



HAL
open science

Résultats du projet BioRePavation: évaluation accélérée en vraie grandeur de solutions de recyclage d'enrobé bitumineux employant des produits biosourcés

Juliette Blanc, Emmanuel Chailleux, Pierre Hornych, Simon Pouget, Laurent Porot, Chris Williams, Jean-Pascal Planche, Ana Jimenez del Barco Carion, Davide Lo Presti, Yvan Baudru, et al.

► To cite this version:

Juliette Blanc, Emmanuel Chailleux, Pierre Hornych, Simon Pouget, Laurent Porot, et al.. Résultats du projet BioRePavation: évaluation accélérée en vraie grandeur de solutions de recyclage d'enrobé bitumineux employant des produits biosourcés. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, 2020, 976, pp.67-73. hal-04372212

HAL Id: hal-04372212

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04372212v1>

Submitted on 4 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

Résultats du projet BioRePavation: évaluation accélérée en vraie grandeur de solutions de recyclage d'enrobé bitumineux employant des produits biosourcés

Juliette Blanc (ITPE, Université Gustave Eiffel)

Emmanuel Chailleux (Directeur de recherche, Univ Eiffel)

Pierre Hornych (IDTPE, IFSTTAR)

Simon Pouget (Responsable recherche et innovation, Eiffage)

Laurent Porot (Responsable technique application routière, Kraton)

Chris Williams (Chercheur, Université de l'Iowa)

Jean-Pascal Planche, (Vice-président Asphalt and Petroleum Technologies, Western Research Institute)

Ana Jimenez Del Barco Carion, (Chercheur, Université de Grenade)

Davide Lo Presti, (Chercheur, Université de Palerme)

Yvan Baudru, Stéphane Trichet, Thierry Gouy, Gilles Coirier (Techniciens, Univ Eiffel)

1 Introduction

La construction des chaussées est consommatrice de ressources non renouvelables. Les granulats sont prélevés dans des carrières qui sont situées sur des territoires en concurrence avec d'autres usages. Le liant, est en grande majorité, produit par distillation du pétrole brut, et donc issu d'une industrie à très fort impact carbone. Afin de faire baisser l'impact environnemental de la construction d'un enrobé bitumineux, il semble donc intéressant de réfléchir aux alternatives possibles concernant ces deux types de matériaux. En ce sens, il a été proposé dans le projet BioRePavation [1], financé par le programme international Infravation, d'évaluer des solutions techniques associant l'emploi d'un fort taux d'agrégats d'enrobés (AE) et de produits organiques bio-sourcés pour remplacer totalement ou partiellement la matrice bitumineuse. L'évaluation a été menée d'un point de vue technique en optimisant en laboratoire des formules innovantes, puis en réalisant un essai accéléré à l'échelle 1 sur le manège de fatigue de l'Université Gustave Eiffel (IFSTTAR). Dans cet article, les conditions de l'essai en vraie grandeur sont détaillées. Les performances brutes, en termes d'orniérage et de fissuration sont données. Enfin, la méthode rationnelle de calcul du comportement mécanique des chaussées est appliquée afin de déterminer, à partir des résultats de l'essai manège, les

coefficients de calage utiles aux futurs dimensionnements des structures qui emploieraient les matériaux innovants développés dans le projet BioRePavation.

2 L'expérimentation sur le manège

2.1 Les structures et les matériaux testés

Un enrobé incorporant 50% d'agrégats d'enrobés (AE) a été formulé en se basant sur le concept de la GB5 développé par Eiffage. Ce type de matériau a la particularité de favoriser les contacts entre « gros » granulats et d'avoir par conséquent une structure très stable qui lui donne une rigidité importante, même avec une matrice organique souple ainsi qu'une haute durabilité. Pour ce qui concerne la partie liante, trois produits organiques ont été testés :

- 1- Le premier est un additif régénérant, Sylvaroad[®] développé par Kraton, produit à partir de la chimie du Pin, qui est pulvérisé sur les agrégats avant de procéder au malaxage. L'enrobé correspondant sera identifié par la suite comme le Mix1.
1. Le second est en liant biosourcé, Biophalt[®] développé par EIFFAGE, issu également majoritairement de la chimie du pin, développé pour remplacer totalement le liant d'apport dans les techniques de recyclage. L'enrobé correspondant sera identifié par la suite comme le Mix2.
- 2- Le troisième est l'additif EMS développé par l'université de l'IOWA, issu d'huile de soja trans-estérifiée puis époxydée, qui est mélangé au bitume d'apport avant la fabrication de l'enrobé. L'enrobé correspondant sera identifié par la suite comme le Mix3.

Les AE utilisés dans le cadre du projet provenaient d'une source unique bien identifiée d'une chaussée déconstruite. Les propriétés du liant étaient très dures avec une valeur de pénétration à 25 °C de 7 0.1mm, hors des spécifications du Guide technique « Utilisation des normes enrobés à chaud » [2] pour une réutilisation classique dans les enrobés.

L'objectif de l'essai manège était de comparer les performances d'enrobé comprenant 50% de recyclés et des bio-additifs ou bio-liants avec celles d'un EME2, pris comme référence, et testé dans les mêmes conditions. Pour cela, 4 sections de chaussée, d'une largeur 4.5 mètres et d'une longueur comprise entre 22 et 30 mètres, avec la même structure, ont été testées sur le manège de fatigue de l'Université Gustave Eiffel à Nantes (figure 1). Une autre structure a aussi été testée durant cet essai mais ne sera pas présentée dans cet article [3].

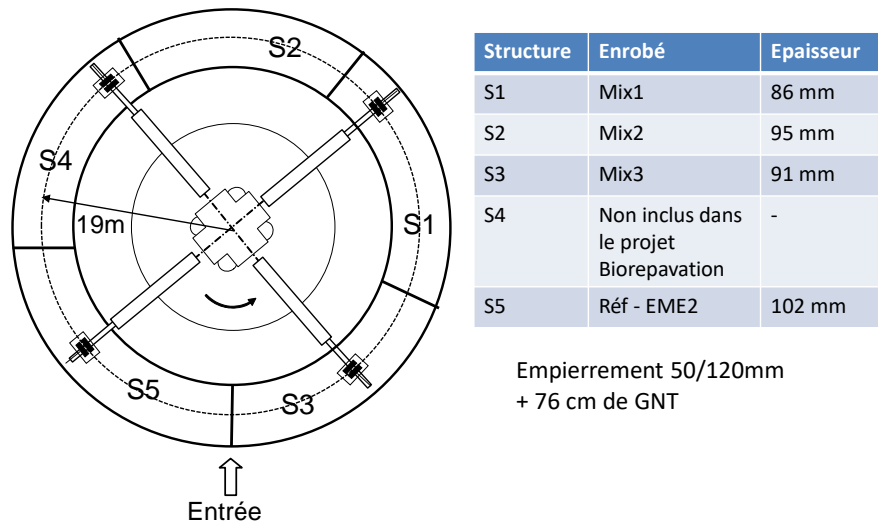


Figure 1. Disposition des structures testées sur le manège

Les structures de chaussée ont été initialement dimensionnées avec la méthode de dimensionnement française pour supporter un nombre de chargements acceptable dans les conditions de validation sur le manège de fatigue, soit maximum 1 million de cycles. Les caractéristiques mécaniques déterminées avec une étude de formulation en laboratoire pour chaque enrobé ont été utilisées (Tableau 1). En première approche, pour une même durée de vie avec une probabilité de rupture de 50 %, cela aurait du conduire à des épaisseurs différentes pour chaque section (entre 9 et 12 cm). Pour des raisons pratiques de réalisation des chaussées, une unique structure de chaussée a été retenue avec une épaisseur nominale de 9 cm d'enrobé. Le tableau ci-dessous reprend les principaux paramètres et résultats de calcul.

Tableau 1. Paramètres initiaux utilisés pour le dimensionnement

	EME	Mix1	Mix2	Mix3
Module complexe à 15°C et 10Hz	15 700 MPa	12 900 MPa	14 600 MPa	12100 MPa
Épaisseur	9 cm			
ϵ Alize	140 μ def	154.3 μ def	145.2 μ def	159.3 μ def
Fatigue, ϵ_0	132 μ def	113 μ def	84 μ def	107 μ def
ϵ_{adm} r=50%	136,3 μ def	150,8 μ strain	112,1 μ strain	142,7 μ strain
Risque à 10^6 cycles	58 %	56 %	96 %	77 %
Durée de vie théorique	$8,8 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^5$

De ce dimensionnement initial, les dégradations des structures auraient dues apparaître en premier pour le Mix2, suivi du Mix3, de l'EME2 et du Mix1 quasi au même ordre de grandeur. La figure 2 ci-dessous synthétise la prédiction de l'évolution du degré de dégradation pour chaque structure.

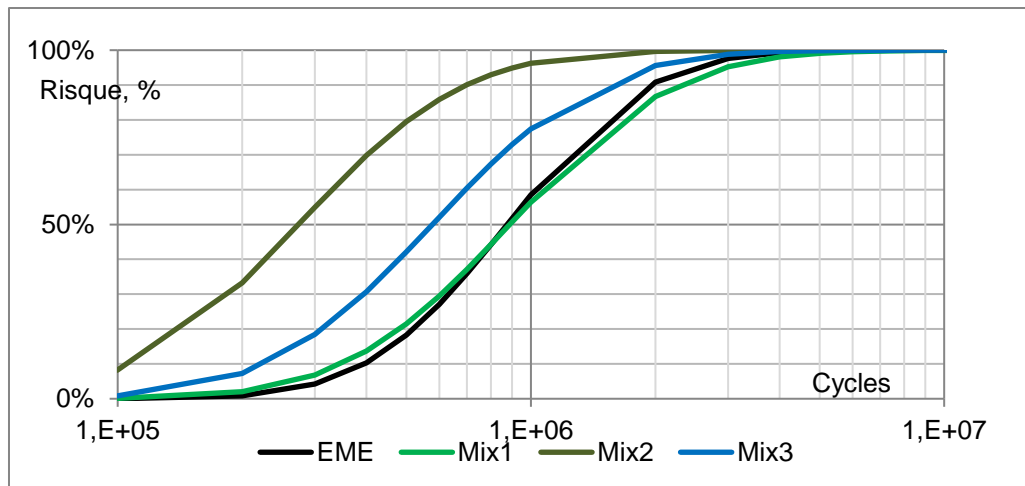


Figure 2. Prédiction de l'évolution des dégradations pour chaque structure

Les matériaux ont été fabriqués à l'usine enrobés « Touraine Enrobés » appartenant à Eiffage située à Tours, à environ 3 heures de transport. Son choix a été retenu car elle permettait un recyclage à fort taux. Les structures ont été construites par l'agence Eiffage d'Ancenis les 30 et 31 mai 2017. Selon la structure la couche d'enrobé est constituée de :

- 8.6 cm d'enrobé avec 50% de recyclés et d'additif Sylvaroad (Mix 1)
- 9.5 cm d'enrobé avec 50% de recyclés et de liant Biophalt (Mix2)
- 9.1 cm d'enrobé avec 50% de recyclés et d'additif EMS (Mix3)
- 10.2 cm d'EME2 avec 20% de recyclés, considéré comme structure de référence

Chaque structure était constituée d'un empierrement (50/120 mm) et d'une assise en GNT, réalisée en trois couches, avec une épaisseur totale de 76 cm. La portance a été mesurée à différentes positions sur chaque structure au moyen d'une dynaplaque. Les valeurs de portance obtenues variaient entre 63 et 86 MPa pour l'empierrement, et entre 103 et 111 MPa au sommet des couches de GNT.

Deux carottes ont été réalisées sur chaque structure, entre les deux bandes de roulement. Les pourcentages de vides mesurés au gammadensimètre sur les sections EME2, Mix1, Mix2 et Mix3 étaient respectivement de 3.4%, 3.3%, 1.6% et 2.0%.

Les compositions et les teneurs en liant des matériaux produits en centrale, ainsi que la formulation théorique type GB5 sont données dans le tableau 2 et sur la figure 3. Les granulométries réelles et théoriques étaient très proches, ce qui montre qu'il est possible de fabriquer ce type d'enrobés en centrale.

Tableau 2. Formulation et teneur en liant des enrobés produits en centrale

Enrobés	Mix1	Mix2	Mix3	Formule GB5 Théorique	EME2
Teneur en liant	4.49%	4.44%	4.36%	4.5%	5.26%
0/2 mm	17.3 %	17.7%	14.4%	19.6%	20.5%
2/4 mm	5.4%	5.3%	5.7%	5.1%	14.2%
4/6 mm	6.1%	5.9%	6.5%	6.2%	13.7%
6/10 mm	20.9%	22.6%	24.7%	21.0%	28.3%
10/14 mm	37.6%	36.8%	35.9%	33.9%	14.2%
14/20 mm	4.0%	3.2%	4.7%	6.8%	1.7%
Filler	8.8 %	8.6 %	8.1 %	7.4%	7.4 %

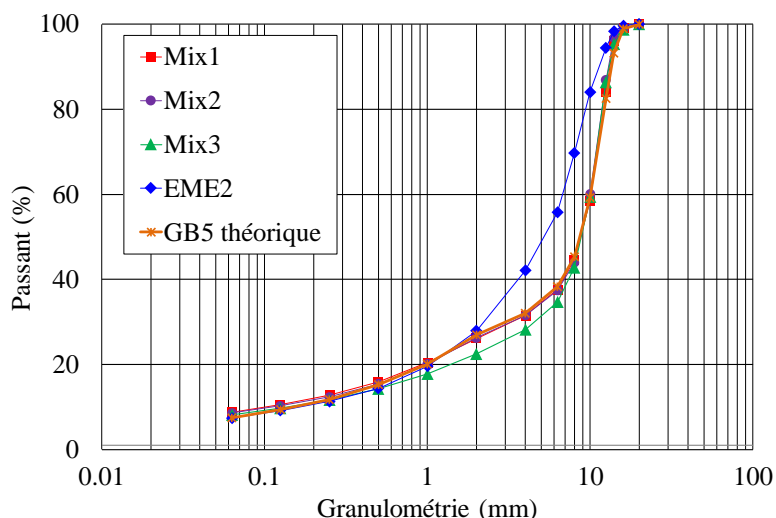


Figure 3. Granulométrie des matériaux produits en centrale et courbe théorique de formule de GB5

Durant la construction, des matériaux ont été prélevés afin de réaliser des essais de module et de fatigue. Le tableau 3 présente les valeurs de module, fatigue et orniérage des enrobés formulés en laboratoire et celles de module et de fatigue des enrobés produits en centrale.

On observe que pour tous les matériaux, les modules obtenus avec les enrobés fabriqués en centrale sont plus importants que ceux des enrobés formulés en laboratoire. Pour la résistance en fatigue, exception faite de l'EME2 qui a un ϵ_6 un peu inférieur, les valeurs de ϵ_6 des enrobés produits en centrale sont toutes supérieures aux valeurs de fatigue des enrobés formulés en laboratoire. On peut donc conclure qu'il est possible de fabriquer en centrale des matériaux à hautes performances, intégrant un pourcentage élevé de recyclés et des bio-liant ou des bio-additifs.

Tableau 3. 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 (10°C et 25Hz)	Pourcentage d'ornièrage à 30 000 cycles (60°C)	Norme du module complexe (15°C et 10Hz)	Paramètres de résistance en fatigue (10°C et 25Hz)
EME2	15700 MPa	132 μ def	3.1 %	16770 MPa	126 μ def
Mix1	12860 MPa	113 μ def	5.6 %	14540 MPa	115 μ def
Mix2	14620 MPa	84 μ def	4.3 %	16200 MPa	100 μ def
Mix3	12100 MPa	107 μ def	3.7 %	16360 MPa	109 μ def

2.2 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 sous des charges de 65 kN (demi-essieux à roues jumelées)
- 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 sections. Il a donc été décidé de prolonger l'essai et d'appliquer 400 000 chargements supplémentaires, avec des charges plus importantes (75 kN), équivalents à 800 000 chargements à 65 kN.

Les conditions de l'essai sont précisées dans le tableau 4.

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 4. Condition d'essai pour les deux phases

	Essai d'orniérage	Essai de fatigue	
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

3 Comportement des structures sous le trafic du manège

3.1 Performances des structures testées durant l'essai d'orniérage

Durant l'essai d'orniérage, 200 000 chargements sous un demi-essieu standard chargé à 65 kN ont été appliqués uniquement lorsque la température de surface était supérieure à 30°C, ce qui représente environ 20 ans de trafic poids lourds (150 PL/jour) uniquement durant les périodes chaudes de l'année. Des conditions sévères ont été appliquées : températures élevées, vitesse faible et balayage transversal réduit.

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'ornière, 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'ornière moyennes (en %) durant l'essai est présentée sur la figure 4.

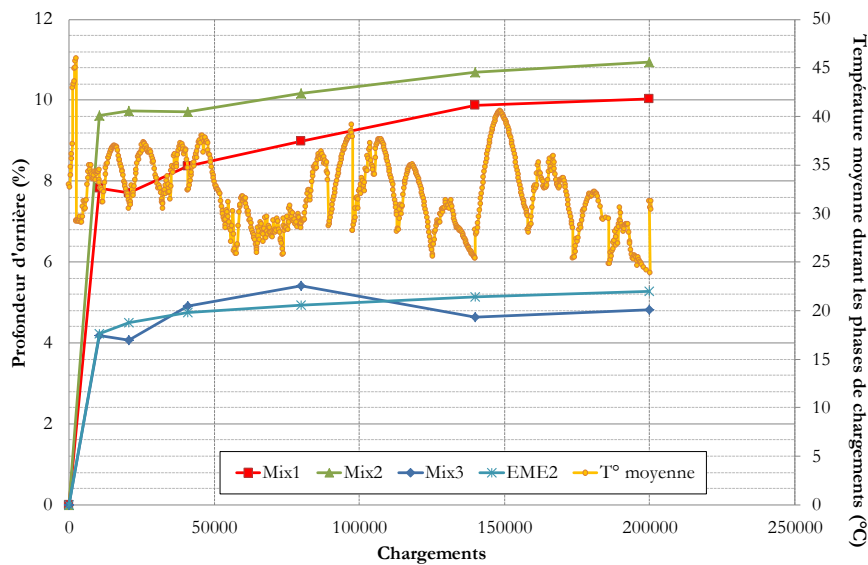


Figure 4. Evolution de l'orniérage durant l'essai

Le pourcentage d'orniérage, à la fin de l'essai était d'environ 5% pour l'EME2 et le Mix3. Il était un peu plus important pour le Mix2 (11%) et le Mix1 (10%).

A la fin de l'essai, il était possible de conclure que :

- La profondeur d'orniérage a augmenté rapidement sur toutes les sections durant les 10 000 premiers cycles. Cette augmentation rapide peut-être due à un post-compactage mais aussi aux températures élevées observées durant les 10 000 premiers cycles.
- Après 10 000 cycles, la profondeur d'orniérage a continué à augmenter, mais beaucoup plus lentement (environ 1% pour l'EME2 et le Mix3 et 2% pour le Mix2 et le Mix1). Les profondeurs d'ornières sont cependant relativement faibles. Cela indique des bonnes performances des matériaux.

Ces résultats sont cohérents avec les mesures en laboratoire : les matériaux présentant les meilleures performances sur le manège sont aussi ceux qui présentaient le meilleur comportement en laboratoire.

En fin d'expérience, des coupes transversales ont été réalisées sur les quatre sections, afin de mieux déterminer l'origine de l'orniérage. Les profils transversaux à la fin de l'essai, sur les deux sections, aux emplacements les plus orniérés sont présentés sur la figure 5. L'orniérage de la section en EME2, ainsi que de la section Mix3, peut être expliqué par un post-compactage de la GNT (orniérage à grand rayon). La profondeur d'orniérage maximale mesurée est d'environ 6 mm. Pour les sections Mix1 et Mix2, les profondeurs d'orniérage maximales mesurées sont respectivement de 11 et 12.5 mm. Il est possible de distinguer les traces des deux roues des demi-essieux du manège. Les structures Mix1 et Mix 2 se sont donc déformées sous l'effet du post-compactage de la GNT (environ 6 mm) et à cause de l'orniérage de l'enrobé (de 5 et 6.5 mm au maximum). Sachant que cet essai représente le trafic estival subit par une chaussée (150 poids lourd / jour) durant 20 ans, l'orniérage est donc très faible.

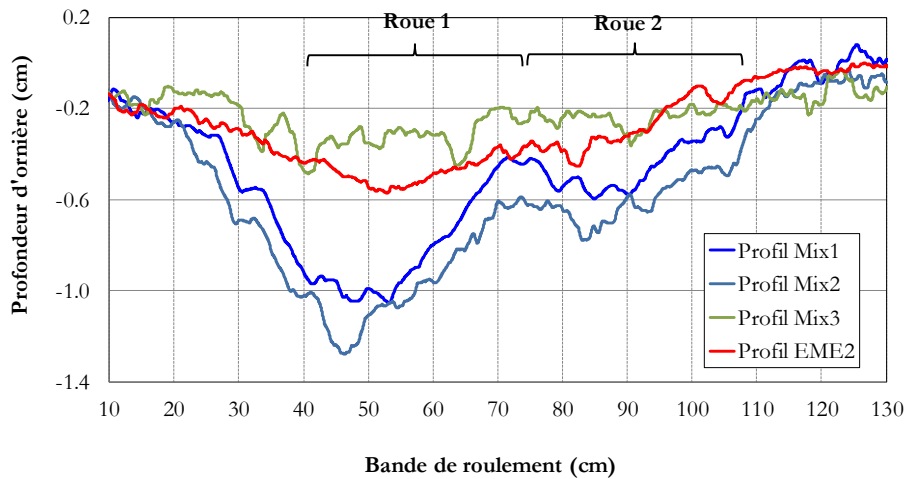


Figure 5. Profils transversaux à la fin de l'essai d'ornièrage

3.2 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 couches 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 déflexion 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 déflexion à la poutre Benkelman (4 ou 5 mesures par section), avant le début de l'essai, puis tous les 100 000 cycles.

3.2.1 Evolution de la fissuration

La figure 6 présente l'évolution de la fissuration, en fonction du nombre de cycles, sur les quatre sections.

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 Mix3, les premières fissures ont été observées à 1 million de chargements. A la fin de l'essai, le pourcentage de fissuration est de 10%.

Sur les sections Mix1 et Mix2, aucune fissure n'a été observée durant l'essai.

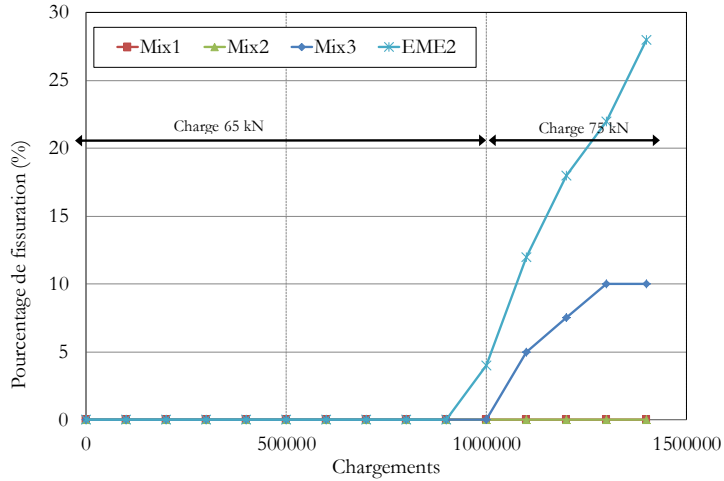


Figure 6. Evolution de la fissuration

Des photos des sections EME2 et Mix3 sont présentées sur la figure 7.

Sur ces sections, 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 [4].



(a) Section EME2



(b) Section Mix3

Figure 7. Photo des fissures sur la section EME2 (a) et sur la section Mix3 (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 les sections avec 50% de recyclés et des liants ou des additifs bio-sourcés présentent un comportement meilleur.

3.2.2 Mesures au FWD

Des mesures au FWD ont été réalisées durant tout l'essai. La figure 8 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 100k 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.

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 les sections EME2 et Mix3. 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 les sections EME2 et Mix3. Aucun pic n'a été observé sur les sections Mix1 et Mix2, ce qui montre que ces sections ne sont pas endommagées au bout de 1.4 million de cycles.

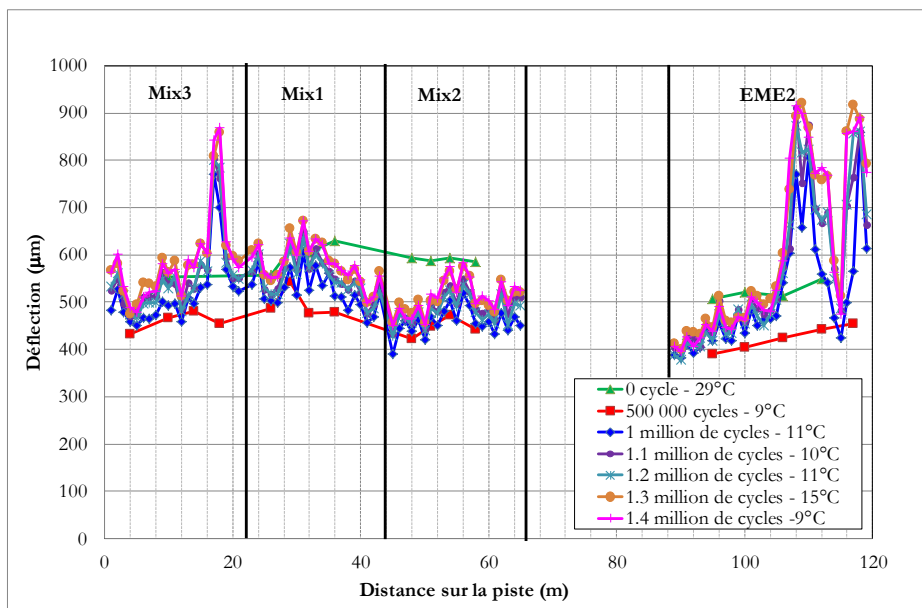


Figure 8. Evolution de la déflexion sur les quatre sections (mesures avec le FWD, géophone 1).

4 Interprétation des résultats pour le dimensionnement

4.1 Données expérimentales

Les résultats des mesures ont été utilisés pour définir un modèle pour chacune des quatre structures de chaussées 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 d'essais de laboratoire réalisés sur les matériaux fabriqués en centrale et prélevés lors du chantier (tableau 5)
- 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 présentées dans le tableau 5.

4.2 Détermination de la valeur du coefficient k_c

Appliquée aux matériaux bitumineux, la méthode de dimensionnement rationnelle [5] 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 :

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

Avec :

- $\varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz)$ 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 $10^\circ C$ et 25 Hz et b la pente de la droite de fatigue.
- 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_θ est le coefficient de correction en température permettant de prendre en compte l'effet de la température sur ε_6 :

$$(k_\theta = \sqrt{E(15^\circ C, 10Hz)/E(10^\circ C, 10Hz)})$$

- k_r est le coefficient de risque, fonction croissante du risque r , auquel est associé la probabilité de dégradation de la structure à l'instant t considéré et la dispersion des résultats de fatigue et des épaisseurs mises en œuvre.

Pour un niveau de trafic donné, représenté par le nombre d'essieux de référence NE, la probabilité de dégradation structurelle de la chaussée est connue. Il est traduit par le risque de rupture r , lui-même représenté par le coefficient k_r . Les valeurs des paramètres ε_6 , b , k_θ 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 [6].

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)
- Les épaisseurs des couches d'enrobés

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, et il a été obtenu une valeur $k_{har} = 1,18$. Un facteur de correction similaire avait été déterminé lors d'une expérience précédente, réalisée dans le projet Recyroute. La valeur du facteur de correction était alors de 1.1 [7].

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 [7].

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 pour les trois autres sections testées lors de cet essai. Les paramètres utilisés pour les calculs de dimensionnement sont donnés dans le tableau 5.

Aucun dommage n'a été observé sur les structures Mix1 et Mix2. 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%, afin d'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 5). Pour la structure Mix3 les calculs ont été réalisés avec un dommage de 10%.

Tableau 5. Paramètres de dimensionnement pour les quatre sections et résultats des calculs de dimensionnement

		EME2	Mix1	Mix2	Mix 3
Enrobés bitumineux	h	10.2 cm	8.6 cm	9.5 cm	9.1 cm
	E (15°C-10Hz)*	16770 MPa	14540 MPa	16200 MPa	16360 MPa
	E (10°C-10Hz)*	20180 MPa	18560 MPa	21150 MPa	20020 MPa
	ϵ_{6^*}	126 μ def	115 μ def	100 μ def	109 μ def
	b*	-0.178	-0.190	-0.176	-0.156
	Sh	8 mm	8 mm	8 mm	6mm
	SN*	0.187	0.234	0.193	0.194
GNT	h	76 cm	76 cm	76 cm	76 cm
	E	160 MPa	160 MPa	160 MPa	160 MPa
Sol	h	3 m	3 m	3 m	3 m

	E (MPa)	85 MPa	90 MPa	95 MPa	90 MPa
	k_s	1	1	1	1
Déformation ϵ_{tmax}	ϵ_{tmax}	137.9 μ def	179.0 μ def	151.4 μ def	157.6 μ def
Nombre d'essieux équivalent NE	NE (65 kN)	1 893 987	1 849 098	1 901 696	2 000 986
Niveau de dommage observé		28 %	<1%	<1%	10 %
kc calculé à partir des dommages observés			2.13	1.99	1.68
khar facteur de correction essai manège			1.18	1.18	1.18
kc après correction			1.80	1.69	1.42
kc recommandé pour le dimensionnement			1.3	1.3	1.3

* issus des essais en laboratoire sur matériaux chantiers

Avec ces valeurs, et en tenant compte du facteur de correction dû à l'essai manège (k_{har}), une valeur de $k_c=1.3$ est recommandée pour le dimensionnement de ces enrobés innovants.

5 Conclusion

Trois enrobés de structure, incorporant 50% d'agrégats et trois produits bio-sourcés, ont été formulés en laboratoire puis testés en vraie grandeur sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR. L'évaluation accélérée montre que leurs performances en orniérage et en fatigue sont au moins équivalentes, voire meilleures, à celle d'un enrobé de référence (EME2). L'emploi de matériaux issus de la chimie verte et d'un fort de taux de recyclage constitue donc une solution durable pour la réalisation des couches structurantes de chaussée si les enrobés sont correctement formulés. Cependant, on note que l'essai traditionnel de formulation de fatigue sur éprouvette trapézoïdale ne semble pas prédire correctement le comportement des matériaux non-conventionnels. Il sera nécessaire de rester vigilant sur ce point pour ne pas nuire aux futures innovations testées uniquement en laboratoire. L'essai en vraie grandeur apparaît ici indispensable pour évaluer de manière pertinente ces matériaux qui sortent du cadre habituel. En outre, il a permis de définir, à partir de la méthode rationnelle de calcul du comportement mécanique des chaussées, un coefficient de calage recommandé de $k_c=1.3$, qui peut être appliqué pour ces enrobés bio-sourcés.

6 Références

[1] Chailleux E., Bessmann E., Lo Presti D., Jimenez del Barco Carrion A., Porot L., Pauli T., Planche J.P., Williams C., Cochran E., Ng-Puga K.L., Pouget S., Olard F., Hornych P., *Projet Biorepavation : Innovations dans le recyclage des chaussées bitumineuses utilisant des matériaux bio-sourcés*. Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, n° 938, juillet-aout 2016.

[2] Guide technique « Utilisation des normes enrobés à chaud », SETRA, Janvier 2008

[3] Blanc J., Hornych P., Pouget S., Olard F., Dumond H., « L'expérience GB5® sur le manège de fatigue », Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, n°967, Octobre 2019.

[4] 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

[5] NF P 98-086, Norme française : Dimensionnement structurel des chaussées routières : application aux chaussées neuves, octobre 2011

[6] 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.

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