérieur. Il a aussi montré que la configuration avec un géotextile entre les deux couches et une géogrille dans le tiers supérieur de la couche granulaire apportait une efficacité supérieure à la configuration avec un seul géosynthétique.

1.4. Conclusion

Les diversités de facteurs et paramètres influençant les mécanismes impliqués, ses contributions relatives à l'amélioration de la plateforme et leur dépendance expliquent le besoin de plus d'investigations sur ce sujet.

2. *Contexte scientifique et méthodologie*

Un volet expérimental, constitué des essais sur des plateformes non revêtues renforcées et non renforcées par géosynthétique, et un volet numérique pour mieux appréhender les mécanismes mis en jeu sont menés dans le cadre d'une thèse. Les travaux expérimentaux sont réalisés au sein du laboratoire GEOMAS (INSA de Lyon) et la partie numérique en collaboration avec le laboratoire 3SR de l'UGA. Les performances des renforcements sont testées sous chargement vertical cyclique et sous l'action d'une charge roulante en faisant varier certains des paramètres cités précédemment comme les raideurs du géotextile et l'épaisseur de la couche granulaire. Une partie de cette étude est présentée dans cette publication et comprend quatre essais à la plaque sur des plateformes renforcées et non renforcées par géotextile soumis à des charges verticales cycliques. Ces essais mettent en évidence non seulement l'influence du géotextile sur la réduction de la déformation permanente et des contraintes au toit du sol compressible par rapport aux plateformes non renforcées, mais encore l'effet de la raideur de géotextile sur ces réductions.

3. Principe de l'essai et moyens expérimentaux

L'essai consiste à appliquer un chargement vertical cyclique à une plateforme granulaire renforcée ou non par un géotextile sur un sol support de faible portance. Un banc expérimental de 2 m de long, 1,8 m de large et 1,1 m de haut a été utilisé pour mettre en œuvre une couche de sol compressible de 60 cm d'épaisseur recouverte par une couche granulaire de 30 cm d'épaisseur. Le chargement est appliqué par l'intermédiaire d'un vérin hydraulique sur une plaque de 32 cm de diamètre placée sur la surface de la couche granulaire.

Les cycles appliqués sont présentés à la Figure 1a. La fréquence d'un cycle est de 0,77 Hz. La charge maximale a été choisie pour appliquer une pression équivalente à la pression de contact d'une roue (560 kPa). La route non revêtue est censée supporter 10000 passages ESAL, avec un orniérage maximum de 75 mm selon la norme FHWA (2008). Par conséquent, 10000 cycles sont appliqués sur chaque plateforme testée (Figure 1b).

Trois essais ont été réalisés pendant lesquels des mesures « statiques » du tassement et de contraintes ont été effectuées. Ces mesures ont été initialement enregistrées lors d'interruptions programmées durant les phases de déchargement et de chargement pour des raisons de fréquences d'acquisition. Ces arrêts, notamment durant la première phase de chargement, ont induit un tassement supplémentaire non représentatif du chargement cyclique. Les capteurs de contraintes ont donc été installés sur une centrale d'acquisition disposant d'une grande fréquence d'acquisition (960 Hz) permettant de mesurer l'augmentation de contrainte en phase de chargement sans arrêt du cycle. Seules les mesures sous phases de déchargement se sont faites statiquement pour permettre de stabiliser les mesures de tassement.

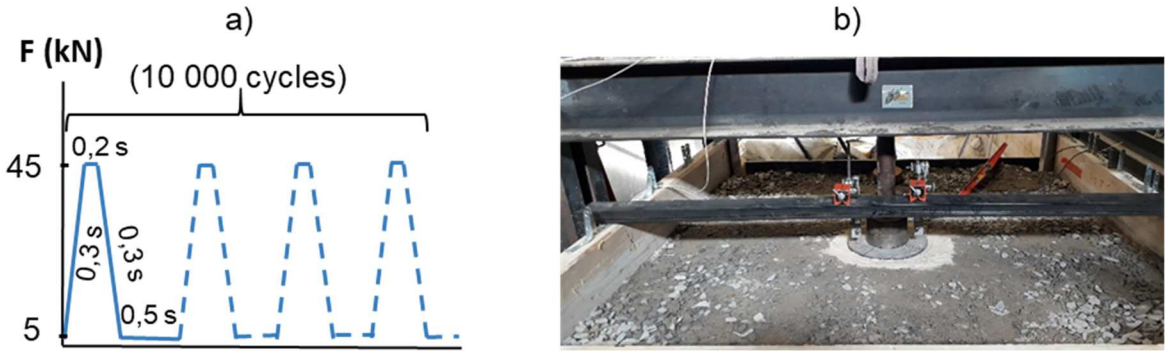


Figure 1: a) Cycles appliqués, b) Configuration de l'essai à la plaque.

4. Matériaux

Le sol compressible artificiel est composé d'un mélange de 20% d'argile de type Kaolinite et de 80% de sable d'Hostun. Des essais de compactage standard « Proctor » ont été effectués pour obtenir la courbe de compactage du sol compressible. La masse volumique sèche maximale était de 1,85 Mg/m^3, ce qui correspond à un taux d'humidité optimal de 10,5%. Une série d'essais CBR en laboratoire pour ce sol a été effectuée à différentes teneurs en eau. Le sol compressible a été compacté à une teneur en eau de 13,0 % pour atteindre une valeur de CBR d'environ 1,0.

Des graves non traitées (GNT 0 / 31,5), mal graduées (Cu=20, Cc=5) ont été utilisées pour constituer la plateforme granulaire. De la même manière que le sol compressible, des essais de compactage « Proctor » et des essais CBR ont été effectués pour les graves en laboratoire. Ces graves sont compactées à une teneur en eau 4% pour obtenir un IPI autour de 20%.

Table 1: Caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles.

Géotextile	$T_{2\%}$ (KN/m)		$T_{3\%}$ (KN/m)		$T_{5\%}$ (KN/m)	
	SP	ST	SP	ST	SP	ST
GTX 1	23,9	26,3	37,3	37,7	61,2	56,3
GTX 2	8,7	27,8	13,0	43,8	23,7	72,5

SP : Sens de production, ST : Sens transversal.

Les deux géotextiles tissés (GTX1 et GTX2) sont composés d'un assemblage de filaments en polypropylène. Les propriétés physiques et mécaniques de ces deux géotextiles ont été fournies par le producteur et sont présentées dans le tableau 1. Le GTX1 est quasi-isotrope dans le domaine des petites déformations car il possède des rigidités à des déformations axiales (2%, 3%) très proches dans le sens production et le sens

transverse. Au contraire le GTX2 est anisotrope, ses rigidités dans le sens transverse sont plus importantes que celles dans le sens de production.

5. Instrumentation

Le système d'instrumentation, illustré dans la figure 2, comprend des capteurs de pression totale, des capteurs de tassement hydraulique et des capteurs de déplacement à visée laser. Les capteurs de pression totale ont été placés au toit du sol de faible portance pour mesurer la répartition des contraintes. La capacité maximale de ces cellules de pression était de 500 kPa, ce qui est supérieur à la contrainte verticale maximale prévue à l'interface entre la plateforme granulaire et le sol compressible. Chaque capteur de tassement est disposé sur un capteur de pression totale. Des capteurs de déplacement à visée laser sont placés au-dessus de la plaque circulaire pour mesurer son enfoncement au cours de l'essai. Ces capteurs ont une plage de mesure entre 0 et 300 mm. Après avoir vérifié qu'il n'y a pas d'effets de bord dans les trois premiers essais, la position des capteurs a été modifiée dans le 4ème essai pour concentrer les mesures dans la zone centrale (Figure 2b).

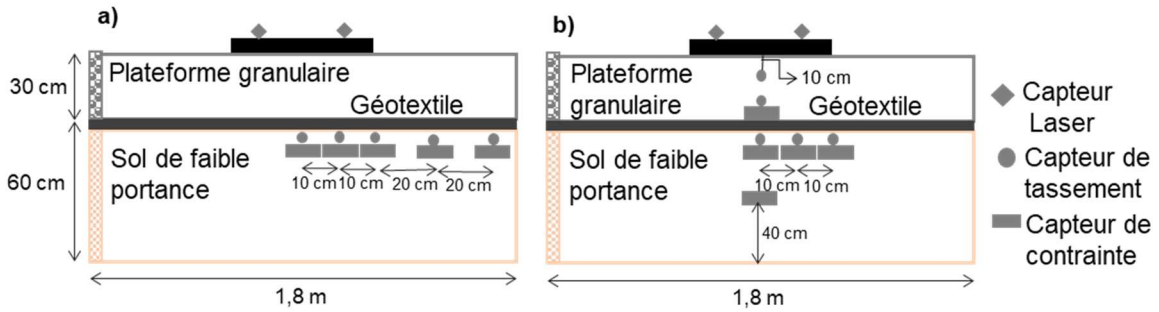


Figure 2: Système d'instrumentation : a) dans les trois premiers essais, b) dans le 4ème essai.

6. Protocole expérimental

Plusieurs protocoles d'installation et de compactage du sol de faible portance ont été testés pour aboutir à une méthodologie fiable et répétable permettant d'obtenir une couche de sol compressible avec un indice CBR de 1. La couche granulaire a été mise en place en 3 sous couches à une teneur en eau de 4%, et chaque sous couche a été compactée à l'aide d'une plaque vibrante.

L'indice CBR du sol de faible portance a été contrôlé par des essais de pénétration statique au cône avant la mise en place de la couche granulaire et après son démontage puisque le compactage de la couche granulaire engendre une augmentation du CBR de la couche superficielle du sol de faible portance. Par ailleurs, des essais de pénétration dynamique au cône ont été effectués dans la plateforme granulaire et le sol de faible portance après compactage. La Figure 3 présente les profils IPI pour 4 essais, estimés à partir du pénétromètre dynamique. Elle traduit une plage de IPI entre 4% et 15% dans la couche granulaire et de CBR autour de 1 dans le sol support. En plus, des essais au compactomètre de Clegg ont été effectués pour vérifier le CBR de la plateforme granulaire et confirmer les mesures déduites du pénétromètre dynamique.

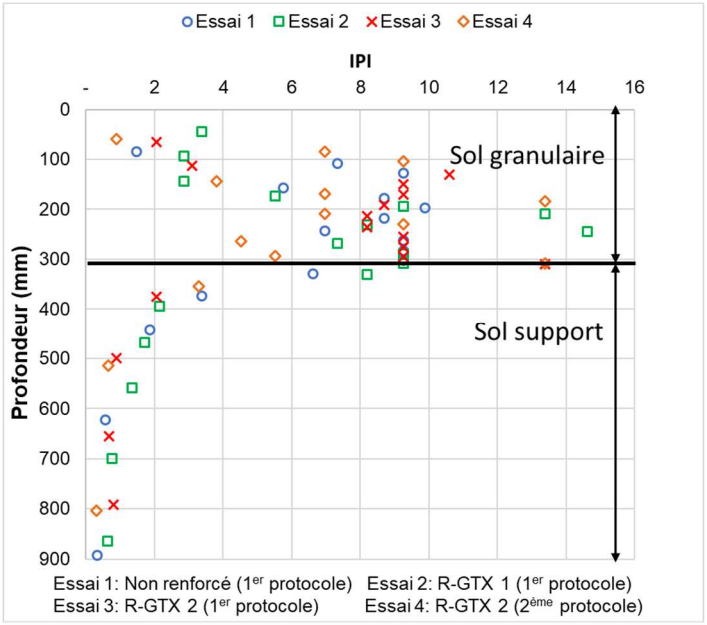


Figure 3: Profils de portance (IPI) des sols en place pour les 4 sections d'essai.

7. Résultats et discussion

La Figure 4 présente l'évolution du tassement de la plaque avec les cycles pour les quatre premiers essais dans les phases de déchargement et montre un premier déplacement d'environ 28 mm (Essai 1 non renforcé), 17 mm (Essai 2 renforcé par GTX 1), 39 mm (Essai 3 renforcé par GTX 2) et 45 mm (Essai 4 renforcé par GTX 2). La différence entre les essais 3 et 4 s'explique par un protocole différent d'application de la charge.

Bien que l'essai 1 ait été stoppé à 1000 cycles à cause d'un tassement excessif de la plateforme amenant le vérin à sa fin de course, l'essai 2, renforcé par le GTX 1, a réduit de 51% le tassement à la surface de la plateforme granulaire par rapport au cas non renforcé à 1000 cycles. Le GTX 2 a réduit, dans une moindre mesure, les tassements de 24% et 33% dans les essais 3 et 4 respectivement à 1000 cycles par rapport au cas non renforcé.

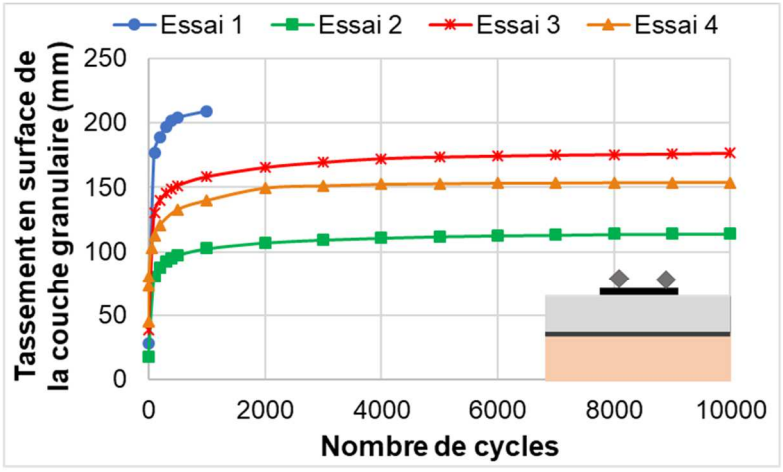
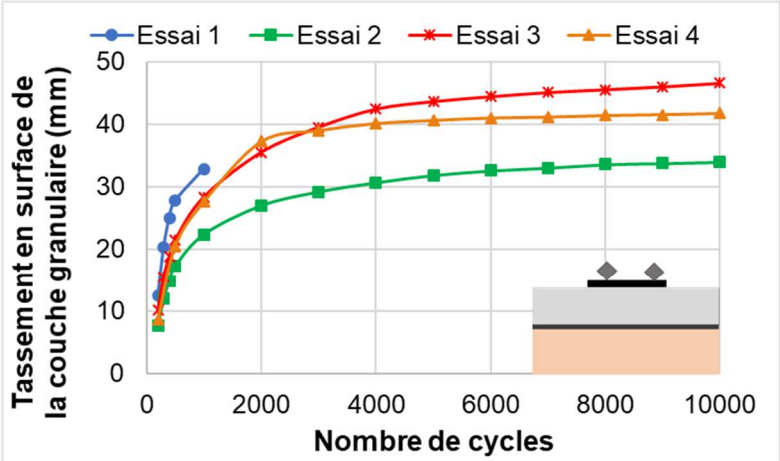


Figure 4: Evolution du tassement de la plaque en fonction des cycles.

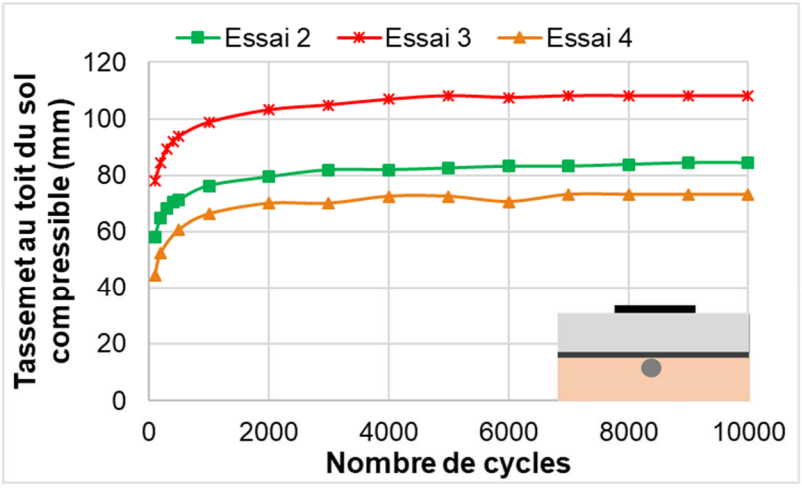
On observe qu'une grande partie du tassement est consommé au cours des 100 premiers cycles. Pour négliger l'influence du tassement initial et comparer les solutions de renforcement sur le comportement à long terme, la Figure 5 présente l'évolution des tassements à partir du 101eme cycle (le tassement a été mis à zero au cycle 100). Bien que l'essai 2 ait été réalisé avec le 1er protocole qui induit des tassements excessifs, la plateforme renforcée avec le GTX 1 a montré la réduction de tassement par rapport à la plateforme non renforcé à 1000 cycles la plus importante (32%) suivie par la plateforme renforcée par le GTX 2 du 2eme protocole (16%) puis par la plateforme renforcée par le GTX 2 du 1er protocole (14%). Par conséquence, la plateforme renforcée par le GTX 1 est celle qui a montré une capacité de réduction du tassement de surface plus importante que celle de la plateforme renforcée par le GTX 2.

La Figure 6 présente l'évolution du tassement sous la plaque au toit du sol compressiblle à partir du 101ème cycle. En comparant les figures 5 et 6, on observe que le tassement total correspond à la somme du tassement du sol compressible pour la plus grande part et dans une moindre mesure de la déformation de la plateforme granulaire.



Essai 1: Non renforcé (1er protocole) Essai 2: R-GTX 1 (1er protocole)
Essai 3: R-GTX 2 (1er protocole) Essai 4: R-GTX 2 (2ème protocole)

Figure 5: Evolution du tassement de la plaque à partir du 101eme cycle.



Essai 2: R-GTX 1 (1er protocole) Essai 3: R-GTX 2 (1er protocole)
Essai 4: R-GTX 2 (2ème protocole)

Figure 6 : Evolution du tassement au toit du sol compressible à partir du 101eme cycle.

8. Conclusion

Cet article présente une étude expérimentale visant à déterminer le comportement des plateformes renforcées par un géotextile et non renforcées reposant sur des sols de faible portance sous chargement cyclique. Le protocole de mise en œuvre permet d'obtenir deux couches du sol homogènes avec des caractéristiques de portance ciblées et reproductibles. Par ailleurs, le protocole d'application de la charge qui a été adopté dans les premiers trois essais a montré un tassement excessif durant les 100 premiers cycles en effectuant des mesures « statiques » du tassement et de contraintes durant les phases de chargement. Cependant la comparaison des résultats des essais 3 et 4, qui sont obtenus avec deux protocoles différents d'application de charges, montre que les résultats après 100 cycles évoluent de manière similaire. Par conséquent, la comparaison entre les essais après 100 cycles reste pertinente.

Les résultats du tassement en surface du sol granulaire et au toit du sol compressible ont montré l'efficacité du renforcement à réduire les tassements par rapport à l'essai non renforcé. Le géotextile isotrope et le plus rigide dans le sens de production (GTX 1) a montré une meilleure efficacité que celle apportée par le géotextile anisotrope (GTX 2).

9. Références bibliographiques

AASHTO (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, pp. II–69.

Akond I. (2012). Laboratory evaluation of geosynthetics to stabilize/reinforced the subgrade/base in unpaved roads. Thesis.

Cuelho E., and Perkins S. (2009). Field investigation of geosynthetics used for subgrade stabilization (No. FHWA/MT-09-003/8193). Montana Dept. of transportation. Research programs.

Cuelho E., Perkins S., Morris Z., (2014). Relative operational performance of geosynthetics used as subgrade stabilization. Report No. FHWA/MT-14-002/7712-251.

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.

Hufenus R., Rueegger R., Banjac R., Mayorc P., Springman S.M., Bronnimann R. (2006). Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. Geotextiles and Geomembranes 24 (2006), pp. 21–37.

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), pp.787 - 797.

ISO TC221 WG6 N337 PG5 TR 18228-5 - 18 Dec 2019.

Koueiry N. (2020). Study of granular platforms behaviour over soft subgrade reinforced by geosynthetics: experimental and numerical approaches. Thesis.

Palmeira E.M., Antunes L.G.S. (2010). Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. Geotextiles and Geomembranes 28 (2010) 547e558.

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. J. Mater. Civ. Eng. 2013.25:1013-1021.

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 (2015) 440-449.