
Etude du renforcement des chaussées à l'aide de grilles en fibre de verre

Arsenie Ioana Maria¹²

¹ *Laboratoire de sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie (ICUBE, UMR 7357), INSA de Strasbourg,*

ioanamarie.arsenie@insa-strasbourg.fr

² *EPSILON Ingénierie, Parc de Ruissel – Avenue de Lossburg, 69480 ANSE*

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. L'objectif de ce travail est de caractériser le rôle de renforcement de la couche de surface en béton bitumineux d'une structure de chaussée soumise à des sollicitations de fatigue au moyen d'une grille en fibre de verre ou « géo-grille ». Le comportement en fatigue du composite formé de béton bitumineux et géo-grille est étudié en laboratoire par des essais de flexion en quatre points (4PB), pilotés en déformation avec un chargement sinusoïdal alterné, à 10°C et 25Hz. Les éprouvettes testées sont des poutres prismatiques 100 x 100 x 630 mm³ de deux types: en béton bitumineux (témoins) et en béton bitumineux renforcé par géo-grille (renforcées). Les résultats expérimentaux ont été utilisés dans la modélisation de l'évolution de l'endommagement en fatigue de deux types d'éprouvettes. Les lois d'endommagement des matériaux sont implantées dans le code aux éléments finis CAST3M.

ABSTRACT. The objective of this study is to characterize the reinforcement role of the asphalt surface layer of a pavement subjected to fatigue loading with the glass fibre grid or « geo-grid ». The fatigue behaviour of the composite formed of asphalt mixture and geo-grid is studied in laboratory with four point bending tests (4PB) performed with sinusoidal waveform, at 10°C and 25Hz. The tested specimens are 100 x 100 x 630 mm³ beams of two types: asphalt beams (reference) and asphalt beams reinforced with geo-grid (composite). The experimental results were used for the modelling of the damage evolution under fatigue loading of the both types of beams. The damage laws of the materials are programmed in Cast3M finite element code.

MOTS-CLÉS : fatigue, endommagement, béton bitumineux, géo-grille, flexion en quatre points, éléments finis.

KEY WORDS: fatigue, damage, asphalt mixture, geo-grid, four point bending test, finite elements.

1. Introduction

Les matériaux et les techniques de construction utilisés dans le domaine des infrastructures routières évoluent pour pouvoir répondre aux nouvelles conditions de circulation, à la conception des chaussées, à la politique de l'entretien et aux conditions économiques. Aujourd'hui, le résultat de cette évolution est l'utilisation de deux à plusieurs matériaux qui complètent leurs qualités pour former un matériau aux performances globales améliorées appelé « matériau composite ».

La grille en fibre de verre appelée « géo-grille » et le béton bitumineux de la couche de surface d'une chaussée forment un matériau composite employé depuis les années 1990 comme méthode pour retarder l'apparition et la propagation des fissures de fatigue. La géo-grille est mise en place à la base de la couche de surface bitumineuse sur un support plan (la couche d'assise bitumineuse ou bien une couche d'accrochage granulaire) auquel elle est collée à l'aide d'une émulsion de bitume résiduel. Le collage est essentiel pour le bon comportement du composite.

Le comportement du composite est complexe et a fait l'objet de différentes études en laboratoire [AGO 07] [BAC 09] [VIR 08] et in situ [KER 10] qui ont montré une augmentation significative de la durée de vie du béton bitumineux apporté par l'utilisation de la géo-grille.

Ce travail vise à caractériser le rôle de renforcement de la couche de béton bitumineux par une géo-grille. Il est mené au travers une campagne expérimentale d'essai de fatigue et de modélisations aux éléments finis.

2. Matériaux testés

2.1 Béton bitumineux semi-grenu

La formule testée est un béton bitumineux semi-grenu de granularité de 0 à 10 mm de type BBSG 0/10 d'après la classification [EN 06]. Il est caractérisé par un module de rigidité de 9 GPa obtenu lors des essais de flexion en quatre points à 15°C et 10Hz.

Formule BBSG

40,68%	0/4
9,46%	4/6
42,58%	6/10
1,89%	filler
5,39%	bitume 35/50

Compacité : 92,5%

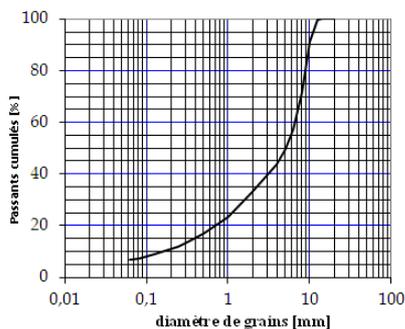


Figure 1. Formule et courbe granulométrique du BBSG 0/10 [ARS 12].

2.2 Grille en fibre de verre

La géo-grille testée est la grille en fibre de verre enduite CIDEX 100 SB de 6D Solutions. Ce matériau élastique est caractérisé par un module de Young d'environ 44 GPa, une résistance à la rupture en traction de 100 kN/m et une résistance de 35 kN/m à 1% d'allongement.

Le grillage carré de mailles de 40 x 40 mm², résulte de l'assemblage de plusieurs matériaux, dont trois composants principaux : des réseaux en fibre de verre de type « chaîne » et de type « trame » et un voile non-tissé en fibre de polyester.

GRILLE CIDEX 100 SB

Grille: Fibre de verre + résine SB: 383 g/m²

Fibre de polyester: 17 g/m²

Resistance à la rupture: 100 KN/m

Resistance à 1% déformation: 35 KN/m

Bitume résiduel pour collage: 600 g/m²



a)

b)

Figure 2. a Caractéristiques de CIDEX 100 SB. b. Exemple de mise en œuvre.

2.3 Epreuves testées

Les éprouvettes testées sont des poutres prismatiques de dimensions 630 x 100 x 100 mm³, obtenues par le sciage de plaques fabriquées en trois couches de 50 mm épaisseur chacune. Les éprouvettes sont de deux types : en béton bitumineux appelées « témoins » et en béton bitumineux renforcé par des grilles en fibre de verre appelées « renforcées ».

Les plaques témoins sont fabriquées par le collage de couches en béton bitumineux à l'aide de l'émulsion à base de 300 g/m² de bitume résiduel répandue à l'interface entre deux couches. Les éprouvettes témoins ont la structure : 25 mm BBSG + émulsion + 50 mm BBSG + émulsion + 25 mm BBSG.

Les plaques renforcées sont fabriquées par le collage d'une géo-grille à l'interface entre deux couches bitumineuses à l'aide de l'émulsion à base de 600 g/m² de bitume. Les éprouvettes renforcées ont la structure : 25 mm BBSG + émulsion et grille CIDEX 100SB + 50 mm BBSG + émulsion et grille CIDEX 100SB + 25 mm BBSG.

3. Plan expérimental

Le plan expérimental comprend 24 essais de fatigue en flexion en quatre points (4PB) sur 12 poutres bitumineuses témoins et 12 poutres bitumineuses renforcées.

Les essais de fatigue ont été effectués à 10° C et 25 Hz, d'après les spécifications [EN 12]. Les amplitudes de déformation testées sont de 135 $\mu\text{m/m}$ et 150 $\mu\text{m/m}$.

3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif d'essais de la figure 3 est un banc de fatigue 4PB à grandes dimensions, spécialement conçu pour tester les poutres renforcées.

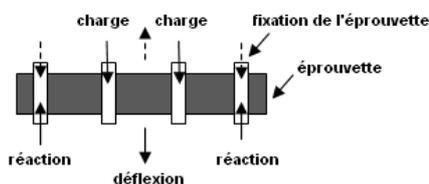


Figure 3. Banc de fatigue 4PB à Epsilon. **Figure 4.** Principe de l'essai 4PB.

3.2 Essais de flexion en quatre points 4PB

3.2.1. Principe de l'essai 4PB

Des essais de fatigue pilotés en déformation (déplacement constant) avec une onde sinusoïdale ont été effectués à l'aide du banc de flexion 4PB. Dans la configuration représentée schématiquement dans la figure 4, la poutre est fléchie d'une manière alternée dans son plan. Les rotations et les translations horizontales dans les 4 points sont libres. Le déplacement vertical est bloqué. La déflexion de la poutre est mesurée avec un capteur de type « linear variable differential transducer » (LVDT). La réponse du matériau et l'angle de phase sont mesurés tout au long de l'essai.

3.2.2. Résultats des essais 4PB sur les poutres en béton bitumineux témoins et renforcées

Les résultats des essais 4PB sont présentés en terme de durée de vie en fatigue [EN 12] dans le tableau 1. Les courbes moyennes d'évolution d'endommagement en fatigue (E/E_i) des poutres bitumineuses témoins (T) et renforcées (R) sont présentées dans la figure 6. D'après les résultats d'essais, l'augmentation en durée de vie apportée par la grille est plus significative quand la durée de vie de l'éprouvette est importante, respectivement le niveau de chargement est faible.

ε $\mu\text{m/m}$	Durée de vie Nf [cycles] à				Augmentation %	
	E/Ei = 0,5		E/Ei = 0,3		(NfR-NfT)x100/NfT	
	NfT	NfR	NfT	NfR	E/Ei = 0,5	E/Ei = 0,3
135	414752	738861	511319	830339	78.15%	62.39%
150	257824	369943	276227	448011	43.49%	62.19%

Tableau 1. Durée de vie moyenne (sur 6 éprouvettes) des poutres T et R et augmentation apportée par la géo-grille.

La valeur de déformation ε_e estimée par les résultats expérimentaux est de 111 $\mu\text{m/m}$ pour les poutres témoins et de 128.5 $\mu\text{m/m}$ pour les poutres renforcées.

4. Modélisation

4.1 Modèle d'endommagement de D. Bodin

Le modèle de D.Bodin [BOD 02] est un modèle d'endommagement non-local de prédiction de la fissuration de fatigue des enrobés bitumineux. Le modèle, implémenté dans le code aux éléments finis Cast3M, a été testé dans ce travail pour la modélisation de l'endommagement en fatigue des poutres bitumineuses témoins et renforcées.

Dans le modèle de Bodin, la variable d'endommagement est introduite comme un scalaire dans l'équation [1]:

$$\sigma_{ij} = (1 - D) \cdot C_{ijkl}^O \cdot \varepsilon_{kl} \quad [1]$$

Où : σ_{ij} est le tenseur des contraintes,

ε_{kl} est le tenseur des déformations,

C_{ijkl}^O est la matrice d'élasticité,

D est la variable d'endommagement avec $0 \leq D \leq 1$.

L'évolution en trois phases de l'endommagement pendant l'essai de fatigue est décrite par l'équation [2]:

$$\dot{D} = f(D) \cdot \bar{\varepsilon}^\beta \cdot \langle \dot{\bar{\varepsilon}} \rangle \quad [2]$$

dans laquelle $f(D)$ est exprimé par l'équation [3]:

$$f(D) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 \cdot \alpha_3} \cdot \left(\frac{D}{\alpha_2} \right)^{1-\alpha_3} \cdot \exp\left(\frac{D}{\alpha_2} \right)^{\alpha_3} \quad [3]$$

et $\bar{\varepsilon}$ est calculé à l'aide de l'équation [4]:

$$\bar{\varepsilon}(x) = \frac{1}{V_r(x)} \cdot \int_{\Omega} \psi(x-s) \cdot \tilde{\varepsilon}(s) \cdot ds \quad [4]$$

dans laquelle, $V_r(x)$ et $\tilde{\varepsilon}$ sont calculés à l'aide des équation [5] et [6]:

$$V_r(x) = \int_{\Omega} \psi(x-s) \cdot ds \quad [5] \quad \text{et} \quad \tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\langle \sigma_i \rangle}{E \cdot (1-D)} \right)^2} \quad [6]$$

Où:

$\bar{\varepsilon}$: déformation équivalente moyenne,

$\langle \dot{\bar{\varepsilon}} \rangle$: taux d'accroissement de la déformation équivalente moyenne.

β : paramètre lié à la pente p de la droite de fatigue en coordonnées log – log, respectivement $p = -(\beta + 1)$,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: paramètres d'endommagement,

$V_r(x)$: volume représentative au point de coordonnée x ,

Ω : volume concerné,

$\psi(x-s)$: fonction poids,

s : variable relative d'espace à partir du point de coordonnée x ,

$\tilde{\varepsilon}$: déformation équivalente,

$\langle \sigma_i \rangle$: tenseur de contraintes principales positives,

E : module complexe (10° C; 25 Hz).

4.2 Modélisation de l'endommagement des poutres bitumineuses témoins et renforcées

L'hypothèse de contraintes planes et la symétrie géométrique ont permis de modéliser la moitié de la poutre avec les conditions aux limites associées comme dans la figure 5. Les éléments utilisés pour la modélisation sont des éléments plans triangulaires à trois nœuds.

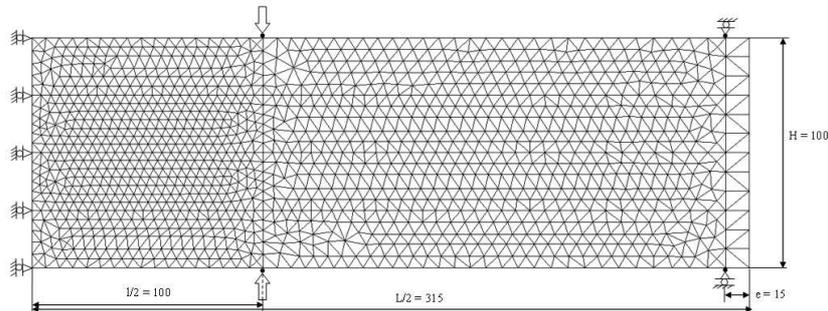


Figure 5. Géométrie et conditions aux limites du modèle de demi-poutre en 4PB.

L'identification des paramètres α_i a été effectuée pour le niveau de chargement de 135 $\mu\text{m/m}$ par le calage des courbes de modélisation $\text{MT}_{e=135}$ et $\text{MR}_{e=135}$ sur les courbes des valeurs moyennes expérimentales $T_{e=135}$ et $R_{e=135}$, présentées dans la figure 6. Les paramètres ainsi déterminés sont : $T(\alpha_1 = 5.5 \cdot 10^{-14}$, $\alpha_2 = 0.5$ et $\alpha_3 = 1.75)$ et $R(\alpha_1 = 2.05 \cdot 10^{-13}$, $\alpha_2 = 0.95$ et $\alpha_3 = 1.85)$. La pente de fatigue du BBSG 0/10 obtenue expérimentalement est de 4,6. A l'aide de ces paramètres, l'évolution de l'endommagement des poutres témoins et renforcées a été simulé à 150 $\mu\text{m/m}$ avec l'obtention des courbes $\text{MT}_{e=150}$ et $\text{MR}_{e=150}$. Les résultats de modélisation sont présentés en termes de durée de vie en fatigue dans le tableau 2.

La valeur de déformation ϵ_6 estimée par le modèle est de 111 $\mu\text{m/m}$ pour les poutres témoins et de 127 $\mu\text{m/m}$ pour les poutres renforcées.

ϵ $\mu\text{m/m}$	Durée de vie Nf [cycles] à				Augmentation %	
	E/Ei = 0,5		E/Ei = 0,3		(NfMR-NfMT)x100/NfMT	
	NfMT	NfMR	NfMT	NfMR	E/Ei = 0,5	E/Ei = 0,3
135	410000	734000	480000	870000	79.02%	81.25%
150	252000	451000	294000	530000	78.97%	80.27%

Tableau 2. Durée de vie estimée des poutres T et R par le modèle de Bodin et augmentation apportée par la géo-grille.

5. Analyse et comparaison des résultats expérimentaux vs. modélisation

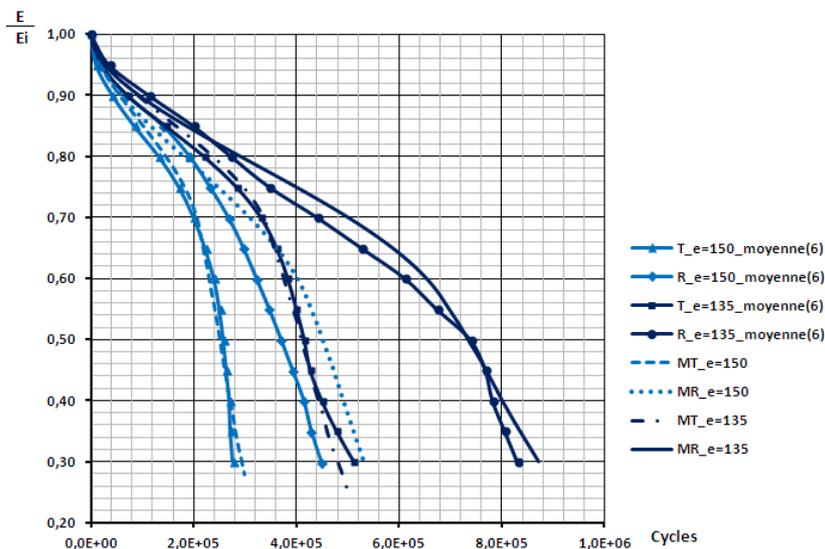


Figure 6. Evolution de l'endommagement (E/Ei) des poutres bitumineuses T et R et des modèles MT et MR.

La comparaison des courbes expérimentales T avec les courbes de modélisation MT montre que le modèle de Bodin est approprié pour la prédiction de l'endommagement du béton bitumineux. La déformation ϵ_6 des poutres témoins (111 $\mu\text{m/m}$) est prédite avec une très bonne précision par le modèle (111 $\mu\text{m/m}$). La comparaison des courbes expérimentales R avec les courbes de modélisation MR montre qu'au niveau de sollicitation 150 $\mu\text{m/m}$ le modèle prédit la même augmentation en durée de vie de 79% due aux géo-grilles qu'au niveau 135 $\mu\text{m/m}$, ce qui est différent des résultats d'essais 4PB, où l'augmentation est distincte à chaque niveau. Toutefois, la déformation ϵ_6 des poutres renforcées (128.5 $\mu\text{m/m}$) est prédite avec une assez bonne précision par le modèle (127 $\mu\text{m/m}$).

6. Conclusions et perspectives

A l'aide du modèle de Bodin et l'identification des paramètres à 135 $\mu\text{m/m}$, nous avons simulé l'évolution de l'endommagement des poutres bitumineuses témoins et renforcées à 150 $\mu\text{m/m}$. La durée de vie des poutres témoins est prédite avec une bonne précision (79% contre 78.15%) et celle des poutres renforcées est surestimée (78.97% contre 43.49%). Le développement du modèle de prédiction monocouche vers un modèle multicouche pour la poutre bitumineuse renforcée est en cours.

7. Bibliographie

[EN 12] EN 12697-24, *Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Résistance à la fatigue*, 2012.

[EN 06] EN 13108-1, *Spécification des matériaux Partie 1. Enrobés bitumineux*, 2006.

[ARS 12] ARSENIE, I.M., CHAZALLON, C., DUCHEZ, J.L., DOLIGEZ, D., THEMELI, A., Modélisation du comportement en fatigue d'un béton bitumineux renforcée par géo-grille, *Actes de XXX^{èmes} rencontres de l'AUGC-IBPSA*, Chambéry, 6-8 juin 2012, p.240 – 249.

[AGO 07] AGOSTINACCHIO, M., FIORI, F., A finite element model to evaluate the role of interlayer fiberglass geogrids in retarding reflective cracking in flexible pavements, Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44882-6, 2007, p. 1393-1401.

[BAC 09] BACCHI, M., Analysis of the variation in fatigue life through four-point bending test, Proceedings of the 2nd Workshop on Four Point Bending, Pais (Ed.), Université de Minho, Portugal. ISBN 978-972-8692-42-1, 2009, p. 205-215.

[BOD 02] BODIN, D., PIJAUDIER-CABOT, G., DE LA ROCHE, C., PIAU, J.M., CHABOT, A., Continuum damage approach to asphalt concrete fatigue modeling. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 130, n. 6, 2002, p. 700-708.

[KER 10] KERZREHO, J-P., MICHAUT, J-P., HORNYCH, P., Enrobé armé de grille en fibre de verre, dans le cadre du projet FORMAT, RGRA N°890, 2010, p. 48-51.

[VIR 08] VIRGILI, A., CANESTRARI, F., GRILLI, A., SANTAGATA, F.A., Repeated load test on bituminous systems reinforced by geosynthetics, Geotextiles and Geomembranes, Elsevier Ltd. 2008, p.187-195.