Evaluation en laboratoire de la performance mécanique des couches d'accrochage

Malick Diakhaté[*,] – Annabelle Phelipot-Mardelé[**] – Anne Millien[**] – Christophe Petit[**] – Bertrand Pouteau[*] – Honoré Goacolou[***] – Stéphane Faucon-Dumont[*]**

** Centre de Recherche & Développement EUROVIA, 22, rue Thierry Sabine, BP 20067, F-33703 Mérignac*
malick.diakhate@etu.unilim.fr, bpouteau@eurovia.com, sfaucondumont@eurovia.com
*** Laboratoire Mécanique et Modélisation des Matériaux et Structures du Génie Civil (3MsGC), 20, Bd J. Derche, F-19300 Egletons*
annabelle.phelipot-mardele@unilim.fr, anne.millien@unilim.fr, christophe.petit@unilim.fr
**** Direction des Techniques et de la Promotion, EUROVIA-RUEIL, 18, Place de l'Europe, F-92565 Rueil-Malmaison Cedex*
hgoacolou@eurovia.com

RÉSUMÉ : *Depuis ces vingt dernières années, une attention toute particulière est portée à l'étude du comportement mécanique des interfaces dans les structures de chaussée. En effet, il est observé, sur certaines structures à couche de roulement très mince, des phénomènes de décollement en plaque de la couche de roulement, et ce malgré la mise en œuvre d'une couche d'accrochage à l'interface des couches d'enrobés pour en assurer leur collage. Le travail présenté dans cet article vise à caractériser le comportement mécanique des couches d'accrochage à travers des essais monotones de torsion. Les essais ont permis d'analyser l'effet de la température d'essai et de la vitesse de sollicitation sur la performance de l'émulsion, et de proposer une loi de comportement mécanique en torsion de l'interface.*

ABSTRACT: *Interface shear performance has been widely investigating for the last twenty years. The behaviours of in-service pavements, particularly those with a very thin wearing course, show several premature distresses that may be due to a lack of bonding at the interlayer, even though tack coat was spread between bituminous layers to ensure their bonding. The research work presented in this paper deals with the characterization of tack coats behaviour through laboratory monotonic torque tests. Effects of testing temperature and loading rate level on the interface shear strength have been investigated. A constitutive law is proposed, thus, to describe the interface torque-shear behaviour before failure.*

MOTS CLÉS : *Interface, couche d'accrochage, torsion, essais en laboratoire, chaussées*

KEYWORDS: *Interface, tack coat, torque-shear, laboratory tests, pavements*

1. Introduction

Depuis ces vingt dernières années, une attention toute particulière est portée sur l'étude du comportement mécanique des interfaces dans les structures de chaussées (Uzan *et al.*, 1978, Mohammad *et al.*, 2002, Diakhaté *et al.*, 2004, Canestrari *et al.*, 2005). La chaussée est une structure composite réalisée par empilement de couches de matériaux liées entre elles par des couches d'accrochage. En l'absence d'un niveau de collage suffisant aux interfaces, ces couches de chaussée présentent des taux de travail plus élevés. Des phénomènes de dégradation peuvent alors apparaître à la surface de la chaussée, réduisant sa durée de vie. En effet, il est observé sur certaines structures à couche de roulement très mince (épaisseur 25 mm) voire ultra mince (épaisseur 15 mm), en particulier après des périodes de gel/dégel, des phénomènes de décollement en plaque de la couche de roulement, et ce malgré la mise en œuvre d'une couche d'accrochage à l'interface.

Au cours de la réalisation de la chaussée, la mise en œuvre d'une couche d'accrochage (type émulsion bitumineuse) à l'interface de deux couches d'enrobés bitumineux est une technique courante pour assurer le collage. Cependant, en France, aucune spécification quantitative n'est faite sur la performance mécanique de la couche d'accrochage. Vis-à-vis du dimensionnement des structures de chaussée, de manière conventionnelle et basée sur des retours d'expériences, l'état de l'interface est considéré parfaitement collé, glissant ou semi-collé (LCPC 1994).

Le travail présenté dans cet article expose une partie du projet de recherche réunissant le laboratoire 3MsGC et le Centre de Recherche & Développement EUROVIA. Une des problématiques de ce projet est de proposer une méthode d'analyse qui permet d'estimer le comportement mécanique en fatigue de la couche d'accrochage à partir de résultats d'essais monotones simples et rapides à réaliser. La partie expérimentale de ce projet consiste alors en la réalisation d'essais monotones (cisaillement et torsion) et d'essais de fatigue (cisaillement) de manière à couvrir la gamme de chargements répétés allant de 1 à 10^6 cycles.

La première partie de la campagne expérimentale concernant les essais de torsion est présentée dans cet article. Les deux couches d'enrobés des éprouvettes sollicitées sont collées par une émulsion bitumineuse.

2. Etude expérimentale

Dans ce travail, le niveau de collage à l'interface des couches d'enrobés est quantifié à partir d'essais monotones de torsion. Cet essai de torsion a l'avantage d'être réalisable aussi bien en laboratoire qu'in situ. Le principe de l'essai est de générer par torsion des contraintes de cisaillement à l'interface d'une éprouvette cylindrique bimatériaux collée sur des casques métalliques. Cet essai est pratiqué en

Grande Bretagne, mais aucune normalisation n'est encore disponible sur la procédure expérimentale.

La thématique abordée lors de cette partie expérimentale est l'analyse de l'effet des paramètres d'essais notamment la température (10°C et 20°C) et la vitesse de sollicitation (0,002 à 5 MPa/s afin d'obtenir des temps de rupture d'interface de 1s à 1000 s) sur la performance mécanique de l'émulsion bitumineuse.

2.1. *Matériaux et éprouvettes*

2.1.1. *Matériaux*

La couche d'accrochage étudiée pendant cette partie expérimentale est de type émulsion bitumineuse à rupture rapide de classe C65B4 selon la norme prEN 13808:2004 (F). Elle est dosée à 65% d'un bitume pur de grade 35−50, et uniformément répandue à raison de 300 g/m² de bitume résiduel.

Deux types d'enrobés bitumineux sont utilisés pour fabriquer les éprouvettes. Quelques caractéristiques du béton bitumineux semi grenu (BBSG) et du béton bitumineux très mince (BBTM) sont présentées dans le tableau 1. Le liant, bitume identique à celui de l'émulsion, est dosé en pourcentage de granulats secs.

Tableau 1. *Caractéristiques des couches d'enrobés bitumineux*

				Valeurs cibles	
Couche	Enrobés	Granularité	Dosage en liant	Epaisseur	% des vides
Supérieure	BBTM	0 – 10 mm	5,6 p.p.c.	30 mm	12
Inférieure	BBSG	0 – 10 mm	6,0 p.p.c.	50 mm	7

2.1.2. *Fabrication et préparation des éprouvettes*

Les éprouvettes à tester sont de forme cylindrique, de diamètre 100 mm et de hauteur 80 mm, et obtenues par carottage à l'eau d'une plaque bicouche. Celle-ci est réalisée en laboratoire au moyen d'un compacteur de plaque (NF EN 12697-33) avec un moule de dimensions en plan 400 mm x 600 mm et d'épaisseur 150 mm.

Les matériaux (granulats et bitume) nécessaires à la fabrication du BBSG sont mélangés dans un malaxeur à 160°C puis compactés dans le moule pour obtenir une épaisseur de 50 mm. Après deux heures de repos (température de l'enrobé à 45°C), l'émulsion bitumineuse est uniformément répandue à la surface de la couche de BBSG. Un temps d'attente de deux heures est observé afin d'atteindre la rupture de l'émulsion et l'évaporation de sa phase aqueuse. Puis la couche de BBTM est mise en œuvre pour obtenir une épaisseur de 30 mm après compactage.

Un plan de carottage permet d'extraire dix éprouvettes par plaque bicouche. Ces éprouvettes, numérotées, sont par la suite placées dans une étuve à 18°C et à 50% d'humidité relative pour séchage. Puis, au moyen d'un banc gammadensimétrique (NF P 98-250-5), sur chaque éprouvette, la masse volumique apparente de chaque couche d'enrobé est mesurée. Par extension, on en déduit les pourcentages des vides correspondants : 7,4% ± 0,8 pour le BBSG et 9,0% ± 2,1 pour le BBTM, valeurs dans les normes (NF P 98-130 et XP P 98-137).

La phase de préparation de l'éprouvette consiste à coller des casques métalliques à ses extrémités. Les éprouvettes sont par la suite stockées, pendant une nuit, dans une étuve à la température d'essai (10 ou 20°C). Deux heures avant l'essai, l'éprouvette préparée est fixée sur le dispositif de torsion avant de l'installer dans le caisson isotherme de la machine d'essai servo-hydraulique (Illustration 1).

Illustration 1. *Préparation et mise en place de l'éprouvette*

3. Résultats et interprétation

Pour chaque essai de torsion, le système d'acquisition de la machine d'essai enregistre les valeurs de l'effort de traction F et du déplacement vertical de la chaîne en fonction du temps. Les vitesses de sollicitation sont constantes et exprimées en MPa/s. La sollicitation de torsion génère des contraintes de cisaillement τ dans l'éprouvette. En particulier, dans le plan de l'interface des enrobés, la contrainte maximale de cisaillement τ_{max} peut être exprimée sous la forme [1]. Cette formule est issue de la théorie de la torsion d'un cylindre plein.

$$\tau_{\max} = \frac{16 \cdot F \cdot R}{\pi \cdot d^3} \qquad [1]$$

Avec :
- F : effort de traction appliqué pour générer la sollicitation de torsion ;
- R : rayon du disque de transmission de l'effort de traction (60 mm) ;
- d : diamètre de l'éprouvette.

3.1. *Effets des paramètres d'essais sur la performance de l'émulsion*

22 résultats d'essais de torsion ont été exploités et représentés graphiquement en Figure 1. Vis-à-vis de l'analyse visuelle des modes de rupture des éprouvettes, les résultats montrent, qu'à 20°C et quelle que soit la vitesse de sollicitation, les faciès de rupture sont localisés à l'interface (Illustration 2–c), alors qu'à 10°C, les fortes vitesses de sollicitation conduisent à l'arrachement d'un bloc d'enrobés au voisinage de l'interface (comparer Illustrations 2–a et 2–b). Cette dernière observation laisse penser qu'à basse température, la couche d'enrobés est aussi fragile que l'interface. Cet arrachement est influencé par l'effet combiné de la vitesse de sollicitation et du phénomène d'engrainement des granulats à l'interface.

a) Essai à 10°C, 3,06 MPa/s | b) Essai à 10°C, 0,31 MPa/s | c) Essai à 20°C, 4,58 MPa/s

Illustration 2. *Différents faciès de rupture en fonction des paramètres d'essais*

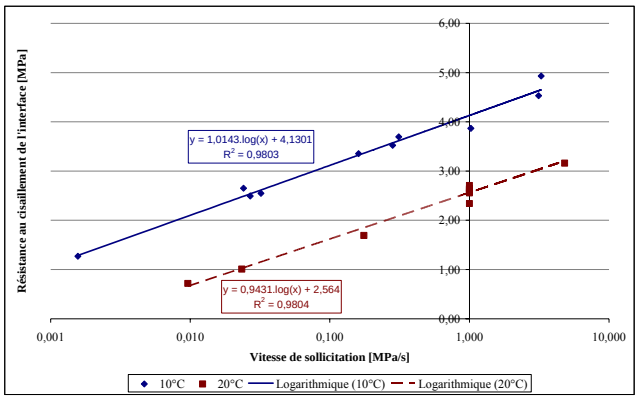

Figure 1. *Effet des paramètres d'essai sur la performance de l'émulsion*

Sur la Figure 1, sont représentées graphiquement les valeurs de résistance au cisaillement de l'interface ($\tau_{max}^{R} \equiv \tau_{max}$ lorsque $F = F_{max}$) en fonction du logarithme

décimal de la vitesse de sollicitation ($\dot{\tau}_{max}$) et de la température d'essai. Comme pour les matériaux à comportement viscoélastique, on remarque que la résistance au cisaillement de l'interface augmente linéairement avec le logarithme du niveau de sollicitation, mais décroît avec l'augmentation de la température d'essai.

Dans la gamme de vitesses de sollicitation appliquées (0,002 MPa/s à 5 MPa/s), les pentes des droites de régression, tracées pour les résultats à 10°C et 20°C, sont quasiment identiques, et proches de 1 (Figure 1).

3.2. *Loi de comportement mécanique de l'interface*

En vue d'implémenter le comportement en torsion de l'interface entre couches d'enrobés dans un outil de calcul, les résultats d'essais sont exploités pour construire une loi de comportement mécanique de l'émulsion étudiée. Cette exploitation des résultats permet de représenter graphiquement les valeurs de contraintes de cisaillement à l'interface en fonction de l'angle de rotation relative de l'éprouvette (Figure 2). Compte tenu des modules d'élasticité des enrobés aux températures et vitesses d'essai, la théorie de la torsion montre que la part de rotation des matériaux de chaque côté de l'interface pourrait être négligée en première approximation.

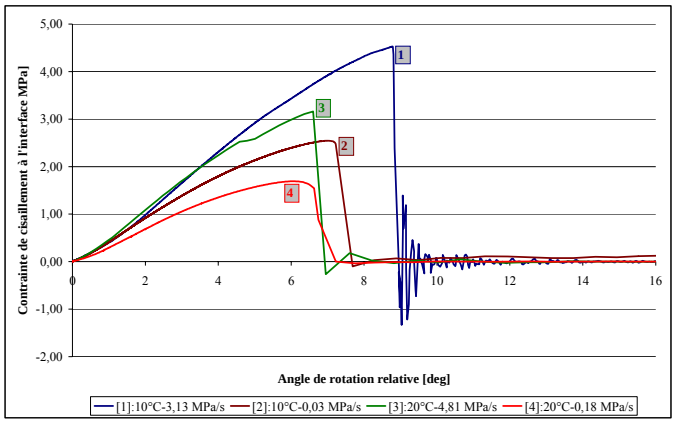

Figure 2. *Contrainte de cisaillement à l'interface en fonction de l'angle de rotation*

Dans la littérature, les lois de comportement proposées (Goodman *et al.*, 1968) pour décrire, avant rupture, le comportement en cisaillement de l'interface entre deux solides, partent de l'hypothèse que la contrainte de cisaillement à l'interface (τ) est linéairement liée au déplacement relatif tangentiel (Δu) entre couches par une raideur au cisaillement (Ks). Cette valeur de Ks représente la pente de la courbe τ - Δu. Par similarité à l'essai de torsion, on peut écrire [2] :

$$\tau_{\max} = K_{ts}^{'} \cdot \Delta u = K_{ts}^{'} \cdot \left(r \cdot \Delta\alpha\right) \qquad \Rightarrow \qquad \tau_{\max} = K_{ts} \cdot \Delta\alpha \qquad [2]$$

Avec :

– Δu : déplacement relatif vertical ;
– $\Delta\alpha$: Angle de rotation relative en tête d'éprouvette ;
– K_{ts} : raideur apparente en torsion de l'interface.

A partir de la Figure 2, on admet que la valeur de la raideur apparente en torsion de l'interface K_{ts} est calculée sur une portion linéaire du graphe selon l'expression :

$$K_{ts} = \frac{\frac{\tau_{\max}^{R}}{3} - \frac{\tau_{\max}^{R}}{10}}{\Delta\alpha_2 - \Delta\alpha_1} \qquad [3]$$

Avec :

– $\tau_{\max}^{R}$: Résistance au cisaillement de l'interface ;
– $\Delta\alpha_1$: Angle de rotation relative calculé à $\frac{\tau_{\max}^{R}}{10}$;
– $\Delta\alpha_2$: Angle de rotation relative calculé à $\frac{\tau_{\max}^{R}}{3}$.

La Figure 3 présente, pour chaque température d'essai, les valeurs de raideur apparente en torsion (K_{ts}) en fonction du logarithme décimal de la vitesse de sollicitation ($\dot{\tau}_{\max}$). On remarque que les résultats sont assez dispersés, surtout à 10°C.

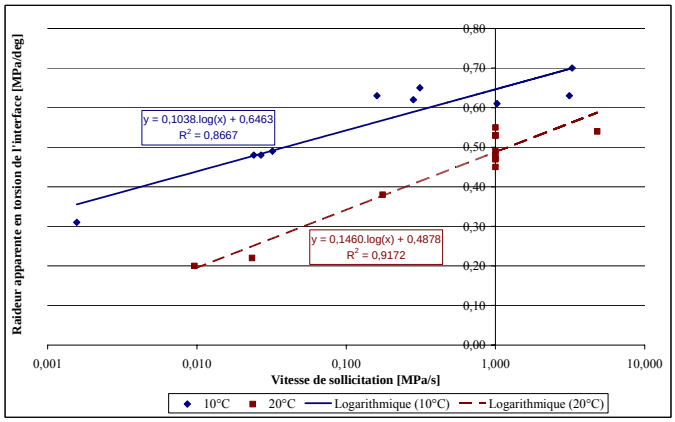

Figure 3. *Raideur apparente en torsion de l'interface en fonction du logarithme de la vitesse de sollicitation*

4. Conclusion

La quantification du niveau de collage à l'interface de deux couches d'enrobés bitumineux permet de classer les couches d'accrochage suivant le critère de performance mécanique apportée à la structure de chaussée.

Dans cet article, des éprouvettes cylindriques composées de deux couches d'enrobés collées par une émulsion bitumineuse sont sollicitées en torsion. L'étude expérimentale vise à analyser les effets de la température d'essai et de la vitesse de sollicitation sur le niveau de collage de l'interface.

Les résultats de l'étude expérimentale montrent, que pour la combinaison de matériaux sollicités, la résistance au cisaillement de l'interface augmente linéairement avec le logarithme décimal de la vitesse de sollicitation (0,002 MPa/s à 5 MPa/s), mais décroît lorsque la température d'essai passe de 10°C à 20°C. Ces observations sont bien caractéristiques du comportement des matériaux bitumineux.

Les résultats d'essais ont également permis de proposer une loi de comportement mécanique en torsion des interfaces. Avant rupture, cette loi est pilotée par la valeur de la raideur apparente en torsion de la couche d'accrochage. Ces résultats serviront à une modélisation numérique de l'essai de torsion pour déterminer la part de rotation propre à l'interface.

L'essai de torsion est pratique pour classer les couches d'accrochage suivant leur performance mécanique. Cependant, ce classement est plus rigoureux lorsqu'on intègre le comportement mécanique à la fatigue des couches d'accrochage. Une campagne expérimentale est en cours, et vise à caractériser le comportement en fatigue par cisaillement d'une émulsion de classe C65B4 (bitume de grade 70/100).

5. Bibliographie

Canestrari F., Ferrotti G., Partl M. N., Santagata E., « Advanced testing and characterization of interlayer shear resistance », *TRB annual meeting*, 84th, January 9-13th, 2005, 26 p.

Diakhaté M., Millien A., Phelipot A., Petit C., « Comportement à la fatigue en cisaillement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée », *22ème rencontres universitaires de génie civil*, Université Marne-la-vallée, 3-4 juin 2004, 8 p.

Goodman R. E., Taylor R. L., Brekke T. L., « A model for the mechanics of jointed rock », *Journal of soil mechanic and foundations division*, ASCE 99, 1968, p. 637-659.

LCPC-SETRA, *Conception et dimensionnement des structures de chausses, guide technique*, Paris, 1994.

Mohammad L. N., Raquib M. A., Huang B., « Influence of asphalt tack coat materials on interface shear strength », *Transportation Research Record*, N°1789, 2002, p. 56-65.

Uzan J., Livney M., Eshed Y., « Investigation of adhesion properties between asphaltic concrete layers », *Proceedings asphalt paving technology*, vol. 47, 1978, p. 495-521.