
Comportement en cisaillement des couches d'accrochage : comparaison entre essais monotones de cisaillement et de torsion

Malick Diakhaté^{*,**} – Annabelle Phelipot-Mardelé^{*} – Anne Millien^{*} – Christophe Petit^{*} – Bertrand Pouteau^{**} – Honoré Goacolou^{**}

^{*} Laboratoire Mécanique et Modélisation des Matériaux et Structures du Génie Civil (3MsGC), 20 Bd J. Derche, F-19300 Egletons

malick.diakhate@etu.unilim.fr, annabelle.phelipot-mardele@unilim.fr,
anne.millien@unilim.fr, christophe.petit@unilim.fr

^{**} EUROVIA, Centre de Recherche de Mérignac, 22 rue Thierry Sabine, BP 20067, F-33703 Mérignac

bpouteau@eurovia.com, hgoacolou@eurovia.com

RÉSUMÉ : La chaussée est une structure réalisée par empilements successifs de couches de matériaux. Lors du dimensionnement, l'état de collage aux interfaces conditionne les niveaux de contraintes et de déformations dans chaque couche de la structure, et par conséquent, la durée de vie des matériaux mis en œuvre. L'évaluation de la performance mécanique du collage à l'interface de deux couches est donc un paramètre très important pour une analyse plus rationnelle de la durabilité des structures de chaussée. Le travail présenté dans cet article traite de la caractérisation du comportement mécanique d'une couche d'accrochage, assurant le collage de deux couches d'enrobés bitumineux au travers d'essais monotones de torsion et de double cisaillement direct réalisés à deux niveaux de température (10 et 20°C) et à des vitesses de sollicitation comprises entre 0,002 MPa/s et 5 MPa/s. Les résultats obtenus mettent en évidence le comportement viscoélastique du produit testé, et montrent que les valeurs de résistance au cisaillement obtenues lors des essais de torsion et de cisaillement direct ne peuvent être corrélées que sous certaines conditions expérimentales.

ABSTRACT: Pavement is a multi-layered structure. The bonding level at the interface strongly affects the stresses and strains distribution within each layer, and by extension, the lifetime of the structure. Interface shear performance between two layers is of great importance for analysing more accurately pavement response to traffic load. The research work presented in this paper consists in characterizing the interface monotonic shear behaviour between two hot-mix asphalt layers bonded with tack coat. Laboratory monotonic tests are conducted in order to quantify and compare the interface responses under direct shear loading and torque loading. Based on tests performed on the materials combination studied, this paper gives some testing conditions where direct double shear and torque tests results are similar.

MOTS CLÉS : Chaussées, interface, couche d'accrochage, torsion, double cisaillement direct.

KEYWORDS: Pavements, interface, tack coat, torque test, double shear test.

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). Dans ces structures de chaussée, et selon les règles de dimensionnement en vigueur (LCPC 1994), les couches en matériaux traités aux liants hydrauliques sont considérées comme parfaitement collées entre elles pendant toute la durée de vie de la chaussée. Ce collage est réalisé, sur chantier, par la mise en œuvre de couches d'accrochage à base de bitume pur ou modifié. En l'absence d'un niveau de collage suffisant aux interfaces, ces couches de chaussée présentent des taux de travail plus élevés, et des phénomènes de dégradation peuvent alors apparaître rapidement à la surface de la chaussée, réduisant sa durée de vie. Il est, par exemple, observé sur certaines structures à couche de roulement très mince (épaisseur 25 mm) voire ultra mince (épaisseur 15 mm), sur des zones fortement sollicitées en cisaillement (virages, accélération-freinage, etc.), 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.

Le travail présenté dans cet article expose une partie du projet de recherche réunissant le laboratoire 3MsGC et le Centre de Recherche 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 direct et torsion) et d'essais de fatigue (cisaillement direct) de manière à couvrir la gamme de chargements répétés allant de $\frac{1}{4}$ (monotone) à 10^6 cycles.

La première partie de cette campagne expérimentale concernant les résultats obtenus lors des essais monotones est présentée dans cet article.

2. Campagne expérimentale

Le comportement d'un complexe enrobé/couche d'accrochage/enrobé est fortement influencé par les niveaux de sollicitation mécanique et thermique. Dans cet article, l'effet de ces paramètres sur le comportement en cisaillement d'une couche d'accrochage est analysé à travers deux essais monotones de laboratoire : l'essai de double cisaillement et l'essai de torsion.

2.1. Essais monotones de double cisaillement et de torsion

Dans la littérature, le comportement en cisaillement du collage entre enrobés est fréquemment caractérisé à partir d'essais monotones de cisaillement direct réalisés sur des éprouvettes composées de deux couches d'enrobés collées ou non par une couche d'accrochage (Mohammad *et al.*, 2002, Canestrari *et al.*, 2005). Afin de symétriser l'essai de cisaillement (géométrie et sollicitation), le laboratoire 3MsGC de l'Université de Limoges a adopté l'essai de double cisaillement (DC), initialement développé pour évaluer l'endommagement par cisaillement des enrobés, et adaptable pour l'étude du comportement en cisaillement des interfaces. L'essai DC est réalisé sur une éprouvette composée de trois couches, deux à deux collées par une couche d'accrochage. Le comportement en cisaillement d'une interface peut également être appréhendé à travers des essais monotones de torsion. Ceux-ci ont l'avantage de pouvoir être réalisés sur des carottes directement prélevées sur chaussée après construction ou fabriquées en laboratoire.

2.2. Matériaux et éprouvettes

La couche d'accrochage testée dans cette étude est une émulsion bitumineuse classique à rupture rapide de type C65B4 selon la norme prEN 13808:204(F). Elle est dosée à 65% de bitume pur de grade 35/50 et uniformément répartie à raison de 300 g/m² de bitume résiduel. La couche d'accrochage est mise en œuvre à l'interface de deux couches d'enrobés formulés différemment mais avec un bitume identique à celui de l'émulsion. Quelques caractéristiques des bétons bitumineux semi grenu (BBSG) et très mince (BBTM) sont présentées dans le Tableau 1.

Suivant le type d'essai, les éprouvettes de forme prismatique ou cylindrique sont prélevées sur une plaque fabriquée en laboratoire au moyen d'un compacteur de plaque (NF EN 12697-33) dans 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 à la surface de l'enrobé : 45°C), l'émulsion bitumineuse est uniformément répartie 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. Par plaque bicouche, un plan de carottage (respectivement de sciage) permet d'extraire 11 éprouvettes de diamètre 100 mm et de hauteur 80 mm (respectivement 12 éprouvettes de dimensions 70 mm x 105 mm x 50 mm). Les éprouvettes sont par la suite collées sur les casques métalliques pour assurer la transmission des efforts.

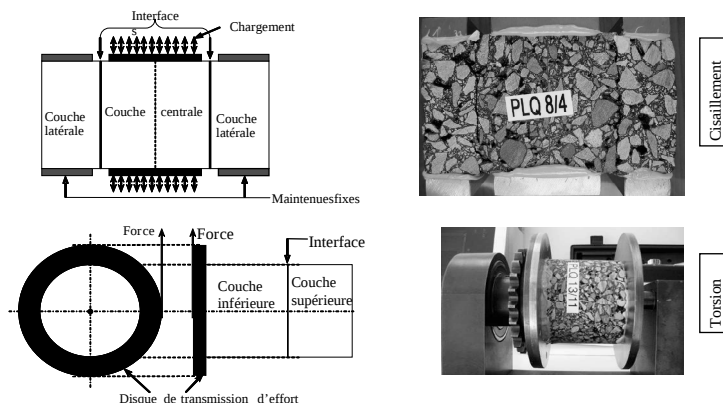


Figure 1. Principes d'essais de cisaillement et de torsion, et types d'éprouvettes

Tableau 1. Caractéristiques des couches d'enrobés bitumineux

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

Le programme expérimental consiste à réaliser, à 2 températures (10 et 20°C) et à vitesse de chargement imposée, 22 essais de double cisaillement (DC) et 22 essais de torsion. Les vitesses de sollicitation adoptées varient de 0,002 à 4,8 MPa/s.

3. Analyse des résultats d'essais

Pour chaque essai DC, les valeurs de force et de déplacement sont mesurées pendant l'essai par le capteur de force (capacité ± 100 kN) et le capteur LVDT (capacité ± 75 mm) de la machine d'essai. La valeur nominale (ingénieur) de la contrainte de cisaillement τ appliquée à l'interface est le rapport de la force mesurée à la section cisailée aux 2 interfaces. La valeur maximale prise par τ pendant l'essai représente la résistance au cisaillement de l'interface $\tau^{\max}$ et définit la rupture de l'interface. La Figure 2 montre, pour différentes valeurs de sollicitation, l'évolution de τ en fonction du déplacement relatif à l'interface.

Pour chaque essai de torsion, les valeurs de force et de déplacement vertical sont mesurées pendant l'essai dans les mêmes conditions que pour l'essai DC. En se basant sur la théorie de l'élasticité linéaire appliquée à un cylindre plein, la contrainte maximale de cisaillement τ_R à l'interface est définie comme suit [1] :

$$\tau_R = \frac{F \cdot D}{\pi \cdot R^3} \quad [1]$$

Avec :

- F : effort appliqué pour générer la sollicitation de torsion ;
- D : diamètre du disque de transmission de l'effort (120 mm) ;
- R : rayon de l'éprouvette (50 mm).

La Figure 3 montre, pour différents niveaux de sollicitation, l'évolution de τ_R en fonction du déplacement relatif sur la circonférence de l'interface. La valeur maximale atteinte par τ_R pendant l'essai représente la résistance au cisaillement $\tau_R^{\max}$ de l'interface.

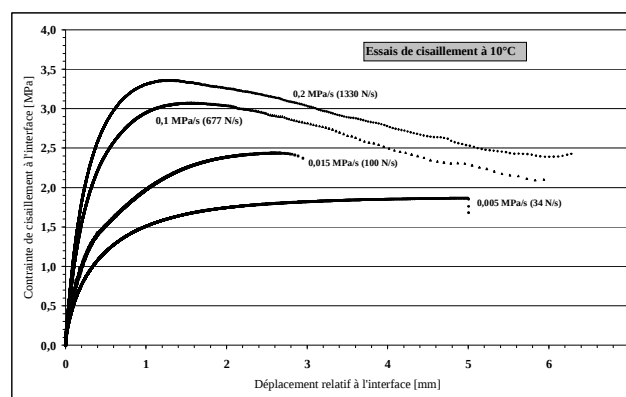


Figure 2. Contrainte de cisaillement – déplacement relatif à l'interface (DC)

Les graphes des Figures 2 et 3 montrent que pour des vitesses de sollicitation supérieures à 0,015 MPa/s, la résistance au cisaillement de l'interface est nettement mise en évidence, alors que dans les autres cas, on observe plutôt un palier. Le comportement de l'interface est clairement viscoélastique. La rupture des éprouvettes est toujours localisée au niveau de(s) l'interface(s).

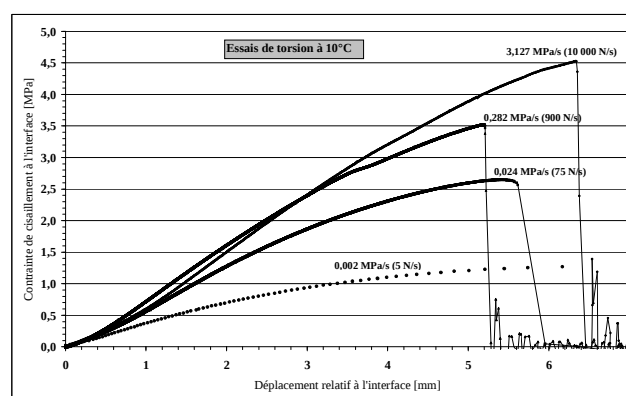


Figure 3. Contrainte de cisaillement – déplacement relatif à l'interface (torsion)

4. Comparaison des résultats d'essais de cisaillement et de torsion

4.1. Résistance au cisaillement de l'interface

Sur la Figure 4, pour les 2 types d'essais, cisaillement (DC) et torsion (T), les résultats d'essais montrent clairement que, dans un repère bi-logarithmique, la résistance au cisaillement de l'interface augmente linéairement avec la vitesse de sollicitation mais décroît lorsque la température d'essai croît. Pour les essais DC, en première approximation à 10 et 20°C, des ajustements par une loi puissance donnent de bonnes corrélations entre la résistance au cisaillement et la vitesse de sollicitation, et les coefficients obtenus sont presque identiques. De ce fait, pour la combinaison de matériaux étudiée, et pour une température entre 10 et 20°C, la résistance au cisaillement peut être prédite à partir de la vitesse de sollicitation.

Pour les essais de torsion, le même type d'ajustement donne également de bonnes corrélations, à 10 et 20°C, entre la résistance au cisaillement et la vitesse de sollicitation, mais les coefficients des fonctions puissances ne sont pas identiques. Par comparaison à l'essai DC, il est possible que la distribution non uniforme du champ de contrainte de cisaillement à l'interface crée la différence.

Lorsqu'on s'intéresse à la corrélation entre les résultats d'essais de cisaillement et de torsion, la Figure 4 permet de constater qu'à 10°C, les valeurs de résistance au cisaillement sont identiques quelque soit le type d'essai. Cependant, à 20°C, pour des vitesses de sollicitation inférieures à 1 MPa/s, un coefficient correcteur doit être pris en compte. Ces observations soulignent le caractère viscoélastique des produits testés, caractère qui est plus prononcé pour des températures d'essais élevées et de faibles vitesses de chargement.

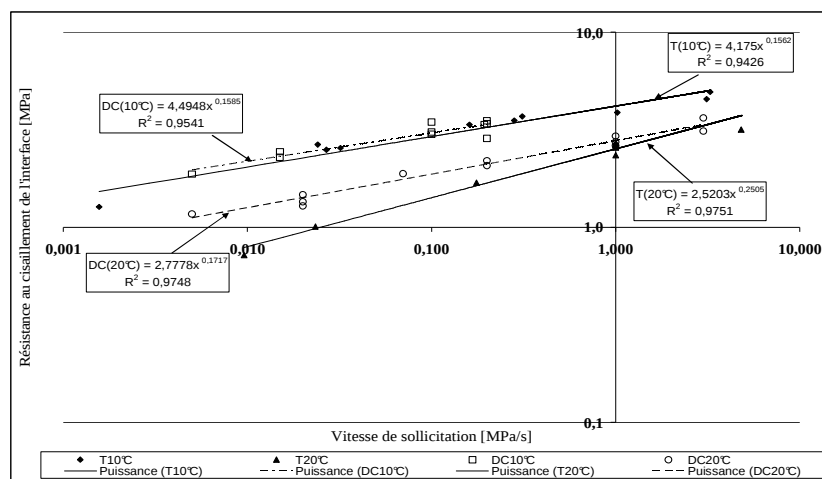


Figure 4. Résistance au cisaillement de l'interface – vitesse de sollicitation

4.2. Raideur au cisaillement de l'interface

La raideur au cisaillement de l'interface est un paramètre pertinent lorsqu'on souhaite modéliser le comportement mécanique de l'interface. Ce paramètre lie la contrainte de cisaillement au déplacement relatif à l'interface, et peut être défini de deux manières : raideur tangente (K_{STG}) ou raideur sécante (K_{SEC}). Dans cet article, on ne présente que les résultats de la raideur tangente de l'interface obtenus lors des essais DC. Pour les essais de torsion, la notion de raideur au cisaillement n'est pas abordée, le déplacement vertical mesuré est influencé par la déformation des couches d'enrobés. La valeur tangente de la raideur au cisaillement est calculée [2] sur une portion pseudo-linéaire du graphe contrainte de cisaillement – déplacement relatif à l'interface (Figure 2). Cette valeur de K_{STG} traduit le comportement en cisaillement monotone de l'interface avant rupture et pour de petits déplacements relatifs.

$$K_{STG} = \frac{\tau_{\max}/3 - \tau_{\max}/10}{\Delta u_3 - \Delta u_{10}} \quad [2]$$

Avec :

- $\tau_{\max}$: résistance au cisaillement de l'interface ;
- Δu_n : déplacement relatif correspondant à $\tau_{\max}/n$.

La Figure 5 montre, qu'à 10 et 20°C, les valeurs de K_{STG} peuvent être corrélées avec de la vitesse de sollicitation en utilisant des modèles de type lois puissances.

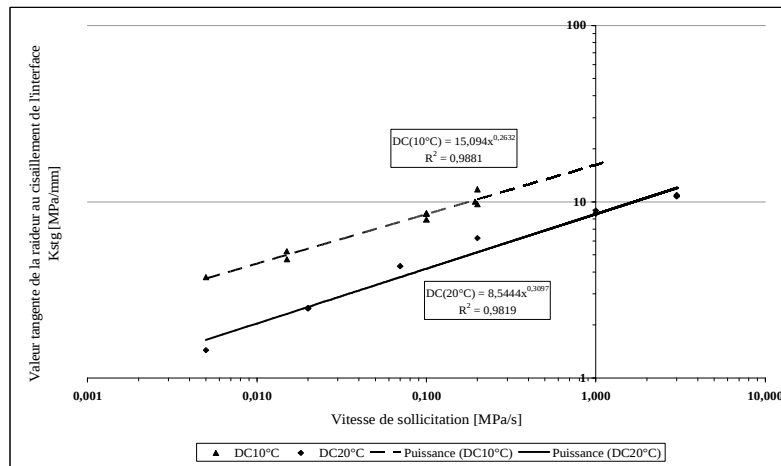


Figure 5. Raideur au cisaillement K_{STG} de l'interface – vitesse de sollicitation

5. Conclusion

Le travail présenté dans ce papier traite de la caractérisation du comportement en cisaillement monotone d'une émulsion au moyen de deux essais de laboratoire : double cisaillement et torsion. L'émulsion assure le collage de 2 couches d'enrobés. 44 éprouvettes ont été testées à 2 températures (10 et 20°C) et à plusieurs vitesses de sollicitation imposées (0,002 à 4,8 MPa/s).

A partir des résultats d'essais, on remarque que le comportement en cisaillement de l'émulsion, caractérisé par la résistance au cisaillement de l'interface, est fortement dépendant des niveaux de sollicitation mécanique et thermique. Cette observation fait ressortir le caractère thermo-viscoélastique de la combinaison de matériaux testée. L'interprétation des essais de cisaillement montrent, qu'à 10 et 20°C, des lois puissances, presque identiques, conduisent, en premières approximations, à de bonnes corrélations entre la résistance au cisaillement et la vitesse de sollicitation. De ce fait, on peut estimer la résistance au cisaillement de l'interface pour une température d'essai entre 10 et 20°C. On aboutit à ces mêmes conclusions en analysant les valeurs de raideur au cisaillement de l'interface.

En analysant les résultats d'essais de torsion, on remarque qu'à 10 et 20°C, des lois puissances conduisent à de bonnes corrélations entre la résistance au cisaillement de l'interface et la vitesse de sollicitation. L'essai de torsion présente l'avantage de pouvoir être réalisé sur des éprouvettes prélevées sur chaussées réelles ou fabriquées en laboratoire. Lorsqu'on s'intéresse à la comparaison entre les essais de torsion et de cisaillement, on note qu'à 10°C les valeurs de résistance au cisaillement sont identiques, alors qu'à 20°C, un facteur correctif doit être pris en compte lorsqu'on effectue des essais de torsion à des vitesses de sollicitation inférieures à 1 MPa/s.

6. 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 », *22^{ème} rencontres universitaires de génie civil*, Université Marne-la-vallée, 3-4 juin 2004, 8 p.
- LCPC-SETRA, *Conception et dimensionnement des structures de chaussées, 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.