



**HAL**  
open science

## L'expérience GB5<sup>®</sup> sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR

Juliette Blanc, Pierre Hornych, Simon Pouget, François Olard, Hervé Dumont

► **To cite this version:**

Juliette Blanc, Pierre Hornych, Simon Pouget, François Olard, Hervé Dumont. L'expérience GB5<sup>®</sup> sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, 2019, 967, pp.35-41. hal-04370223

**HAL Id: hal-04370223**

<https://hal.science/hal-04370223v1>

Submitted on 2 Jan 2024

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

# L'expérience GB5® sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR

Juliette Blanc<sup>1</sup>, Pierre Horny<sup>1</sup>, Simon Pouget<sup>2</sup>, François Olard<sup>2</sup>, Hervé Dumont<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MAST-LAMES, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France

<sup>2</sup> Eiffage Infrastructures, FRANCE

## 1 Introduction

Brevetés en 2010 par EIFFAGE Route, les enrobés hautes performances GB5® ont rencontré depuis lors un fort essor avec plus de 4 millions de tonnes réalisées en France et à l'international. Le secret de leurs performance et durabilité réside dans l'association d'empilements granulaires optimisés à des liants de haute qualité. La formulation de la grave bitume GB5 est tout à fait originale comparativement aux Enrobés à Module Elevé (EME). Nonobstant, les performances mécaniques de la GB5® en termes d'ornièrage, de module et de fatigue sont équivalentes à celles des EME2.

Afin de valoriser ces performances mécaniques hors normes dans le dimensionnement des chaussées, EIFFAGE Route et l'IFSTTAR se sont associés pour réaliser une expérimentation sur le manège de fatigue accéléré du site de Bouguenais. Cet article présente les résultats de l'essai manège, conçu pour comparer le comportement de deux structures : une avec une couche d'enrobé en EME2 (section de référence) et une autre avec une couche d'enrobé en GB5®. Cet essai manège a été réalisé en deux phases : une première réalisée durant l'été 2017 pour tester la résistance à l'ornièrage de ces structures, puis une deuxième réalisée entre octobre 2017 et mars 2018 afin de tester la résistance à la fatigue des deux structures.

Ces résultats viennent appuyer les conclusions issues du suivi des chantiers GB5® par le CEREMA dans le cadre du Comité Innovation Routes et Rues (CIRR) dont GB5® a été lauréat en 2011 et qui fait l'objet d'une charte de bonne fin d'expérimentation depuis 2017.

## 2 Rappel sur les principes de formulation des enrobés GB5®

La structure de chaussée supporte une pluralité de sollicitations :

- sollicitations mécaniques directes issues des charges roulantes du trafic de véhicules,
- sollicitations thermo-physiques engendrées par les variations de température et les effets du gel,
- sollicitations chimiques (eaux de pluies, rejets des véhicules, sels de déverglaçage, etc.).

Afin d'assurer une durabilité satisfaisante de la chaussée, la couche d'assise doit présenter un module de rigidité élevé et une très bonne résistance à la fatigue, ces deux caractéristiques ayant tendance à être antinomiques.

Les matériaux de la couche d'assise sont généralement de deux types:

- "**Grave Bitume (GB)**": squelette granulaire continu enrobé à l'aide de 4 à 4,9% de bitume pur,
- "**Enrobé à Module Elevé (EME)**": dès 1980, est introduite une innovation de rupture: la rigidité du matériau est augmentée en utilisant un bitume à faible pénétrabilité (<30 l/10mm) tout en augmentant la teneur en bitume (5,5 à plus de 6%) pour préserver une tenue en fatigue élevée [1][2]. La durabilité des EME a depuis trois décennies été éprouvée

sur tous les réseaux routiers à fort trafic en Europe [3][4][5], à condition que la teneur en liant demeure supérieure ou égale à 5.5% et que la densité in-situ soit supérieure à 94%. Lorsque ces deux conditions n'ont pas été respectées, des défauts structurels importants ont pu être observés, se traduisant par une perte importante de rigidité et une fissuration prématurée transversale et longitudinale [6]. Des cas de désenrobage sont également apparus, au Royaume-Uni en particulier.

Cependant, comparée à une formulation GB, la formulation EME engendre:

- une surconsommation en bitume (d'origine fossile) de 25%-30%,
- une fragilité à basse température qui peut engendrer de la fissuration
- une moindre recyclabilité dues à la dureté du liant employé,
- un état de surface après compactage fermé et lisse, défavorable au bon engrènement avec la couche de surface (problèmes associés de viabilité hivernale).

Le projet GB5<sup>®</sup>, fondé sur l'optimisation de la matière (granulats et bitume), répondait dès 2010 tout particulièrement aux trois problématiques précédentes et s'inscrivait dans la démarche générale Bas Carbone du groupe EIFFAGE.

Les enrobés bitumineux à hautes performances GB5<sup>®</sup> pour couches d'assise ou de liaison, brevetés par EIFFAGE, font partie de la famille des graves bitumes (GB). Leur teneur en liant est de l'ordre de 4.4 à 4,9% de façon identique aux GB classiques. Les enrobés GB5<sup>®</sup> sont d'une part constitués d'une courbe granulair 0/14 ou 0/20 comportant une voire deux discontinuités et, d'autre part, d'un bitume spécial multigrade ou modifié par des polymères.

De cette formulation innovante, issue pour partie des méthodes d'empilement granulaire des bétons à hautes performances (BHP), résultent des propriétés exceptionnelles:

- une excellente aptitude au compactage de l'enrobé et un haut module de rigidité (>14000MPa avec un bitume de grade usuel 35/50 ou 50/70) du fait d'une procédure spécifique d'optimisation de l'empilement granulaire,
- une très bonne tenue en fatigue (>130  $\mu$ def), de par la nature du bitume utilisé, multigrade ou modifié en polymère,
- une macrotexture favorable à une remise en trafic provisoire
- un coût au m<sup>2</sup> avantageux comparé aux structures de chaussées classiques en GB4, BBME3 ou EME2 du fait des performances mécaniques dudit enrobé et de la teneur en liant utilisée.

## 2.1 Empilements granulaires optimaux

Les travaux majeurs sur les arrangements granulaires optimaux remontent à Apollonius de Perga, géomètre et astronome grec (III<sup>ème</sup> s. av. J.-C.). Depuis, de nombreux travaux scientifiques ont été réalisés dans le domaine des bétons dits 'à porosité minimale' ou 'à hautes performances'. Citons les travaux visionnaires d'Albert Caquot qui dès 1937 permit de mieux appréhender les interférences inter-granulaires en introduisant les notions d'effets « de paroi » ou « de desserrement » [7], sans oublier les travaux plus récents dès les années 80 et 90 de Baron [8] ou encore de De Larrard [9][10][11].

La procédure utilisée en laboratoire est décrite dans de nombreuses publications [12][13][14][15][16]. Elle a conduit à introduire des discontinuités granulaires simples ou doubles de manière à maximiser les contacts entre gravillons et à obtenir très rapidement in-situ les densités et les performances mécaniques visées [12].

## 2.2 Synergie entre l'empilement granulaire optimisé et l'emploi d'un bitume SBS

L'optimisation des contacts gravillon-sur-gravillon engendre une forte augmentation de la rigidité des enrobés bitumineux, évitant ainsi le recours aux bitumes durs comme dans la

formulation actuelle dite 'EME'. L'utilisation de bitumes plus mous, très compatibles avec les co-polymères SBS (utilisés quasi exclusivement en couche de surface pour des raisons strictement économiques) offre la possibilité d'améliorer fortement la cohésion, l'élasticité, la ductilité, la résistance en fatigue et à l'oxydation des enrobés, et enfin une meilleure recyclabilité.

### 3 L'expérimentation sur le manège

#### 3.1 Les structures et les matériaux testés

L'objectif de l'essai manège était de comparer les performances de la GB5<sup>®</sup> avec celles d'un EME2, considéré comme référence, et testé dans les mêmes conditions. Pour cela, deux sections de chaussées, d'une largeur 4.5 mètres, d'une longueur comprise entre 22 et 30 mètres, avec la même structure, ont été testées sur le manège de fatigue de l'Ifsttar à Nantes (figure 1). Trois autres structures ont aussi été testées durant le même essai manège pour le projet européen BioReparation mais ne seront pas présentées dans cet article. Les résultats ont été publiés en 2019 dans Journal of Cleaner Production [17].

Les deux structures testées comprennent :

- Une couche bitumineuse
  - de 10.2 cm d'EME2 avec 20% d'agrégats d'enrobés recyclés (AER)
  - de 9.9 cm de GB5<sup>®</sup> avec 20% d'AER.
- Une assise en GNT, réalisée en trois couches, avec une épaisseur totale de 76 cm.
- Une plate-forme support constituée d'un empierrement (50/120 mm), d'une épaisseur de 2.4 m, reposant sur le sol naturel argileux, de faible portance (environ 20MPa).

La portance a été mesurée à différentes positions sur chaque structure au moyen d'une dynaplaque. Les valeurs de portance obtenues varient entre 63 et 86 MPa sur l'empierrement, et entre 103 et 111 MPa au sommet des couches de GNT.

Lors de la construction, des mesures de masse volumique au gammadensimètre Troxler ont été réalisées sur les couches bitumineuses. Les pourcentages de vides sur l'anneau extérieur (essai de fatigue) sont respectivement de 5.21% (+/- 1.5%) pour la GB5 et 4.25% (+/-1.09%) pour l'EME2.

Sur l'anneau intérieur (essai d'orniérage), ils sont respectivement de 5.4% (+/-1.03%) pour la GB5 et 4.3% (+/-0.9%) pour l'EME2.

Les compositions théoriques des enrobés sont données dans le tableau 1.

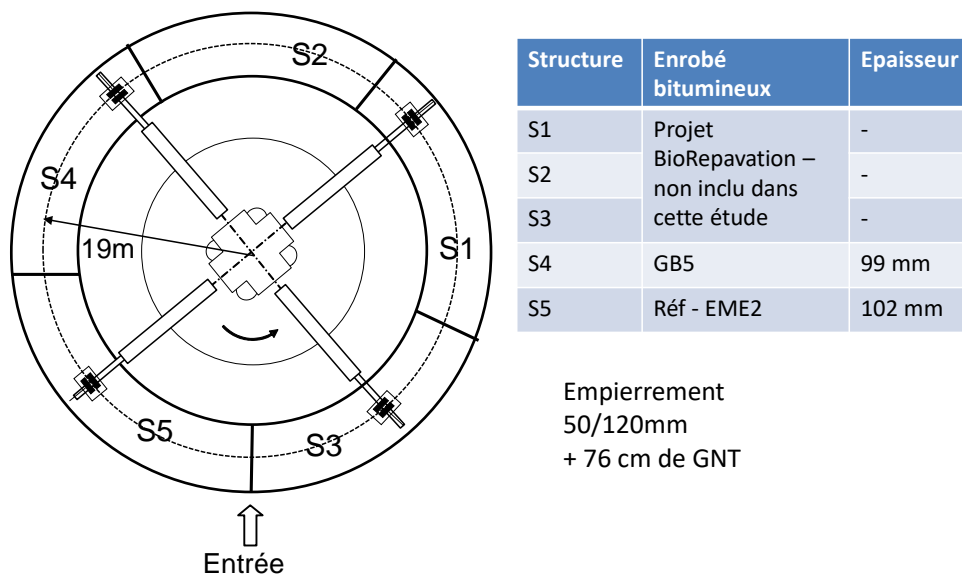


Figure 1. Disposition des structures testées sur le manège

Tableau 1. Formulations théorique de la GB5® et de l'EME2 avec 20% de recyclés

Enrobés	GB5®	EME2
Liant total	4.8%	5.5%
0/2 mm La Noubleau	11.0%	17.5%
2/6 mm La Noubleau	7.0%	17.7%
6/10 mm La Noubleau	-	22.1%
10/14 mm La Noubleau	51.2%	15.4%
Filler Omya	6.7%	2.5%
AE 0/8 mm poste Touraine	10.0%	10.0%
AE 8/12 Poste Touraine	10.0%	10.0%

Les valeurs de résistance à l'orniérage, de module et de résistance en fatigue des enrobés formulés en laboratoire sont présentées dans le tableau 2. On peut remarquer en particulier une économie de l'ordre de 15% de bitume avec la formule GB5® en comparaison de l'EME2. Les matériaux testés sur le manège ont été fabriqués à la centrale d'enrobés EIFFAGE ROUTE « Touraine Enrobés » et les structures ont été construites par l'agence Eiffage Route d'Ancenis les 30 et 31 mai 2017. Durant la construction, des matériaux ont été prélevés afin de réaliser des essais de module et de fatigue. Les propriétés de module et fatigue des enrobés fabriqués en centrale sont également présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Propriétés mécaniques des enrobés produits en laboratoire et en centrale (et compactés en laboratoire)

	Formulation laboratoire			Formulation centrale	
	Norme du module complexe (15°C et 10Hz)	Paramètres de résistance en fatigue	Pourcentage d'ornièrisme à 30 000 cycles (60°C)	Norme du module complexe (15°C et 10Hz)	Paramètres de résistance en fatigue

EME2	15 700 MPa	132 $\mu$ def	3.1 %	16 800 MPa	126 $\mu$ def
GB5 <sup>®</sup>	14 000 MPa	133 $\mu$ def	4.1 %	14 000 MPa	136 $\mu$ def

### 3.2 Déroulement de l'expérience

L'essai manège a été réalisé en deux phases:

- La première phase a été réalisée entre juillet et septembre 2017, pour évaluer la résistance à l'orniérage. 200 000 chargements, sous des charges de 65 kN (demi-essieux à roues jumelées) ont été appliqués durant cette phase.
- La seconde phase a été réalisée entre novembre 2017 et mars 2018, pour évaluer la résistance à la fatigue des structures, sous des charges de 65 kN également. Après l'application d'un million de chargements à 65 kN, quasiment aucune détérioration de surface n'était visible sur les deux sections. Il a donc été décidé de prolonger l'essai et d'appliquer 400 000 chargements supplémentaires, avec des charges plus importantes (75 kN).

Les conditions de l'essai sont précisées dans le tableau 3.

Lors de l'essai d'orniérage, les chargements ont été appliqués uniquement lorsque la température de surface dépassait 30°C. La température de surface a généralement varié entre 30°C et 40°C, avec quelques périodes avec des températures plus élevées, spécialement lors du début de l'essai, avec une température maximale de 53°C mesurée à la surface des structures. Lors de l'essai de fatigue, la température de surface a varié entre 36°C et -5.5°C, avec la plupart des valeurs comprises entre 4 °C et 14°C. La température moyenne était de 8.8°C, et la température moyenne au milieu de la couche était de 9.0°C. Ces températures relativement faibles représentent des conditions adéquates pour la réalisation d'un essai de fatigue.

Tableau 3. Condition d'essai pour les deux phases

	<b>Essai d'orniérage</b>	<b>Essai de fatigue</b>	
Période	Eté 2017	Novembre 2017 - Février 2018	Février – mars 2018
Vitesse	43 km/h	76 km/h	43 km/h
Balayage transversal	+/- 26 cm	+/- 52 cm	+/- 52 cm
Température de surface: Min-Max	>30°C	-2.2°C ; 36.3°C	-5.5°C ; 26.7°C
Température moyenne (milieu de la couche)		9.2°C +/-4.7°C	8.2°C +/- 4.2°C
Chargement (jumelage standard)	65 kN	65 kN	75 kN
Nombre de chargements	200 000	1 million	400 000

## 4 Comportement des structures sous le trafic du manège

### 4.1 Performances des structures testées durant l'essai d'orniérage

Durant l'essai d'orniérage, les suivis réalisés comprenaient :

- Des mesures de température, à la base, au milieu et à la surface de la couche d'enrobé, réalisées en continu, toutes les 10 minutes.
- Des mesures de profondeur d'ornièrre, réalisées au moyen d'un profilomètre équipé d'un capteur laser (précision de mesure 1 mm en vertical) à 0, 10 000, 20 000, 40 000 cycles, et ensuite tous les 40 000 cycles, jusqu'à la fin (200 000 cycles).

L'évolution des profondeurs d'ornièrre moyennes (en %) durant l'essai est présentée sur la figure 2.

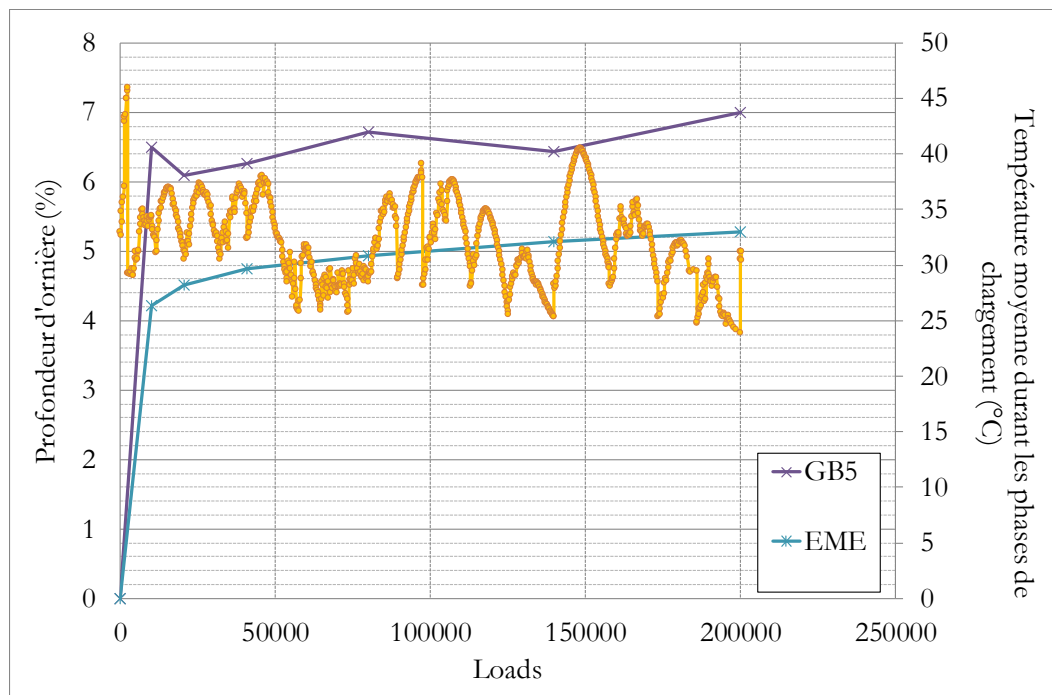


Figure 2. Evolution de l'ornièrre durant l'essai (valeur moyenne par section)

Le pourcentage d'ornièrre, à la fin de l'essai est d'environ 5% pour l'EME2 et de 7% pour la GB5®.

200 000 chargements, sous un demi-essieu standard chargé à 65 kN ont été appliqués durant l'essai d'ornièrre dans des conditions sévères (températures élevées, vitesse faible et balayage transversal réduit). A la fin de l'essai, il est possible de conclure que :

- La profondeur d'ornièrre a augmenté rapidement sur les deux sections durant les 10 000 premiers cycles. Cette augmentation rapide peut-être due à un post-compactage mais aussi aux températures particulièrement élevées observées durant les 10 000 premiers cycles.
- Après 10 000 cycles, la profondeur d'ornièrre a continué à augmenter, mais beaucoup plus lentement (environ 1% pour les deux sections). Cela indique des bonnes performances des deux matériaux.

Ces résultats sont cohérents avec les mesures en laboratoire : la GB5 testée présente une sensibilité à l'ornièrre légèrement plus élevée que l'EME2.

En fin d'expérience, des découpes transversales ont été réalisées sur les deux sections, afin de mieux déterminer l'origine de l'ornièrre. Les profils transversaux à la fin de l'essai, sur les deux sections, aux emplacements les plus ornièrés sont présentés sur la figure 3. L'ornièrre de la section en EME2 peut être expliqué par un post-compactage de la GNT (ornièrre à grand rayon). La profondeur d'ornièrre maximale mesurée est de 6 mm. Pour la section en GB5, la

profondeur d'ornièrre maximale mesurée est de 7.6 mm. Il est possible de distinguer les traces des deux roues des demi-essieux du manège. La structure en GB5 s'est donc déformée sous l'effet du post-compactage de la GNT (6 mm) et à cause de l'ornièrage de l'enrobé (1.6 mm au maximum). Sachant que cet essai représente le trafic estival subi par une chaussée (150 poids lourd / jour) durant 20 ans, l'ornièrage est dans les deux cas quasiment négligeable.

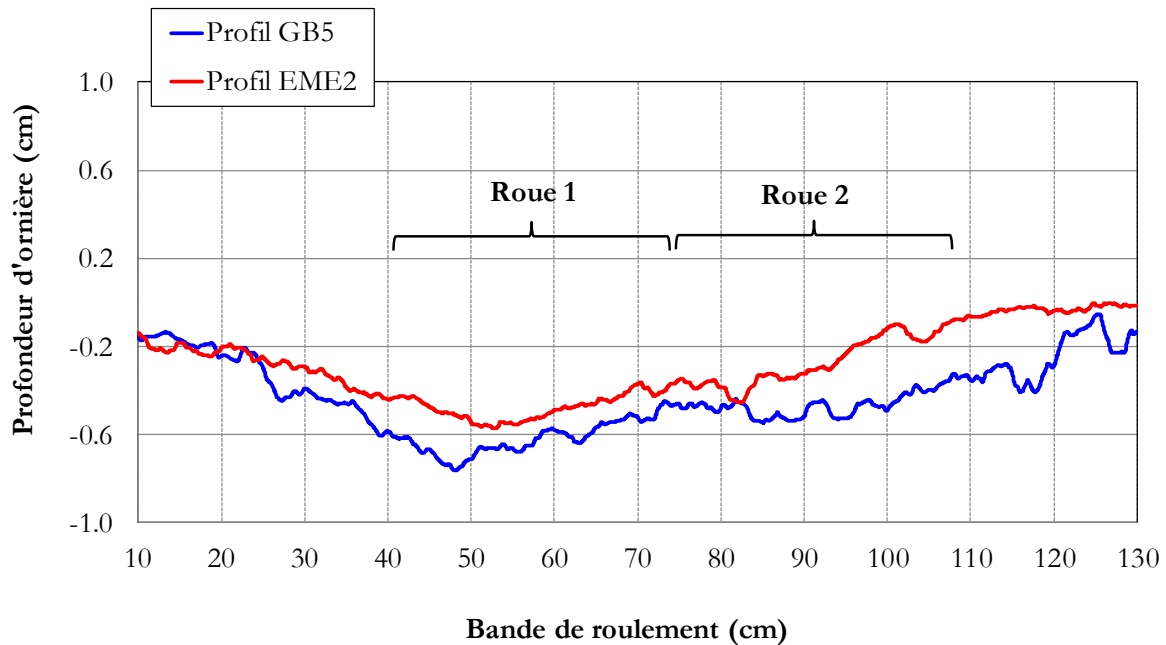


Figure 3. Profils transversaux à la fin de l'essai

## 4.2 Performances des structures durant l'essai de fatigue

Au cours de l'essai de fatigue, les sections ont fait l'objet d'un suivi plus complet, comprenant :

- Des relevés des mesures des jauges de déformation, placées à la base des couche bitumineuses, réalisées tous les 20 000 cycles.
- Des mesures de température, à la base, au milieu et à la surface de la couche d'enrobé, réalisées en continu, toutes les 10 minutes.
- Des mesures de bassins de déflection au FWD (Falling Weight Deflectometer) : à 0, 500 000, et 1 million de cycles, puis à 1.1, 1.2, 1.3 et 1.4 million de cycles.
- Des inspections visuelles pour l'évaluation de la fissuration : avant le début de l'essai, puis tous les 100 000 cycles. Ces mesures sont traduites en pourcentage de fissuration de la chaussée (pourcentage de la surface affectée par des fissures).
- Des mesures de déflection à la poutre Benkelman (4 ou 5 mesures par section), avant le début de l'essai, puis tous les 100 000 cycles.

### 4.2.1 Evolution de la fissuration

Sur la section en EME2, les premières fissures ont été observées après 900 000 cycles. Jusqu'à 1.4 million de cycles, l'évolution de la fissuration augmente progressivement et atteint 28% à la fin de l'essai.

Sur la section en GB5, aucune fissure n'a été observée durant l'essai. La figure 4 présente l'évolution de la fissuration, en fonction du nombre de cycles, sur les deux sections.



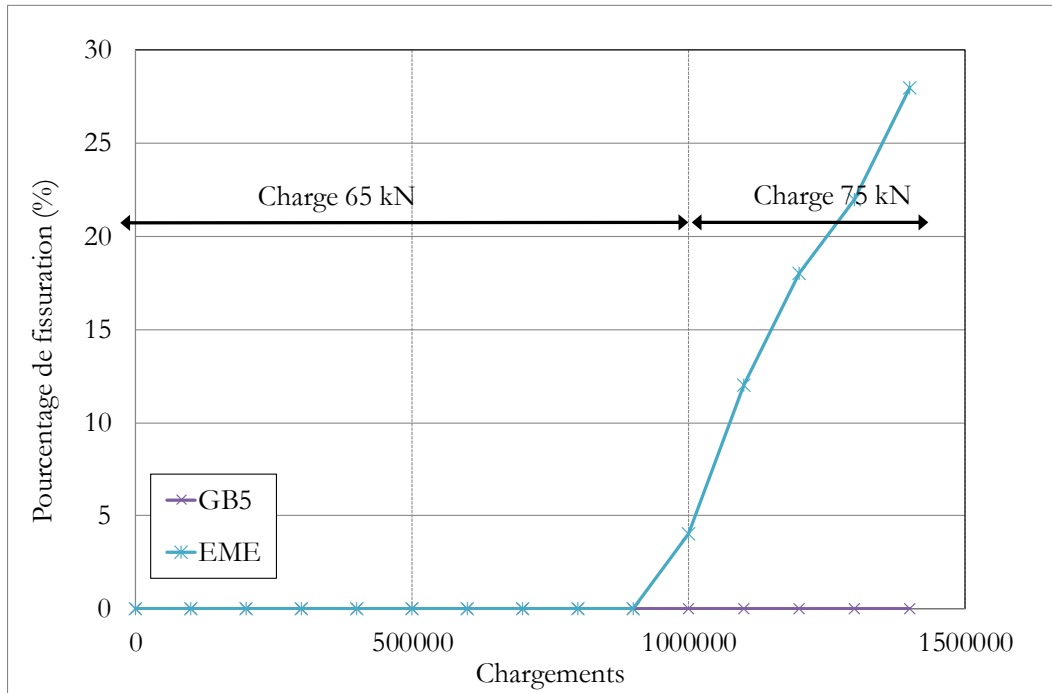


Figure 4. Evolution de la fissuration sur les deux sections

Des photos de la section en EME2 et de la section en GB5 sont présentées sur la figure 5. Sur la section en EME2, les premières fissures transversales assez fines sont apparues après 900 000 cycles (repérées en blanc sur la photo). Ensuite, sous l'effet du trafic, ces fissures ont commencé à s'ouvrir et des remontrées de fines sont apparues. Les fissures marquées en bleu, orange, rose et jaune sont apparues respectivement à 1.1, 1.2, 1.3 et 1.4 million de cycles. L'orientation transversales des fissures est typique des fissures observées sur le manège de fatigue, sous roues jumelées, pour les chaussées souples [18].



(a) Section en EME2



(b) Section en GB5

Figure 5. Photo des fissures sur la section en EME2 (a) et de la section en GB5 (b) à la fin de l'essai (1.4 million de cycles)

Ce résultat indique clairement que la section en EME2 s'est détériorée la première et que la section en GB5 présente un comportement meilleur.

#### 4.2.2 Mesures au FWD

Des mesures au FWD ont été réalisées durant tout l'essai. La figure 5 présente l'évolution de la déflexion, mesurée avec le géophone n°1 du FWD, en fonction de la distance sur la piste pour des campagnes de mesures réalisées à 0, 500k, 1 million, puis tous les 100 000 cycles. En début d'expérimentation, les mesures ont été réalisées avec un pas de 5 m environ. A partir de 1 million de cycles, les mesures ont été réalisées avec un pas beaucoup plus rapproché, de 1m, afin de pouvoir mieux suivre l'endommagement des structures. La température moyenne dans la couche d'enrobé correspondant à chaque campagne expérimentale est indiquée sur le graphique. Lors des mesures effectuées au point zéro, la température était plus élevée (29 °C), mais pour les autres mesures, les températures étaient proches (entre 9°C et 15 °C). Les déflexions mesurées avec le FWD sont du même ordre de grandeur que celles mesurées avec la poutre Benkelman (figure 6).

Il est possible d'observer que :

- Entre 0 et 500k cycles, la déflexion diminue pour les deux sections. Ceci est probablement dû au post compactage de la GNT mais aussi à une diminution de la température. La déflexion est similaire sur les deux sections.
- A 1 million de cycle, la déflexion augmente fortement sur certains points de mesure pour la section en EME2. Ces pics de déflexion indiquent des zones endommagées sur la structure de chaussée. En effet, ces pics ont été observés sur les zones où les fissures sont apparues.

- Lors des campagnes de mesures après 1.1 millions de cycles, ces pics de déflexion se sont accentués sur la section en EME2. Aucun pic n'a été observé sur la section en GB5, ce qui montre que la section n'est pas endommagée au bout de 1.4 million de cycles.

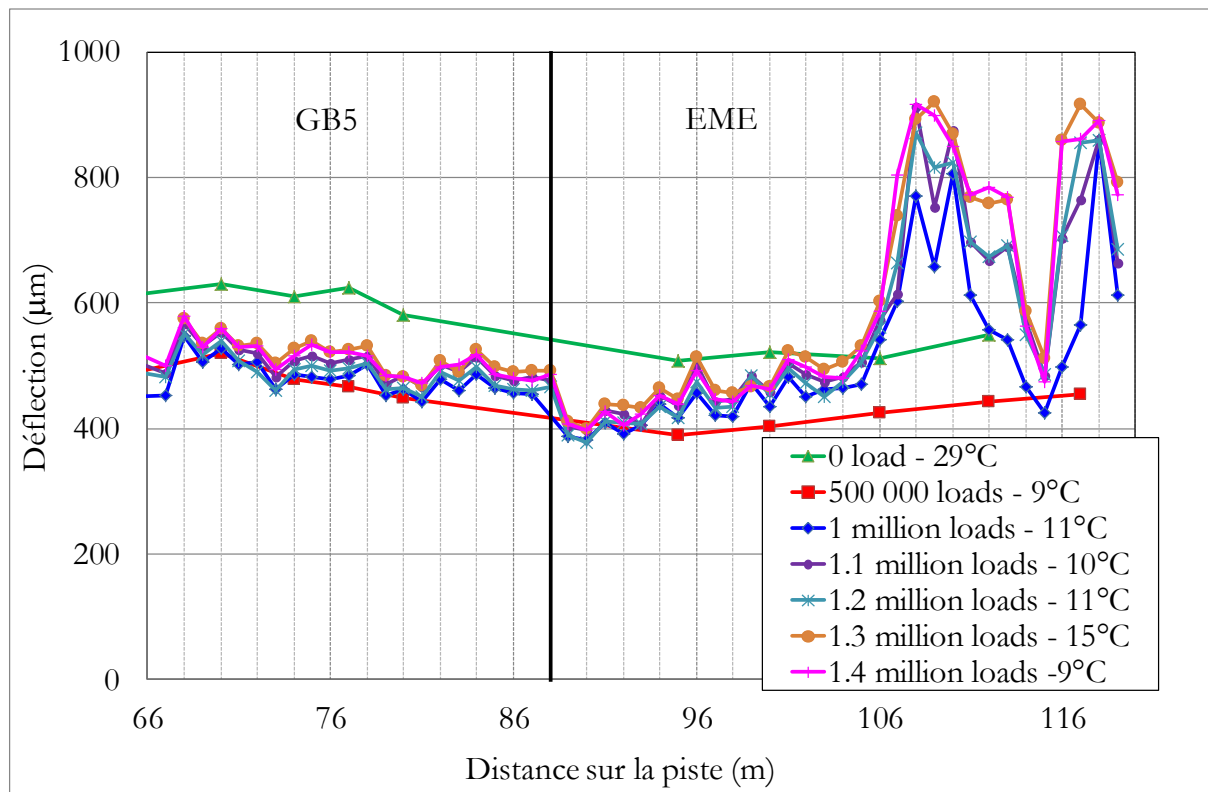


Figure 6. Evolution de la déflexion sur les deux sections (mesures avec le FWD, géophone 1).

## 5 Interprétation des résultats pour le dimensionnement

### 5.1 Données expérimentales

Les résultats des mesures ont été utilisés pour définir un modèle pour chacune des deux structures de chaussées (GB5 et EME2) afin de faire des calculs de dimensionnement. Les caractéristiques des couches ont été définies de la manière suivante :

- Les épaisseurs des couches ont été définies à partir des mesures de nivellement réalisées durant la construction (figure 1).
- Les caractéristiques des matériaux bitumineux (modules et paramètres de fatigue) ont été déterminées à partir des essais de laboratoire réalisés sur les matériaux fabriqués en centrale et prélevés lors du chantier (tableau 4)
- Les mesures FWD réalisées à 500k cycles (avant apparition de l'endommagement) ont été utilisées pour déterminer les modules des couches de GNT, à partir de retro-calculs.
- Les valeurs de module du sol ont été déterminées à partir des mesures réalisées à la poutre Benkelman. Ces mesures, réalisées à faible fréquence, permettent en effet une meilleure estimation des modules de sol que les essais FWD, dont la fréquence de chargement est beaucoup plus élevée, et qui tendent à surestimer les valeurs de module du sol support.

Les valeurs ainsi déterminées sont résumées dans le tableau 4.

## 5.2 Détermination de la valeur du coefficient de calage $k_c$

Appliquée aux matériaux bitumineux, la méthode de dimensionnement rationnelle [19] relie la déformation en extension maximale  $\varepsilon_{t,max}$  produite par la charge de référence au nombre cumulé de passages NE de cette charge et au risque  $r$  de rupture associé, par la relation :

$$\varepsilon_{t,max} = \varepsilon_6(10\text{ }^\circ\text{C}, 25\text{Hz})\left(\frac{NE}{10^6}\right)^b k_r k_s k_\theta k_c \quad (1)$$

Avec :

- $\varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$  est la valeur de déformation conduisant à la rupture pour 1 million de cycle, déterminée à partir d'essais de fatigue (en flexion deux-points) en laboratoire réalisés à 10 °C et 25 Hz.
- NE est le nombre d'essieux de référence équivalent au trafic subi par la chaussée;
- $k_c$  est le coefficient de calage, fonction du type de matériau bitumineux;
- $k_s$  est un coefficient prenant en compte les hétérogénéités dues à la portance du sol support ( $k_s$  est pris égal à 1 dans le cas de l'essai manège);
- $k_\theta$  est le coefficient de correction en température, permettant de prendre en compte l'effet de la température sur  $\varepsilon_6$  :  
$$(k_\theta = \sqrt{E(15\text{ }^\circ\text{C}, 10\text{Hz})/E(10\text{ }^\circ\text{C}, 10\text{Hz})})$$
- $k_r$  est le coefficient de risque, fonction croissante du risque  $r$ , auquel est associé le degré de dégradation de la structure à l'instant  $t$  considéré.

Pour un niveau de trafic donné, représenté par le nombre d'essieux de référence NE, le degré de dégradation structurelle de la chaussée est connu. Il est traduit par le risque de rupture  $r$ , lui-même représenté par le coefficient  $k_r$ . Les valeurs des paramètres  $\varepsilon_6$ ,  $b$ ,  $k_\theta$  et  $k_s$  étant fixées, l'équation (1) conduit directement à la valeur du coefficient de calage  $k_c$ , moyennant le calcul de la déformation  $\varepsilon_{t,max}$  par le logiciel Alizé-LCPC [20].

Dans le cas des essais manège, l'approche de calage de la durée de vie des structures de chaussées nécessite de prendre en compte les conditions spécifiques d'essai sur le manège de fatigue. Pour cela, un coefficient de correction supplémentaire,  $k_{har}$  est introduit au second membre de l'équation (1). Ce coefficient est introduit pour prendre en compte la différence entre les durées de vie obtenues sur le manège de fatigue, et les durées de vies de chaussées réelles. En effet, l'expérience montre que les durées de vie obtenues sur le manège sont en général un peu plus élevées, en raison des conditions expérimentales propres au manège de fatigue comme :

- La très bonne qualité de la construction et l'homogénéité du sol support.
- La faible longueur des planches d'essai
- La courte durée d'essai (environ 5 mois d'essai de fatigue), qui limite considérablement le vieillissement des matériaux et les effets dus aux variations climatiques
- Le bon contrôle des chargements appliqués (pas de surcharges dynamiques)

La valeur de  $k_{har}$  est déterminée en utilisant une structure témoin, avec des matériaux de performances connues, et en comparant le comportement prédit par le modèle de dimensionnement et celui observé sur le manège pour cette structure témoin. Cette valeur est ensuite appliquée aux autres structures testées dans la même expérimentation

Dans cette expérimentation, ce coefficient de correction a été déterminé en se basant sur les résultats obtenus pour la structure en EME2. Une valeur de  $k_{har} = 1,18$  a été obtenue. Un facteur

de correction similaire a été déterminé lors d'une expérience précédente, réalisée dans le projet ANR RECYROUTE. La valeur du facteur de correction était alors 1.1 [21].

La démarche présentée ci-dessous est celle qui est appliquée par l'IFSTTAR pour la détermination des coefficients  $k_c$  issus d'une expérience manège. Elle a déjà été utilisée dans le cadre de l'essai manège RECYROUTE et est décrite en détail dans l'article RGRA n°911 [21].

Après l'évaluation de la durée de vie de la structure en EME2 et le calcul d'un facteur d'harmonisation  $k_{har}$ , les calculs de dimensionnement ont été réalisés sur la section en GB5®. Les paramètres utilisés pour les calculs de dimensionnement sont donnés dans le tableau 4.

Aucun dommage n'a été observé sur la structure en GB5®. Il n'est donc pas possible de déterminer une valeur précise du coefficient de calage  $k_c$ . Normalement,  $k_c$  est déterminé quand les niveaux de dommage observés sont importants (typiquement 50%). Bien que le niveau de dommage soit nul, un calcul a été réalisé en considérant, de manière forfaitaire, un niveau de dommage de 1%, de manière à obtenir une estimation de la valeur minimum du  $k_c$  (en majorant le dommage observé, on obtient un minorant de la valeur de  $k_c$ ) (tableau 4).

Tableau 4. Paramètres de dimensionnement pour les deux sections et résultats des calculs de dimensionnement

		<b>EME2</b>	<b>GB5</b>
<b>Enrobés bitumineux</b>	H	10.2 cm	9.9 cm
	E (15°C-10Hz)	16 800 MPa	14 000 MPa
	E (10°C-10Hz)	20 200 MPa	17 400 MPa
	$\epsilon_6$	126 $\mu$ strain	136 $\mu$ def
	B	-0.178	-0.159
	Sh	8 mm	10 mm
	SN	0.187	0.23
<b>GNT</b>	H	76 cm	76 cm
	E	160 MPa	160 MPa
<b>Sol</b>	H	3 m	3 m
	E (MPa)	85 MPa	90 MPa
	$k_s$	1	1
<b>Déformation <math>\epsilon_{tmax}</math></b>	$\epsilon_{tmax}$	137.9 $\mu$ strain	161 $\mu$ def
<b>Nombre d'essieux équivalent NE</b>	NE (65 kN)	1 893 987	1 983 944
<b>Niveau de dommage observé</b>		<b>28 %</b>	<b>&lt;1%</b>
<b><math>k_c</math> calculé à partir des dommages observés</b>			1.50
<b><math>k_{har}</math> facteur de correction essai manège</b>			1.18
<b><math>k_c</math> après correction</b>			<b>1.27</b>

Avec ces valeurs, et en tenant compte du facteur de correction dû à l'essai manège ( $k_{har}$ ), une valeur minimum de  $k_c=1.27$  a été obtenue pour la GB5®. Compte tenu des valeurs de  $k_c$  données dans la méthode française de dimensionnement, qui sont exprimées avec une décimale, on propose d'arrondir cette valeur à  $k_c = 1,3$ . On pourra noter que pour la chaussée testée sur le manège, le passage d'une valeur de  $k_c$  de 1,27 à 1,3 correspond à une réduction d'épaisseur de

la structure de 3mm (en considérant un trafic identique de 1 million de PL ), ce qui est très faible, ou à une augmentation de durée de vie de 10 %, à épaisseur égale.

## 6 Conclusion

En conclusion, l'essai manège, qui a permis de tester en parallèle, et dans les mêmes conditions, l'EME2 et la GB5<sup>®</sup>, montre clairement le meilleur comportement en fatigue de la GB5<sup>®</sup> par rapport à l'EME2. A ce stade de l'essai, il semble qu'un coefficient de calage minimum de  $k_c=1.3$  puisse être appliqué dans les calculs de dimensionnement pour la GB5<sup>®</sup>. Ce résultat est conforté par :

- les  $k_c$  obtenus sur les trois planches du projet BioRePavation dans lesquels des produits biosourcés (régénérant, additif et liant) ont été utilisés dans des squelettes granulaires GB5 et pour lesquels des similaires ont été obtenus.
- Les conclusions issues du suivi des chantiers GB5<sup>®</sup> par le CEREMA dans le cadre du Comité Innovation Routes et Rues (CIRR) dont GB5<sup>®</sup> a été lauréat en 2011 et qui fait l'objet d'une charte de bonne fin d'expérimentation depuis 2017.

## 7 Références

- [1] Corté J-F., Development and uses of hard-grade asphalt and of high-modulus asphalt mixes in France, Transportation Research Circular, N° 503, 2001.
- [2] De La Roche C., Corté J-F., Gramsammer J-C., Odéon H., Tiret L., Caroff G., Etude de la fatigue des enrobés bitumineux à l'aide du manège de fatigue du LCPC, Revue Générale des Routes et des Aéroports, n°716, 1994.
- [3] Sanders P. J., Nunn M., The application of Enrobe a Module Eleve in flexible pavements, Transportation Research Laboratory, TRL Report N°236, 2005.
- [4] De Backer C., Enrobés à module élevé (EME): de la conception à la mise en œuvre, CRR, Compte rendu de recherche CR 43/07, Bruxelles, 2007.
- [5] Tanghe T., Goos D., EME: a mixture with potential, Congrès IRF 2010, Lisbonne.
- [6] Elliott R., Implementing high modulus asphalt technology in the UK, Séminaire international de l'AIPCR organisé par le Comité technique AIPCR D2 (Chaussées routières) et le Comité national mexicain (AMIVTAC) "Techniques d'entretien pour l'amélioration de la performance", Cancun 2009.
- [7] Caquot A., Le rôle des matériaux dans le béton, Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, pp. 562-582, juillet-août 1937.
- [8] Baron J., Sauterey. R, Le béton hydraulique: Connaissance et pratique, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1982.

- [9] De Larrard, F., Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances, Rapport de recherche LPC N°149, ISSN 0222-8394, mars 1988.
- [10] De Larrard F., Sedran T. and Angot D, Prédiction de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide I: Fondements Théoriques et Calibration du Modèle, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°194, 1994a.
- [11] De Larrard, Sedran T., Optimization of ultra high-performance concrete by the use of a packing model. Cem. Con. Res. 24/6, 1994b.
- [12] Olard F., Huon P., Dupriet S. et Billet C., Graves-bitume GB5® : une nouvelle gamme d'enrobés à hautes performances pour couches d'assise et de liaison, RGRA, N°888, octobre 2010.
- [13] Olard F., Innovative Design Approach for High-Performance Asphalt Concretes for Long-Life Base and Binder Courses by Use of Aggregate Packing Concepts and Polymer Modified Binders, 2011 Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C., January 2011.
- [14] Olard F., GB5®: Eco-friendly alternative to EME2 for long-life and cost-effective base courses by optimizing aggregates & using SBS modified binders, World Road Congress (PIARC), Mexico City, September 2011.
- [15] Olard F., GB5®: Innovative design of high-performance asphalt mixes for long-life and cost-effective pavements by optimizing aggregates & using SBS modified binders, 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA), Drakensberg, September 2011.
- [16] Olard F., Dupriet S., Huon P., Pouget S. et Lecomte S. « GB5®: une composition optimisée d'enrobés à hautes performances » RGRA n°899, pp. 76- 80, janvier 2012
- [17] Blanc J., Hornych P., Sotoodeh-Nia Z., Williams C., Porot L., Pouget S. et al. - Journal of Cleaner Production 227 (2019) 1068-1078
- [18] Hornych P., Kerzrého J.P., Chabot A., Bodin D., Balay J.M., Deloffre L. (2008), "The LCPC's ALT facility contribution to pavement cracking knowledge ", In: *Pavement Cracking*, Proc. of the 6th Int. RILEM Conf., 2008, pp. 671-681, Al-Qadi, Scarpas and Loizos (Eds), CRC Presse
- [19] NF P 98-086, Norme française : Dimensionnement structurel des chaussées routières : application aux chaussées neuves, octobre 2011
- [20] David Remaud, Patricia Roure, Juliette Blanc, Jean-Michel Piau, « Logiciel Alizé-LCPC : analyse et dimensionnement des structures de chaussées », Revue Générale des Routes et de l'Aménagement n°958, Octobre 2018.

- [21] M. L. Nguyen, J. M. Balay, F. Olard, C. Sauzéat, H. Di Benedetto, B. Ficherouille (2013). L'expérience Recyroute sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR. Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, n° 911, avril-mai 2013