

DES GÉOSYNTHÉTIQUES INTELLIGENTS POUR RENFORCER ET SUIVRE LES DÉFORMATIONS DE CHAUSSÉES BITUMINEUSES

SMART GEOSYNTHETICS TO REINFORCE AND MONITOR BITUMINOUS PAVEMENTS

Christophe PETIT ¹, Didier LESUEUR ², Anne MILLIEN ¹, Gwenael LEGUERNEVEL ², Jérôme DOPEUX ¹, Benoît PICOUX ¹, Fatima ALLOU ¹, Fateh TERHANI ¹

¹ Université de Limoges, Egletons, France - christophe.petit@unilim.fr

² Texinov, Saint-Didier de la Tour, France – dlesueur@texinov.fr

RÉSUMÉ – Cet article présente l'application de géosynthétiques de renforcement intelligents sur la dalle d'essai en vraie grandeur de l'Université de Limoges. La planche expérimentale était notamment composée d'une couche de 9 cm de Grave Bitume (GB) recouverte d'une couche de Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG) de 5 cm. Un premier géosynthétique intelligent a été positionné sous la GB, et un second, de forte résistance, positionné à l'interface GB/BBSG. Des jauges de déformation conventionnelles ont été placées aux mêmes niveaux. La planche d'essai et sa construction, puis les déformations obtenues sous divers chargements sont présentées. Les données sont discutées à la lumière de calculs réalisés avec un logiciel de dimensionnement. Une excellente correspondance est obtenue. Cela démontre la fiabilité de la méthode qui ouvre la voie à des chaussées intelligentes de nouvelle génération aux déformations suivies en continu, permettant d'optimiser la politique d'entretien et les programmes de maintenance.

Mots-clés : géosynthétique, chaussée, déformation, fibre optique, weigh-in-motion.

ABSTRACT – This article describes the use of smart geosynthetics in the test pit of the University of Limoges. The experimental test section consists of a 9 cm-thick Asphalt Concrete base course (Grave Bitume - GB) covered by a 5 cm-thick Asphalt Concrete wearing course (Béton Bitumineux Semi-Grenu - BBSG). A first smart geosynthetic was installed at the bottom of the GB, and a second one, having in addition a reinforcement function, was placed at the GB/BBSG interface. Conventional strain gauges were also positioned at similar locations. The building of the test section and the measured strains are presented. The data are discussed in the light of calculations made with a pavement design software. An excellent agreement was found. These results demonstrate that these innovative systems open the way to a new generation of smart infrastructures with continuous monitoring of deformations, which in turn allows to optimize maintenance operations.

Keywords: geosynthetics, pavement, strain, optical fibre, weigh-in-motion.

1. Introduction

L'Université de Limoges vient de s'équiper d'une dalle d'essai de chaussées en vraie grandeur sur son site d'Egletons (17). Cette infrastructure est installée au sein d'un bâtiment, ce qui rend possible d'en contrôler les conditions (température, humidité...). Occupant une surface de 8 x 3 m² sur une profondeur de 2 m, elle permet l'emploi d'engins de construction utilisés couramment sur des chantiers routiers. Ainsi, il est maintenant possible de construire des planches d'essai en conditions réelles et de les solliciter en conditions de laboratoire (contrôle de la température et des chargements).

La fibre optique est utilisée depuis longtemps pour le suivi des chaussées (Wang et Tang, 2008) ou pour des mesures de charge roulante sous trafic (weigh-in-motion – WIM – Caussignac et al., 1998). Cependant, les technologies disponibles sont soit très intrusives (Doré et al., 2007), soit peu satisfaisantes. Ainsi, obtenir des signaux de déformations propres à l'aide de fibre optique individuelle dans une chaussée demeure délicat car la transmission de la déformation de la chaussée à la fibre n'est pas aisée. Cela se traduit par des signaux médiocres dont la pertinence est discutable (Chapeleau et al., 2014).

Texinov, à l'origine des géosynthétiques intelligents utilisés, dispose d'une solide expérience de l'emploi de fibre optique dans des géosynthétiques de renforcement (Huckert et al., 2014 et 2015), qui a permis d'adapter ces technologies à la problématique des chaussées, afin d'en mesurer les déformations en continu tout au long de leur durée de vie. L'expertise réside dans la capacité à

solidariser la fibre au textile, de manière à ce qu'elle en suive exactement les déformations. Ainsi, les travaux présentés ici résultent de l'application de ce savoir-faire concernant les textiles intelligents aux géosynthétiques de renforcement de chaussées.

Cet article décrit dans un premier temps la planche d'essai, en mettant l'accent sur la structure mise en œuvre et les capteurs utilisés. Ensuite, les chargements réalisés et les signaux observés sur les capteurs conventionnels et sur les géosynthétiques intelligents sont présentés. Enfin, des calculs effectués à l'aide d'un logiciel de dimensionnement de chaussées sont comparés aux données expérimentales.

2. Matériaux et Méthodes

2.1. Matériaux et structure de chaussée

La planche a été construite dans la toute nouvelle dalle d'essai en vraie grandeur de l'Université de Limoges à Egletons (17). Les dimensions de la fosse ayant accueilli la structure sont de 8 x 3 m² avec une profondeur de 2 m. La chaussée expérimentale testée était composée des couches suivantes, du bas vers le haut :

- 20 cm d'une grave 20/40 ont été posés en fond de fosse, de manière à assurer un bon drainage. Le drain est connecté à un circuit d'eau de manière à contrôler le niveau de la nappe dans la structure. Pour cette expérimentation, la fondation a été maintenue sèche,
- 140 cm de granite décomposé simulant le sol naturel,
- 30 cm de Grave Non-Traitée 0/31,5 (GNT 2 selon NF EN 13-285) comme couche de forme. Après compactage, elle avait un module EV2 de 17 MPa. Avant la mise en œuvre des couches de chaussée, un premier jeu de capteurs a été placé sur la GNT,
- 9 cm de Grave Bitume (AC 14 base selon NF EN 13108-1 ou Grave Bitume GB 3 0/14 selon les anciennes normes françaises) comme couche de base ;
- une couche d'accrochage a été répandue sur la GB avec un dosage de 300 g/m² de liant résiduel. Un surdosage de 200 g/m², générant donc un dosage total de 500 g/m², a été ajouté sur une surface de 4 x 1 m² en prévision de la pose du second géosynthétique intelligent tel que décrit dans la section suivante. Ce dernier a ensuite été installé en suivant la recommandation d'usage pour ces produits : le textile a été mis en place dans l'émulsion fraîchement répandue, avant rupture. La présence du léger voile polyester dans le géosynthétique, permet ainsi à l'émulsion de remonter dans le produit par capillarité (Fig. 1) ;



Figure 1. Second géosynthétique, intelligent et renforçant, juste après installation

- Une fois la couche d'accrochage rompue, ce qui s'observe visuellement par le passage d'une couleur initiale marron (émulsion fraîche) à du noir brillant (film de bitume résiduel), une couche de roulement de 5 cm de Béton Bitumineux Semi-Grenu (AC 10 roul selon NF EN 13108-1 ou BBSG 3 0/10 selon les anciennes normes françaises).

2.2. Géosynthétiques intelligents et capteurs

Deux types de géosynthétiques intelligents ont été testés. Les deux étaient basés sur la même technologie « tissé-tricoté-tramé » permettant une intégration totale de la fibre optique au sein du textile, garantissant ainsi un parfait transfert des déformations subies par le produit vers la fibre. Plus précisément, les capteurs suivants ont été utilisés :

- un géosynthétique de faible résistance GeoWarning®, placé à l'interface GNT/GB. Il était basé sur la combinaison d'un voile tissé-tricoté-tramé en PolyEster Téréphtalate (PET) et d'une fibre de verre associée par tricotage. Il était équipé d'une fibre optique longitudinale avec deux réseaux de Bragg (Fiber Bragg Grating - FBG) distants de 3 m (FBG1 et 2 – Fig. 2). Les deux capteurs FBG disposent chacun d'une longueur d'onde propre permettant de les interroger séparément,
- FBG1 et 2 ont été placés à environ 20 cm chacun des jauges de déformations conventionnelles nommées respectivement SG1 et SG2 (Fig. 2),
- un géosynthétique de forte résistance Notex® Glass 100x100 GeoWarning®, placé à l'interface GB/BBSG. Il était basé sur la combinaison d'un voile tissé-tricoté-tramé en PET et de renfort en fibres de verres, avec un fort grammage de verre de manière à atteindre une résistance à la rupture de 100 kN/m dans les 2 directions. Il était également équipé d'une fibre optique longitudinale avec un seul réseau de Bragg (FBG3 – Fig. 2). Le principe est d'intégrer la fibre optique en la plaçant lors du tricotage des fibres de verre, de manière à la solidariser au reste du textile. FBG3 a été placé juste au-dessus de FBG2, de telle manière qu'il ne soit séparé que par les 9 cm de GB,
- deux thermocouples ont également été placés respectivement sur la GNT et sur la GB. La température mesurée sur les 2 capteurs lors des essais de chargement au camion était de 19°C, alors qu'elle était de 7°C pour les chargements au déflectomètre.

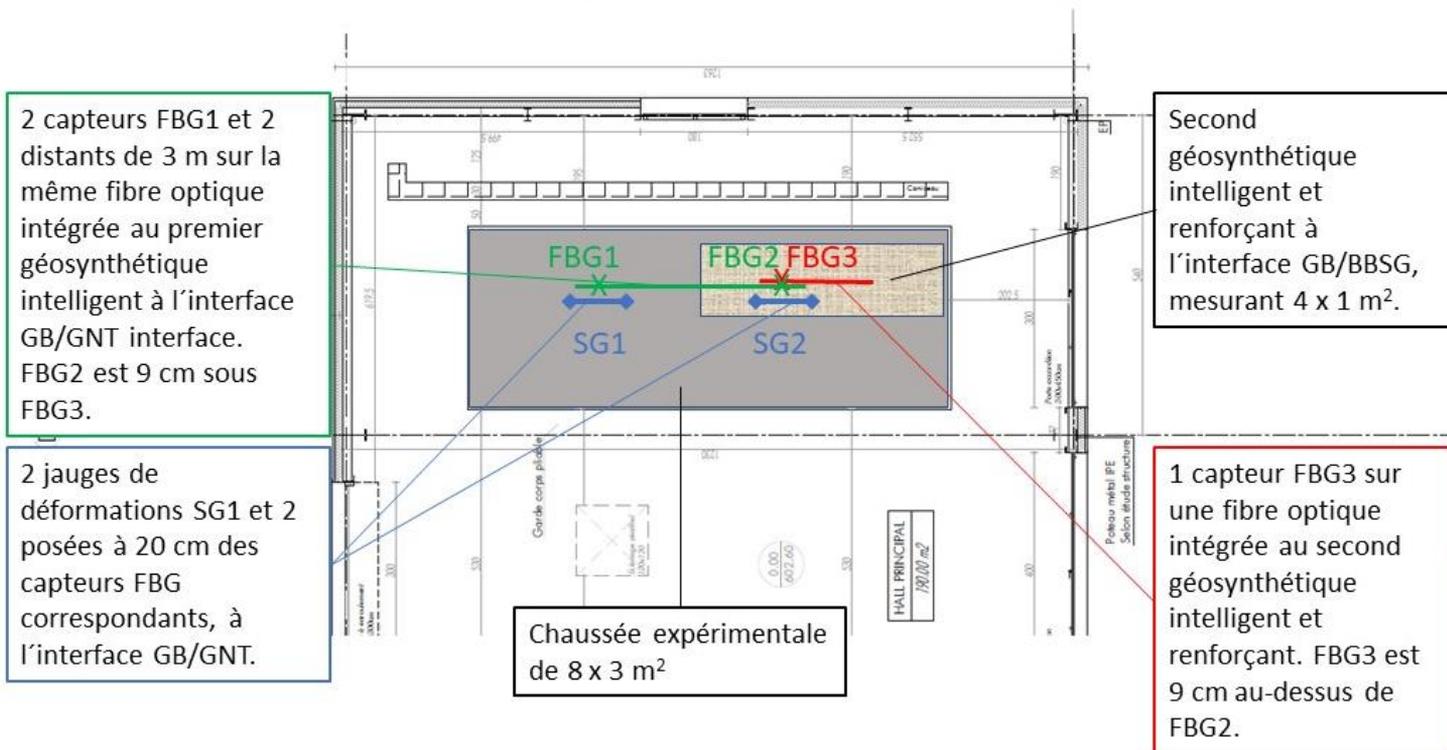


Figure 2. Schéma de principe de la planche d'essai et positionnement des différents capteurs et géosynthétiques intelligents

2.3. Chargements

Une première campagne de chargement a été réalisée peu de temps après la construction en juillet 2017. Pour ce faire, un camion Renault S130 de poids à vide 4,7 t et distance entre essieux de 3,24 m, a été utilisé. La charge sous la roue jumelée arrière a été mesurée à 11,2 kN. Le camion a été placé de manière à ce que sa roue jumelée arrière passe sur les capteurs FBG1, 2 et 3 (Fig. 3).

Dans un premier temps, les données ont été mesurées avec le camion à vide. Ensuite, le camion a été chargé avec deux blocs de béton de 10 kN chacun, placé juste au-dessus de l'essieu arrière. La charge sur la roue jumelée était alors de 21,2 kN. Enfin, un troisième bloc de béton a été ajouté sur les deux précédents, permettant d'obtenir une charge de 27,2 kN.

Pour tous ces essais, le camion roulait à une vitesse de l'ordre de 1 m/s (3 à 5 km/h).



Figure 3. Essai de chargement avec le camion

Une seconde campagne de chargement a été réalisée en mars 2018 à l'aide du déflectomètre à masse tombante (Falling Weight Deflectometer – FWD) de l'Université de Limoges. Ce dispositif permet de solliciter directement les capteurs en se positionnant exactement dessus (Fig. 4).

Le FWD se compose d'une remorque tractée transportant les éléments de mise en charge et neuf capteurs de déplacement sur environ 2 mètres, dont un au centre de la plaque de 30 cm de diamètre par laquelle est appliquée la charge. Le véhicule tracteur dispose d'un système embarqué de pilotage, d'acquisition et de traitement de l'information.

Après la mise en place de la plaque au droit du point de mesure (Fig. 4), la masse est libérée d'une hauteur choisie de 2 à 40 cm, provoquant une force contrôlée de 7 à 135 kN. La transmission de la charge se fait par un ressort permettant de définir la durée de chargement. Pour les structures routières, le chargement est réglé pour obtenir une charge appliquée durant 28 ms, soit environ 30 Hz, correspondant à la durée d'application de la charge associée au passage d'un poids lourd circulant à une vitesse moyenne de 70 km/h.



Figure 4. Essai de chargement avec le déflectomètre à masse tombante (FWD)

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats du chargement par camion

Les signaux obtenus sur FBG2 lors du passage de la roue jumelée arrière du camion sont reproduits sur la figure 5 pour les 3 chargements. Il apparaît ainsi clairement que les géosynthétiques intelligents sont capables de suivre finement les déformations, avec un signal propre à chaque passage, que le textile soit sollicité en compression ou en traction (Fig. 5). Les courbes ont été décalées de manière arbitraire sur l'échelle des temps de manière à mieux séparer les signaux. Le premier pic est associé au passage de la roue avant, et le second, de la roue arrière.

La présence des deux pics résulte du passage d'abord de la roue avant puis de la roue arrière. Comme le chauffeur était concentré sur le passage de sa roue arrière, cette dernière sollicitait précisément les capteurs alors que la roue avant passait de manière plus aléatoire au droit des capteurs. Aussi, le second pic est plus pertinent pour toute analyse. De plus, et en tenant compte de la distance entre essieux de 3,24 m, la vitesse du camion se calcule facilement à partir du temps entre pics (Tab. 1), ce qui confirme que le chauffeur a suivi parfaitement la consigne de vitesse de 1 m/s.

Également, il apparaît clairement que les valeurs de déformation maximale observées via FBG2 sont proportionnelles à la charge (Tab. 1), confirmant l'excellente linéarité des capteurs.

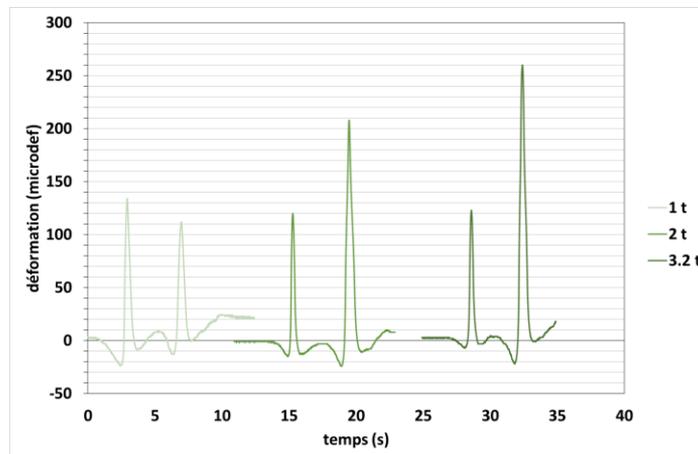


Figure 5. Signaux obtenus via le capteur FBG2 du premier géosynthétique intelligent lors du passage du camion à ~1 m/s pour les charges sous la roue jumelée arrière de 11,2, 21,2 et 27,2 kN

Tableau 1. Vitesses du camion et déformations max. observées par le capteur FBG2 du premier géosynthétique intelligent lors des différents passages du camion

charge (kN)	11,2	21,2	27,2
vitesse calculée (m/s)	0,94	0,90	1,00
déformation max sur FBG2 (μ def)	112	207	260

3.2. Résultats du chargement au FWD

Les signaux obtenus sur les différents capteurs lors de la sollicitation par FWD avec une charge de 78 kN sont illustrés sur la figure 6.

De manière prévisible, du fait de son positionnement au-dessus de la fibre neutre, il apparaît ainsi que le capteur FBG3 associé au géosynthétique intelligent renforçant, travaille essentiellement en compression, ce qui confirme le bon collage des couches.

Les signaux en fond de couches bitumineuses, obtenus soit via la jauge conventionnelle SG1, soit via le capteur FBG1 du premier géosynthétique intelligent, montrent en revanche une sollicitation essentiellement en traction, avec une phase de compression de faible intensité après suppression de la charge (Fig. 6).

Les intensités maximales obtenues sur SG1 et FBG1 diffèrent (Tab. 2), suite à leur écartement de 24 cm et à leur taille réelle ; du fait de sa grande taille (env. 10 cm), SG1 moyenne la charge sur cette distance, alors que FBG1 mesure une déformation très localisée sur quelques millimètres. L'exploitation

sur la base d'un calcul élastique est présentée ci-après, à partir de l'ensemble de la cuvette de déformation correspondante enregistré pour les 9 points d'acquisition.

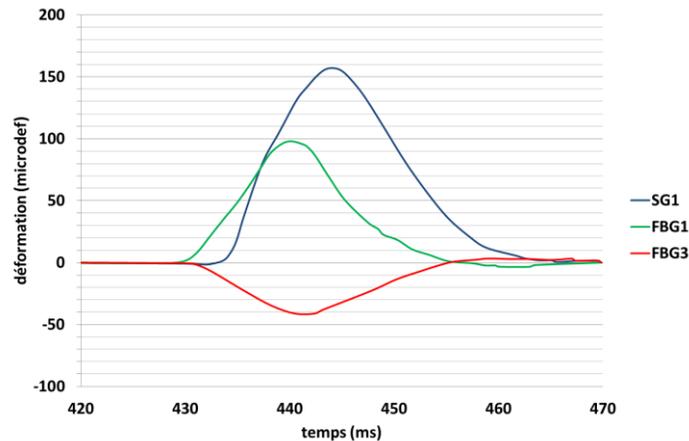


Figure 6. Signaux obtenus sur SG1, FBG1 et FBG3 lors du chargement de 78 kN au FWD

Tableau 2. Déformations max. mesurées et calculées par Alizé-LCPC lors de l'essai de chargement au FWD à 78 kN

capteur	SG1	FBG1
charge (kN)	78	78
fréquence de chargement (Hz)	30	30
déformation max mesurée (μ def)	158	98
déformation max calculée (μ def)	171	108

3.3. Déformations calculées

Afin de valider la pertinence des mesures, le logiciel de dimensionnement de chaussées Alizé-LCPC (2003) a été utilisé en mode de rétro-calcul, en documentant le champ de déformation observé avec le FWD. Le calcul est basé sur un modèle multi-couche permettant de déterminer le champ de contrainte et de déformation en tout point de la structure. Chaque couche d'épaisseur donnée, est considérée infinie en largeur et longueur, à l'exception toutefois du sol support décrit à l'aide d'une épaisseur infinie. Le calcul est élastique linéaire et nécessite donc de connaître le module en traction (module d'Young) et le coefficient de Poisson du matériau constituant chaque couche. De plus, les conditions de collage entre couche (collées ou non) sont renseignées de manière à préciser la transmission des contraintes et déformations aux interfaces. Pour la description de l'essai FWD, la charge de 78 kN (Tableau 2) est répartie uniformément sur la surface de contact circulaire de 30 cm de diamètre.

De manière à reproduire les signaux observés expérimentalement sur la structure dans les conditions de l'essai (7°C, 30 Hz), les propriétés suivantes ont été renseignées :

- Fondation infinie (dalle béton) de 100 000 MPa,
- 140 cm de sol de module d'Young de 30 MPa,
- 30 cm de GNT de module d'Young de 366 MPa,
- 9 cm de GB avec module d'Young d'environ 16 000 MPa, pris comme un paramètre ajustable,
- 5 cm de BBSG avec module d'Young de 6 018 MPa, valeur obtenue d'après la courbe maîtresse tracée à partir des mesures de module complexe.

Un coefficient de Poisson de 0,35 a été pris pour l'ensemble des couches, considérées comme collées (Fig. 7).

Du fait que la couche dimensionnante est la GB, c'est son module qui est particulièrement critique et qui sert donc de paramètre ajustable. Le graphique de la figure 7 illustre que le maximum de déflexion calculé pour un module de GB de 16 390 MPa, est en excellente concordance avec celui observé expérimentalement pour chacun des capteurs une fois prise en compte leur position relative par rapport à la charge (Fig. 6). Les valeurs des maxima sont reprises dans le tableau 2.

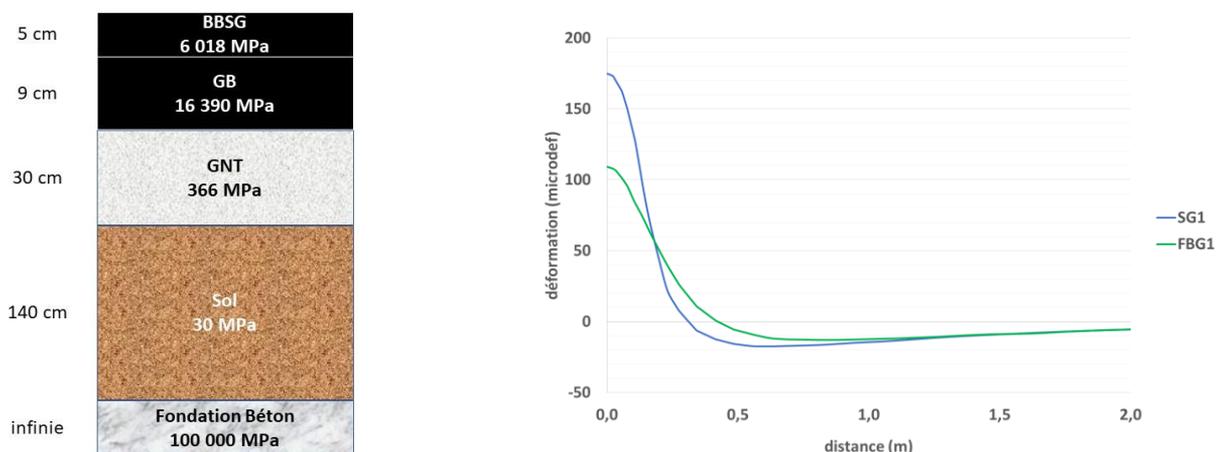


Figure 7. Paramètres choisis pour le rétro-calcul sous Alizé-LCPC (gauche) et résultats obtenus (droite)

Afin de comparer la valeur de module de la GB rétro-calculée avec les données mesurées, la courbe maîtresse obtenue expérimentalement à une température de référence de 7°C est donnée sur la figure 8. Comme on peut le constater sur cette figure, la valeur obtenue pour 30 Hz, correspondant aux essais de chargement FWD, est de 16 200 MPa, en excellent accord avec la valeur de 16 390 MPa obtenue par le rétro-calcul sur la base des déformations mesurées (Fig. 7).

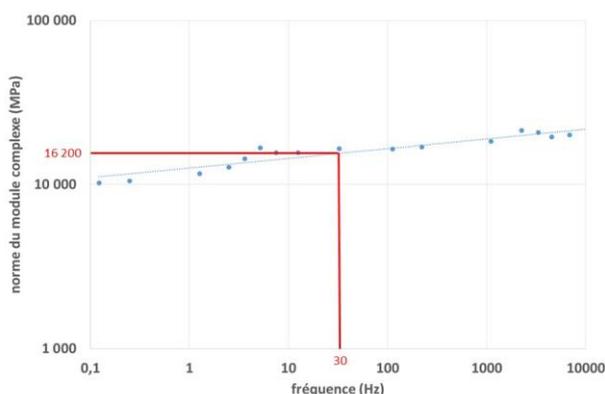


Figure 8. Courbe maîtresse à 7°C pour le module complexe de la GB en fonction de la fréquence

4. Conclusions

L'application de nouveaux géosynthétiques de renforcement intelligents, sur la dalle d'essai en vraie grandeur de l'Université de Limoges, a été présentée. Ils sont obtenus en intégrant dans le textile, une ou plusieurs fibres optiques. L'intégration se faisant lors du procédé de fabrication, cela permet d'obtenir une solidarisation parfaite entre la fibre et le géosynthétique, rendant possible de mesurer les déformations d'une structure contenant le produit, sans risque de glissement.

Une planche expérimentale composée notamment d'une couche de 9 cm de Grave Bitume (GB) recouverte d'une couche de Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG) de 5 cm, a permis de valider l'intérêt de ces géosynthétiques intelligents, renforçant ou non, pour les chaussées bitumineuses. Les déformations obtenues sous divers chargements ont été présentées en comparaison avec des jauges de déformation conventionnelle et des calculs de structure. Une excellente correspondance est obtenue.

Ainsi, il apparaît que ces nouveaux systèmes de mesure permettent par exemple de suivre des vitesses de trafic ou des déformations liées à des charges statiques ou dynamiques. Ils donnent des informations cohérentes avec celles obtenues via des jauges de déformation conventionnelles ou par le calcul. Cela démontre la fiabilité de la méthode qui ouvre la voie à des chaussées intelligentes de nouvelle génération aux déformations suivies en continu, permettant d'optimiser la politique d'entretien et les programmes de maintenance. Cela permet également d'envisager des systèmes de pesage en

continu sous trafic (weigh-in-motion - WIM), faciles à mettre en place à la construction ou lors d'une étape de maintenance (réfection des couches de roulement).

5. Références bibliographiques

- Alizé-LCPC (2003). Version 1.3.0, *Itech: Paris (France)*
- Caussignac J.M., Larcher S., Rougier J.C. (1998). Weigh-in-motion using optical fibre technology. *Proc. 2nd European Conf. on Weigh-in-Motion of road vehicles, Lisbon (Portugal)*.
- Chapeleau X., Blanc J., Hornych P., Gautier J.L., Carroget J. (2014). Use of distributed fiber optic sensors to detect damage in a pavement. *Proc. EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Nantes (France)*.
- Doré G., Duplain G., Pierre P. (2007). Monitoring mechanical response of in service pavements using retrofitted fiber optic sensors. *Proc. International Conference on the Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, Loizos Scarpas and Al-Qadi (Editors). Athens (Greece), pp. 883–891*
- Huckert A., Garcin P., Villard P., Briançon L., Auray G. (2014) Experimental and numerical approaches of the design of geotextile-reinforced embankments prone to sinkholes. *Proc. 10th Int. Conf. on Géosynthétiques, Vol. 21*.
- Huckert A., Reynaud S., Villard P., Auray G. (2015) Experimental and analytical approaches of the design of geosynthetics-reinforced load transfer platforms over rigid inclusions. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, pp. 1439-1444*.
- NF EN 13108-1, Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux - Partie 1 : enrobés bitumineux, *AFNOR : Paris (France)*
- NF EN 13-285. Graves non traitées – Spécifications, *AFNOR : Paris (France)*
- Wang J. N., Tang J. L. (2008). Optical fiber grating-based sensing system for use in pavement health monitoring. In *Proc. SPIE (Intl. Soc. for Optics and Photonics) 6932, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, paper 69323Z*.