

# **CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DE L'ENDOMMAGEMENT EN FATIGUE D'UN BÉTON BITUMINEUX RENFORCÉ À L'AIDE DE GÉO-GRILLES**

## **EXPERIMENTAL CHARACTERISATION OF THE FATIGUE DAMAGE OF A GEOGRID REINFORCED ASPHALT CONCRETE**

---

**Ioana ARSENIE<sup>1</sup>, Cyrille CHAZALLON<sup>1</sup>, Jean-Louis DUCHEZ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ICUBE, UMR 7357, INSA de Strasbourg, 24 boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg  
cyrille.chazallon@insa-strasbourg.fr

<sup>2</sup> Epsilon Ingénierie, Parc de Ruissel - Avenue de Lossburg, 69480 Anse

---

### **1. INTRODUCTION**

Les sollicitations dues aux chargements du trafic et aux conditions climatiques représentent les causes principales de détérioration des chaussées. Les principaux modes de détérioration sont l'orniérage et la fissuration par fatigue de la couverture bitumineuse. La fissuration par fatigue est une dégradation majeure qui touche l'ensemble des structures de chaussées avec différentes origines et différents mécanismes de développement. Elle est à la base d'une accélération des dégradations propres à chaque type de chaussée par la diminution de la portance du support lors de l'infiltration d'eau et par la perte des conditions mécaniques nécessaires au maintien de la résistance des matériaux.

Les grilles en fibre de verre enduite appelées géo-grilles sont généralement utilisées dans la réhabilitation des chaussées fissurées, comme complexes anti-fissures [NGU 11]. Néanmoins, les géo-grilles peuvent également être employées dans les structures des chaussées neuves. Leur rôle est de retarder la propagation des fissures de fatigue et ainsi d'augmenter la durée de service de la chaussée. Ce rôle a été montré par plusieurs études, parmi lesquelles les études in situ conduites en France à l'IFFSTAR [KER 11] et en Italie [PAS 12] et les études de laboratoire [AGO 07][BAC 09][FER 11][ARS 12][ARS 13][CHA 13].

Généralement, dans le cas de réhabilitation des chaussées, les géo-grilles se trouvent à la base de la nouvelle couche bitumineuse, à l'endroit où les efforts de traction sont significatifs.

Le comportement en fatigue d'un matériau bitumineux est caractérisé par la droite de fatigue du matériau, obtenue lors de 18 essais de fatigue, effectués dans des conditions précises. Les conditions recommandées par la norme européenne de résistance à la fatigue [EN 12] sont : onde sinusoïdale, température  $T = 10^{\circ}\text{C}$  et fréquence  $f = 25\text{Hz}$ . Cinq types d'essais peuvent être employés, respectivement : les essais de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales (2PB-TR) et prismatiques (2PB-PR), les essais de flexion en trois points (3PB-PR) et en quatre points (4PB-PR) sur des éprouvettes prismatiques, l'essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques (ITT-CY). Un autre type d'essai de fatigue, qui n'est pas normalisé, est l'essai de traction-compression sur des éprouvettes cylindriques (T/C-CY) [DIB 04].

La méthode française de dimensionnement de chaussées [NF 11] s'appuie sur l'étude de la durée de vie en fatigue conventionnelle  $N_f$ , correspondant au nombre de cycles nécessaires pour atteindre la moitié du module de rigidité initial du matériau ou  $E/E_i = 0.5$ . La déformation de dimensionnement  $\varepsilon_o$  conduisant à une durée de vie en fatigue de 1 million des cycles, est employée dans le calcul de la déformation en traction à la base de la couche bitumineuse. Sa valeur est déterminée à partir des essais de fatigues effectués à  $10^{\circ}\text{C}$  avec 25Hz. Lors du calcul de dimensionnement, la déformation calculée à la base des couches bitumineuses est comparée à la déformation admissible.

Dans ce travail, nous avons caractérisé le comportement en fatigue d'un béton bitumineux (NR) et celui du composite (R) formé de béton bitumineux et deux géo-grilles. Trente-huit essais de fatigue alternée en flexion quatre points (4PB) ont été effectués (18 essais NR et 20 essais R), conformément à l'Annexe D de la norme européenne de résistance à la fatigue. Les essais de fatigue sont complexes et dans le cas de fréquences élevées comme 25Hz il y a le risque d'endommagement du matériel en fin d'essais. Pour cette raison, la plupart des essais de ce travail ont été arrêtés quand le rapport de rigidité a atteint la valeur 0.3 ( $E/E_i = 0.3$ ).

La comparaison des courbes moyennes d'endommagement en fatigue NR et R, à chaque niveau de déformation testé, a permis d'observer le rôle du renforcement et d'estimer une efficacité moyenne. Ce rôle a été confirmé par la comparaison des droites de fatigue des matériaux. La droite de fatigue permet d'estimer les durées de vie en fatigue quand le rapport de rigidité a atteint la valeur 0.5 ( $E/E_i = 0.5$ ).

## 2. MATÉRIAUX

### 2.1. Béton bitumineux

Le matériau testé est un béton bitumineux semi-grenu classique de granularité 0/10 mm de type BBSG 0/10 classe III, d'après la classification européenne [EN 06]. Le mélange bitumineux (figure 1) est composé de : 40.68% d'agrégats 0/4 mm, 9.46% d'agrégats 4/6 mm, 42.58%

d'agrégats 6/10 mm, 1.89% de filler et 5.39% de bitume 35/50 après [EN 09].

Le matériau a un module d'élasticité de 9 GPa, obtenu lors des essais de rigidité en flexion quatre points à  $T = 15^{\circ}\text{C}$  et  $f = 10\text{Hz}$ , conformément à la norme européenne EN 12697-26.

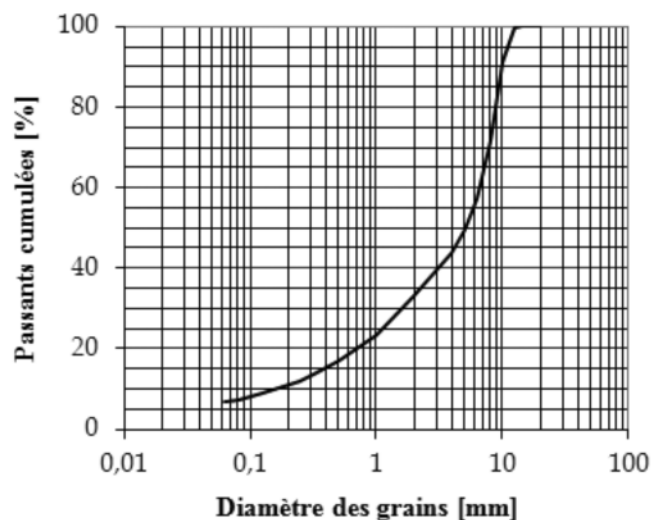


Figure 1. Courbe granulométrique du BBSG 0/10 classe III [ARS 13]

### 2.1. Grille en fibre de verre

La géo-grille testée est la grille en fibre de verre enduite Cidex 100SB de la société 6D Solutions, présentée dans la figure 2. Elle est composée de réseaux de fils en fibre de verre de type chaîne et trame et d'un voile en polyester non-tissé, collé en dessous des réseaux. Les mailles du grillage ont une géométrie carrée de dimensions 40 x 40 mm<sup>2</sup>. Le module de rigidité moyen de la géo-grille a été déterminé à l'aide de trois méthodes [THE, 11]. Il est estimé à 44 GPa.

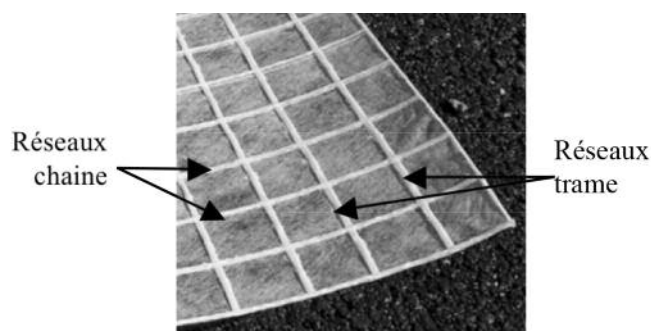
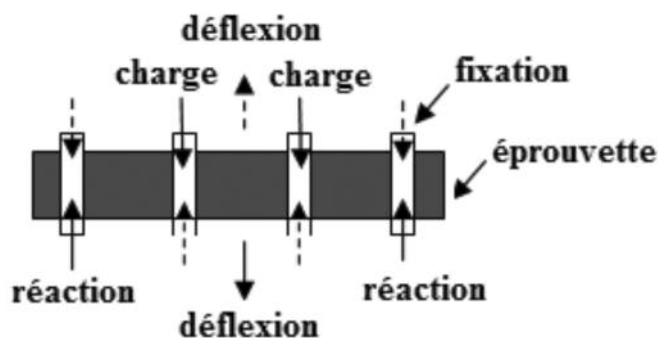


Figure 2. Géo-grille Cidex 100 SB. Géométrie et composition.

## 3. PRINCIPE DE L'ESSAI DE FATIGUE ALTERNÉE 4PB

Le principe de l'essai de fatigue alternée 4PB est schématisé figure 3. Pour cet article les essais ont été pilotés en

déformation, ainsi le déplacement maximum est constant. La poutre est fléchie d'une manière alternée dans son plan selon une onde sinusoïdale. Les rotations et les translations horizontales aux 4 points de contact sont libres. La déflexion de la poutre est mesurée avec un capteur de type « linear variable differential transducer » (LVDT). La force de réponse du matériau et l'angle de phase sont mesurés tout au long de l'essai.



**Figure 3. Principe de l'essai de fatigue alternée en flexion en quatre points.**

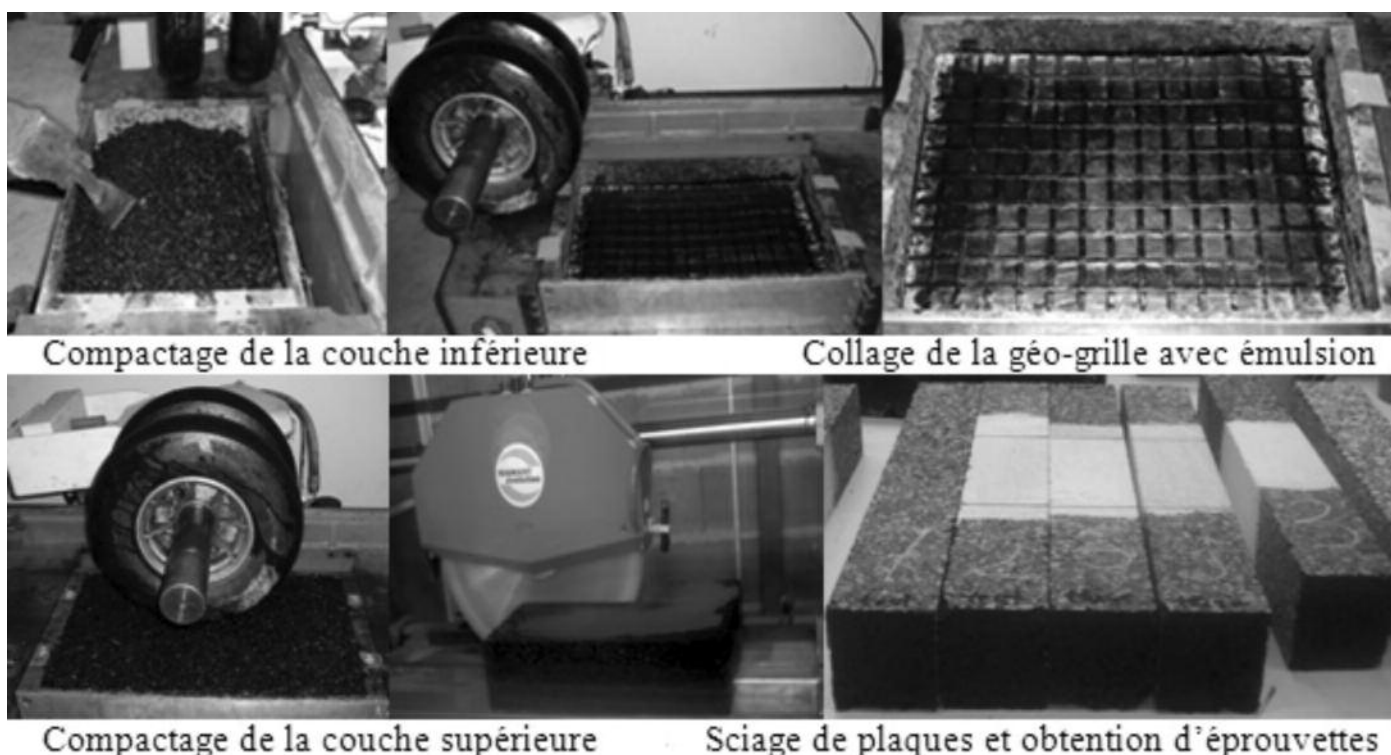
Les essais de fatigue sont effectués au minimum à trois niveaux de déformations différents, avec un minimum de six répétitions par niveau. Les niveaux de déformations testés sont définis en fonction du matériau, pour obtenir des durées de vie en fatigue entre  $10^4$  et  $10^6$  cycles pour au minimum 2 niveaux et entre  $10^6$  et  $10^7$  cycles pour au moins un niveau de déformation [EN 12].

## 4. ESSAIS DE FATIGUE 4PB

### 4.1. Fabrication des éprouvettes

Deux types d'éprouvettes ont été fabriqués dans le laboratoire, respectivement : 18 éprouvettes en béton bitumineux non-renforcé (NR) et 20 éprouvettes en béton bitumineux renforcé (R). La fabrication comprend cinq étapes :

- Compactage de la première couche en béton bitumineux de 50 mm hauteur,
  - Collage de la première géo-grille à l'aide d'une couche d'accrochage en émulsion à base de bitume résiduel dans le cas des plaques R ou application d'une couche d'émulsion dans le cas des plaques NR,
  - Compactage de la deuxième couche en béton bitumineux de 50 mm hauteur,
  - Collage de la deuxième géo-grille avec une couche d'accrochage en émulsion à base de bitume résiduel dans le cas des plaques R ou application d'une couche d'émulsion dans le cas des plaques NR,
  - Compactage de la deuxième couche en béton bitumineux de 50 mm hauteur,
  - Démoulage de la plaque et collage de deux morceaux en béton bitumineux de chaque côté de la plaque de  $600 \times 400 \times 150 \text{ mm}^3$  afin d'obtenir une plaque de  $630 \times 400 \times 150 \text{ mm}^3$ .
  - Sciage de la plaque de  $630 \times 400 \times 150 \text{ mm}^3$  et obtention des trois poutres prismatiques de  $630 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ .
- L'émulsion de bitume résiduel utilisée pour la couche d'accrochage de la géo-grille pour les plaques renforcées, est fabriquée à base de  $600 \text{ g/m}^2$  de bitume résiduel. La couche



**Figure 4. Étapes et dispositifs de fabrication des plaques renforcées [ARS, 13]**

en émulsion de bitume répandue à l'interface entre deux couches en béton bitumineux des plaques non-renforcées est fabriquée à base de 300 g/m<sup>2</sup> de bitume résiduel.

## 4.2. Programme et dispositif d'essais

Avant l'essai, toutes les éprouvettes ont été conditionnées pendant 12 h dans l'enceinte climatique du dispositif d'essai (figure 5) à 10°C.

Pour chaque type d'éprouvette (NR et R), le programme expérimental est composée de :

- 6 essais de fatigue au niveau de déformation  $\epsilon = 150 \mu\text{m/m}$ ,
- 6 essais de fatigue au niveau de déformation  $\epsilon = 135 \mu\text{m/m}$ ,
- 6 essais de fatigue au niveau de déformation  $\epsilon$  compris dans l'intervalle (111 ;116)  $\mu\text{m/m}$  pour les éprouvettes NR
- 6 essais de fatigue au niveau de déformation  $\epsilon$  compris dans l'intervalle (126 ;129)  $\mu\text{m/m}$  et 2 essais supplémentaires à  $\epsilon = 115 \mu\text{m/m}$  pour les éprouvettes R.

## 4.3. Résultats des essais 4PB et interprétation

Les résultats des 38 essais de fatigue 4PB alternée sont groupés dans le tableau 1.

Les durées de vie en fatigue  $N_f$  ont été utilisées pour calculer la droite de fatigue de chaque matériau selon les équations [1] et [2] :

$$\ln N_{f,NR} = 38.927 - 5.293 \ln \epsilon \quad [1]$$

$$\ln N_{f,R} = 42.426 - 5.905 \ln \epsilon \quad [2]$$

où  $N_{f,R}$  est le nombre de cycles de chargement et  $\epsilon$  est l'amplitude de déformation.

La déformation de dimensionnement de chaque matériau résulte des équations [1][2] :  $\epsilon_{6,NR} = 115 \mu\text{m/m}$  et  $\epsilon_{6,R} = 127.1 \mu\text{m/m}$ , soit une augmentation de 10.52%.

La comparaison des droites de fatigue [1][2] montre que la pente de la droite de fatigue augmente de 11.56%, grâce à la présence des géo-grilles. Ces résultats sont importants pour la méthode française de dimensionnement de chaussées [NF 11].

Les figures 6 et 7 présentent les courbes d'endommagement en fatigue de type E/E<sub>i</sub>-N pour tous les niveaux de sollicitation testés pour chaque type de matériau testé. Trois courbes sont présentées à chaque niveau de sollicitation  $\epsilon$ , en se basant sur les durées de vie conventionnelles  $N_f$ , respectivement : la courbe minimale, la courbe maximale et la courbe moyenne, correspondantes à la valeur de  $N_f$  minimale, maximale, et à la moyenne des toutes les valeurs  $N_f$  des répétitions (éprouvettes testées au même niveau  $\epsilon$ ).

L'efficacité de la géo-grille a été calculée comme le rapport des durées de vie en fatigue moyennes du béton bitumineux NR et du béton bitumineux renforcé R, à chaque niveau de déformation testé (tableau 2). Les niveaux de déformation considérés (150, 135 et 115  $\mu\text{m/m}$ ) sont les niveaux communs entre NR et R.

Le rapport moyen expérimental  $N_{f,R}/N_{f,NR}$  sur les trois niveaux de déformation considérés est de 1,50, ce qui signifie que la géo-grille augmente la durée de vie en fatigue du béton bitumineux de 50%. Le rapport moyen  $N_{f,R}/N_{f,NR}$  calculé à partir des droites de fatigues [1][2] sur les

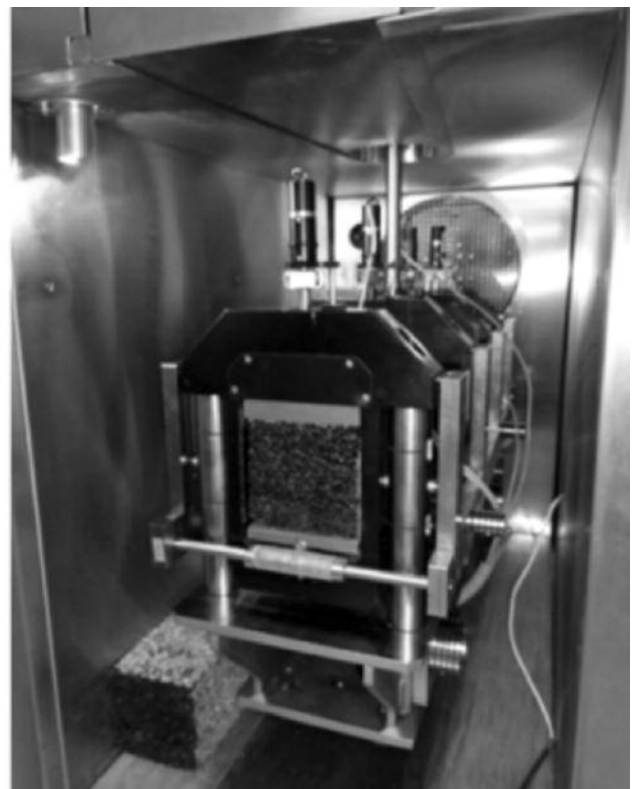
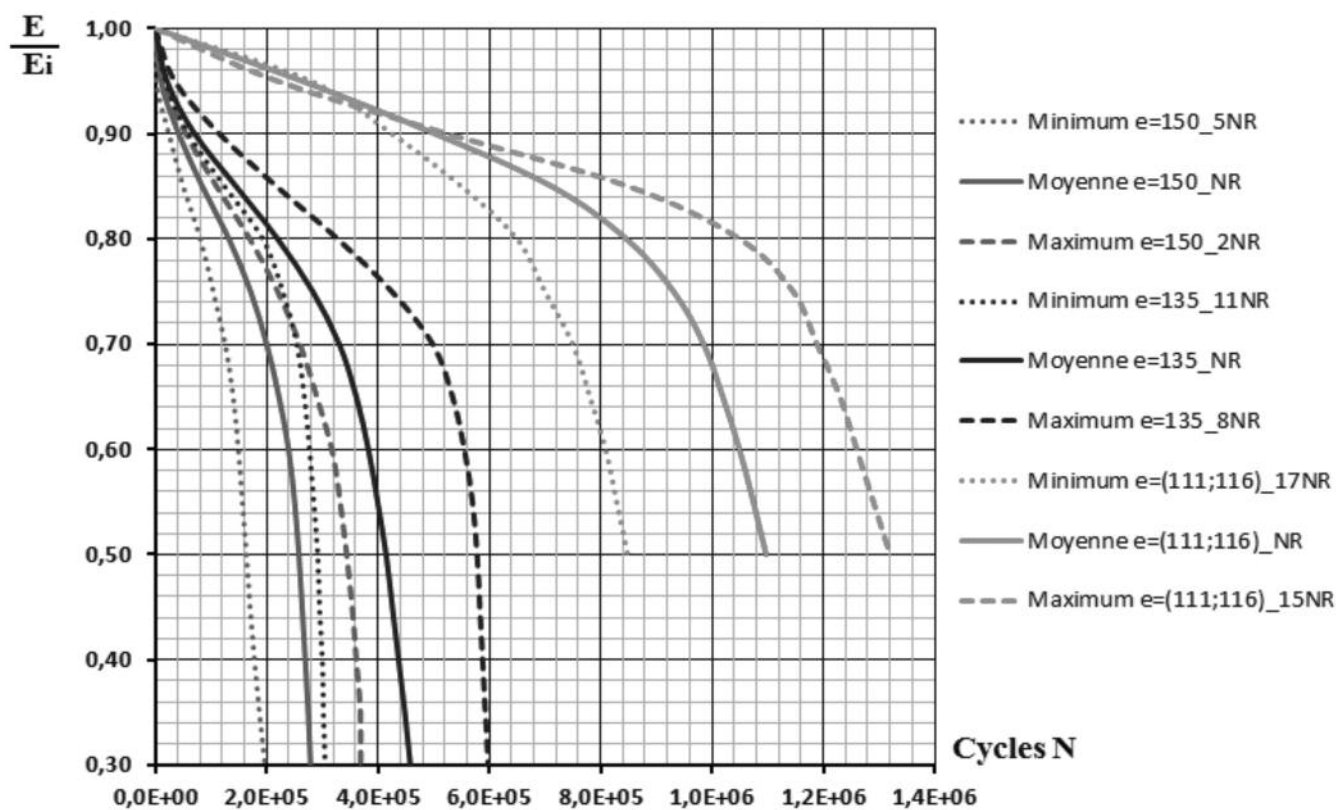


Figure 5. Banc de fatigue en flexion en quatre points et montage de l'éprouvette



$\varepsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	NR	$N_f$ [cycles]	$\varepsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	R	$N_f$ [cycles]
150	1NR	280 310	150	1R	371 981
	2NR	343 910		2R	324 392
	3NR	303 070		3R	367 590
	4NR	212 750		4R	339 990
	5NR	163 610		5R	407 852
	6NR	243 590		6R	313 640
Moyenne $N_{f, NR}$		257 873	Moyenne $N_{f, R}$		354 240
135	7NR	328 210	135	7R	817 200
	8NR	578 130		8R	868 210
	9NR	374 550		9R	636 640
	10NR	540 050		10R	685 650
	11NR	291 800		11R	643 584
	12NR	375 770		12R	695 210
Moyenne $N_{f, NR}$		414 752	Moyenne $N_{f, R}$		724 416
111	13NR	1 084 290	129	13R	1 166 121
	14NR	1 200 000		14R	925 560
	15NR	1 320 000		15R	948 960
116	16NR	1 094 338	126	16R	1 579 385
	17NR	848 710		17R	1 056 140
	18NR	1 036 400		18R	896 680
Moyenne $N_{f, NR}$		1 097 290	Moyenne $N_{f, R}$		1 095 474
			115	19R	1 253 020
				20R	1 618 310
			Moyenne $N_{f, R}$		1 435 665

**Tableau 1. Durées de vie en fatigue obtenues lors des 38 essais de fatigue 4PB**



**Figure 6. Courbes d'endommagement en fatigue du béton bitumineux NR : minimum, moyenne et maximum à  $\varepsilon = 150, 135$  et  $(111 ; 116) \mu\text{m}/\text{m}$**

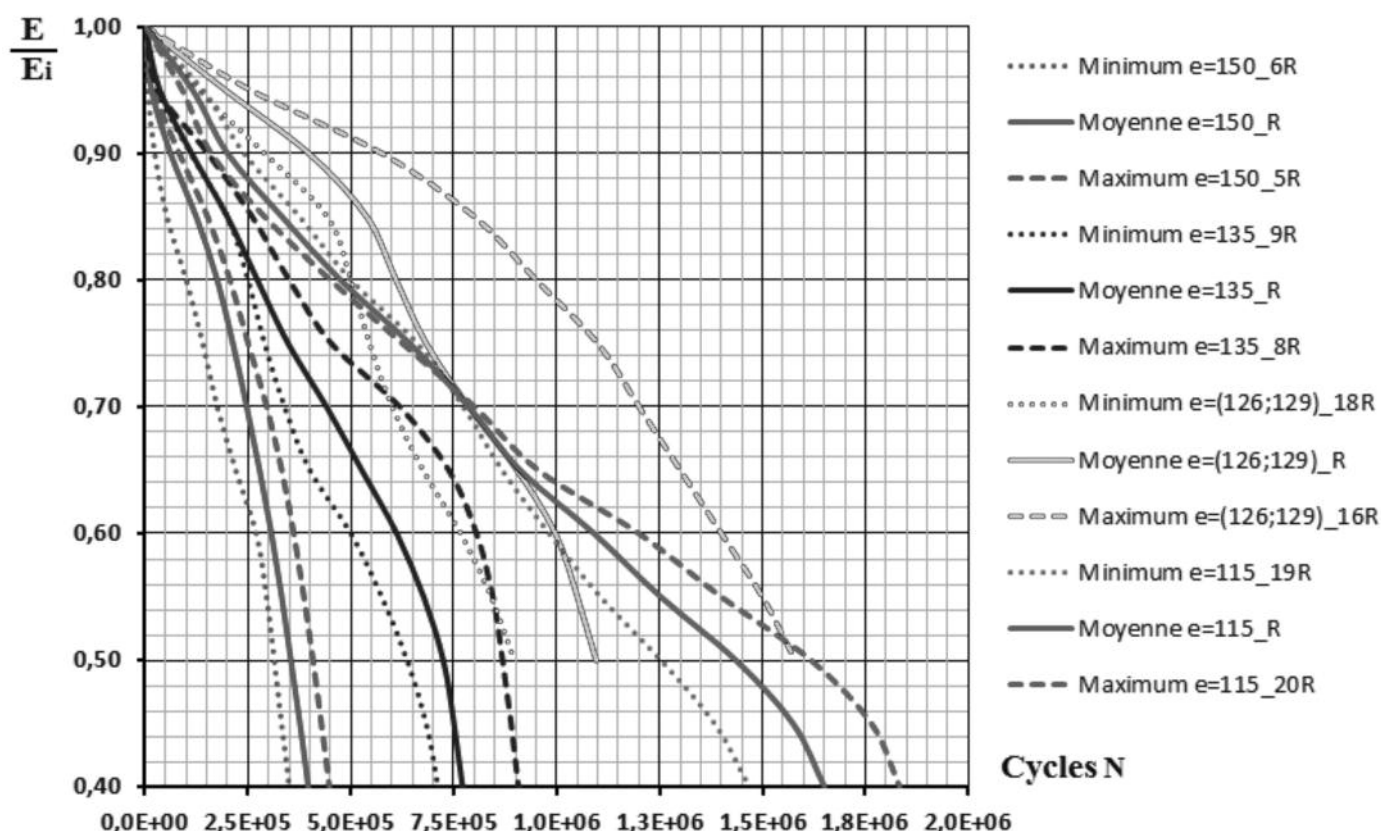


Figure 7. Courbes d'endommagement en fatigue du béton bitumineux renforcé par géo-grilles R: minimum, moyenne et maximum à  $\varepsilon = 150, 135, (126 ; 129), 115 \mu\text{m/m}$

$\varepsilon$	Résultats expérimentaux			Droites de fatigue		
$\mu\text{m/m}$	$N_{f,R}$	$N_{f,NR}$	$\frac{N_{f,R}}{N_{f,NR}}$	$N_{f,R}$	$N_{f,NR}$	$\frac{N_{f,R}}{N_{f,NR}}$
150	354 240 6 essais	257 873 6 essais	1.37	374 942 Eq. [2]	242 903 Eq. [1]	1.54
135	724 416 6 essais	414 752 6 essais	1.75	698 342 Eq. [2]	420 700 Eq. [1]	1.66
115	1 435 665 2 essais	1 034 805 6 essais	1.39	1 779 408 Eq. [2]	1 000 000 Eq. [1]	1.78
Moyenne $\frac{N_{f,R}}{N_{f,NR}}$			1.50	Moyenne $\frac{N_{f,R}}{N_{f,NR}}$		
				1.66		

Tableau 2. Rapport de durées de vie en fatigue  $N_{f,R}/N_{f,NR}$  expérimentales et calculées par les droites de fatigue

trois niveaux de déformation considérés est de 1,66, ce qui signifie que la géo-grille augmente la durée de vie en fatigue du béton bitumineux de 66%. Les valeurs confirment que la géo-grille retarde la propagation des fissures et représente un renforcement du béton bitumineux, soumis à des sollicitations de fatigue.

Le tableau 3 présente l'ordre de grandeur de la dispersion expérimentale, exprimée par le rapport maximal des durées de vie en fatigue de 38 essais effectués sur les matériaux

testés. Dans le cas du béton bitumineux, la plus grande dispersion correspond au niveau  $\varepsilon = 150 \mu\text{m/m}$ , où le rapport maximal des durées de vie est de 2,1. Il a été montré par [DIB 04] une dispersion équivalente entre les essais de flexion quatre points et les essais de flexion deux points, qui sont les essais de référence en France. Dans le cas du béton bitumineux renforcé par des géo-grilles, la plus grande dispersion correspond à l'intervalle  $\varepsilon = (126 ; 129) \mu\text{m/m}$  où le rapport maximal des durées de vies est de 1,76.

Indicateur de dispersion	Formule de calcul	Niveaux de déformation testés $\epsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]			
		150	135	(126;129)	(111;116)
N° d'essais NR	$n$	6	6	0	6
Rapport maximal des durées de vie	$\frac{N_{fNR,max}}{N_{fNR,min}}$	2.1	1.98	–	1.55
N° d'essais R	$n$	6	6	6	2
Rapport maximal des durées de vie	$\frac{N_{fNR,max}}{N_{fNR,min}}$	1.30	1.36	1.76	1.29

**Tableau 3. Dispersion expérimentale des essais de fatigue alternée 4PB**

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article a présenté une campagne expérimentale complète formée de 38 essais de fatigue alternée en flexion en quatre points (4PB), menés pour caractériser le comportement en fatigue d'un béton bitumineux semi-grenu BBSG 0/10 de classe III et du même matériau renforcé à l'aide des deux géo-grilles de type Cidex 100SB. Les essais de fatigue ont été effectués avec au minimum 3 niveaux de déformation et 6 répétitions par niveau, pour chaque matériau, conformément aux conditions de la norme européenne de résistance à la fatigue [NF 12] : chargement sinusoïdal, température  $T = 10^\circ\text{C}$ , fréquence  $f = 25\text{Hz}$ . Les niveaux des déformations testés pour le béton bitumineux sont  $\epsilon = 150 \mu\text{m}/\text{m}$ ,  $135 \mu\text{m}/\text{m}$ ,  $111\text{-}116 \mu\text{m}/\text{m}$ . Les niveaux des déformations testés pour le béton bitumineux renforcé sont  $\epsilon = 150 \mu\text{m}/\text{m}$ ,  $135 \mu\text{m}/\text{m}$ ,  $126\text{-}129 \mu\text{m}/\text{m}$ ,  $115 \mu\text{m}/\text{m}$ .

Les essais ont permis de calculer la droite de fatigue de chaque matériau (NR et R) et d'estimer la valeur de déformation de dimensionnement  $\epsilon_0$ , dans des conditions équivalentes à celles considérées lors du calcul de dimensionnement de chaussées. La comparaison des droites de fatigue NR et R a montré que la géo-grille :

- augmente la durée de vie en fatigue  $N_f$  de 50% (essais 4PB), respectivement de 66% (droites de fatigue NR et R),
- augmente la déformation de dimensionnement  $\epsilon_0$  de 10,52%,
- augmente la pente de la droite de fatigue de 11,56%.

Ces valeurs sont importantes pour la méthode française de dimensionnement des chaussées et permettent de calculer la déformation en traction admissible à la base de la couche bitumineuse.

La comparaison des courbes d'évolution en fatigue  $E/E_0$ -N des éprouvettes NR et R a montré que la géo-grille Cidex 100SB retarde la propagation des fissures et augmente la durée de vie en fatigue.

En perspectives, des essais de fatigue 4PB sont envisagés pour observer l'effet de la température et de la fréquence sur le comportement en fatigue des bétons bitumineux renforcés par des géo-grilles.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [ARS 13] ARSENIE, I.M., Etude et modélisation des renforcements de chaussées à l'aide des grilles en fibre de verre sous sollicitations de fatigue, Thèse de doctorat, INSA de Strasbourg, 29 novembre 2013.
- [ARS 12] ARSENIE, I., CHAZALLON, C., THEMELI, A., DUCHEZ, J.L., DOLIGEZ D., Study of the fatigue behavior of fiber glass reinforced bituminous mixture, Proceedings of the 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Vol. 2, pp. 653-664, Delft, Hollande, 21 juin 2012.
- [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, Conference on Advanced characterisation of pavement and soil engineering materials, Athens, Greece, Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44882-6, 2007.
- [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, pp. 205-215, Pais (Ed.), University of Minho, Portugal. ISBN 978-972-8692-42-1, 2009.
- [CHA 13] CHAZALLON, C., ARSENIE I., THEMELI, A., DUCHEZ, J.L., DOLIGEZ, D., Study of the fatigue behaviour of an asphalt mixture reinforced by glass fiber grid, Proceedings of the European Asphalt Technology Association Conference (EATA), 12 p., Braunschweig, Allemagne, 3-5 juin 2013.
- [DIB 04] DI BENEDETTO H., DE LA ROCHE C., BAAJ, H., PRONK, A., LUNDSTROM, R., Fatigue of bituminous mixtures, Rilem TC182-PEB Performance testing and evaluation of bituminous materials, *Materials and Structures*, Vol. 37, pp. 202-216, 2004.
- [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.
- [EN 09] EN 12591, *Spécifications des bitumes routiers. Bitumes et liants bitumineux*, décembre 2009.
- [FER 11] FERROTI, G., CANESTRARI, F., VIRGILI, A., GRILLI, A., A strategic laboratory approach for the performance investigation of geogrids, *Construction and Building Materials* 25(2011)2343-2348, 2011.
- [KER 11] KERZREHO, J.P., HORNYCH P., Enrobé armé de grille en fibre de verre, *Revue générale des routes et de l'aménagement*, N° 890, December 2010 - January 2011.
- [NGU,13] NGUYEN, M.L., BLANC, J., KERZREHO, J.P., HORNYCH, P., Review of glass fibre grid use for pavement reinforcement and APT experiments at IFSTTAR, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14, 2013, pg. 287-308, DOI: 10.1080/14680629.2013.774763, 2013.
- [NF 11] NF P98-086, *Dimensionnement structurel des chaussées routières – Application aux chaussées neuves*, octobre 2011.
- [PAS 12] PASQUINI, E., BOCCI, M., FEROTTI, G., CANESTRARI, F., Laboratory characterization and field validation of geo-grid reinforced asphalt pavements, *Road Materials and Pavement Design*, Taylor and Francis, DOI:10.1080/ 14680629.2012. 735797, 2012.
- [THE 11] THEMELI, A., Etude de la fatigue de bétons bitumineux renforcés par des grilles en fibre de verre, *Mémoire de master recherche*, INPL, 2011.