

Etude expérimentale de la fatigue et de l'endommagement par cisaillement du collage aux interfaces des couches de chaussée

Malick Diakhaté

Laboratoire Mécanique et Modélisation des Matériaux et Structures du Génie Civil
(3MsGC) – Centre Universitaire de Génie Civil – Bd J. Derche 19300 Egletons

RESUME. La chaussée est une structure composite 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 de l'interface représente alors un paramètre très important pour une analyse plus rationnelle de la durabilité des chaussées. Le travail présenté dans cet article traite de la caractérisation du comportement mécanique d'une interface de collage entre deux couches d'enrobés bitumineux au travers d'essais monotones (cisaillement et torsion) et de fatigue (cisaillement) réalisés à 10 et 20°C. Les résultats montrent que les niveaux de résistance au cisaillement de l'interface obtenus lors des essais monotones de cisaillement et de torsion peuvent être corrélés sous certaines conditions expérimentales. L'objectif de cette étude est de définir, d'une part, des lois de fatigue et d'endommagement des interfaces testées, et d'autre part, une méthode pour prédire ces lois à partir des résultats des essais monotones de double cisaillement.

MOTS-CLÉS : Chaussée, couche d'accrochage, fatigue.

ABSTRACT. Pavement is a multi-layered structure. The bonding level at the interfaces strongly affects the stresses and strains distribution within each layer, and by extension, the lifetime of the structure. Determining the interface shear performance is of great importance for analyzing more accurately the pavement response to traffic load. The research work presented in this paper consists in characterizing the interface shear behavior between two hot mix asphalt layers under monotonic loading (double shear and torque) and cyclic loading (double shear). Tests are performed at 10 and 20°C. Based on the studied materials combination, this paper gives some testing conditions where the interface shear strength values obtained from shear and torque monotonic tests are similar. The objective of this work is to propose interface shear fatigue and damage laws for the studied tack coats, and a method to correlate results from both monotonic and fatigue shear tests.

KEYWORDS: Pavement, tack coat, fatigue.

1. INTRODUCTION

Depuis ces trente dernières années, de nombreux travaux de recherche ont été menés afin d'appréhender le comportement mécanique des interfaces dans les structures de chaussées (Uzan *et al.*, 1978), (Romanoschi, 1999), (Mohammad *et al.*, 2005), (Diakhaté *et al.*, 2006). L'auscultation de certaines structures dont la couche de roulement se dégradait prématurément, sous forme de décollements en plaque, a mis en évidence des défauts de collage aux interfaces. Ces types de dégradations sont le plus souvent relevés sur des portions de chaussée où la valeur de la composante horizontale du trafic est assez élevée (zones de freinage-accélération, pentes, virages, etc.) et dans le cas de structures à couche de roulement très mince (épaisseur 25 mm). L'état des interfaces a une forte incidence sur la répartition des contraintes et déformations dans la structure et représente un paramètre très important pour une analyse plus rationnelle de la durabilité des structures de chaussée. Dans la

plupart des méthodes de dimensionnement des chaussées, la méthode française en particulier, l'état de l'interface entre deux couches d'enrobés bitumineux est considéré parfaitement collé pendant toute la durée de vie de la chaussée (LCPC, 1994). Cette hypothèse est jugée satisfaite lorsqu'on interpose une couche d'accrochage entre les couches d'enrobés. En réalité, l'état parfaitement collé d'une interface ne peut pas être reproduit sur chantier (Romanoschi, 1999). En l'absence d'un niveau de collage suffisant aux interfaces, les couches de chaussée présentent des taux de travail plus élevés, et des phénomènes de dégradation peuvent alors apparaître prématurément à la surface de la chaussée.

Le travail présenté dans cet article expose une partie du projet de recherche réunissant le laboratoire 3MsGC de l'Université de Limoges et le Centre de Recherche Eurovia, société du groupe Vinci. Une des problématiques de ce projet est de proposer une méthode d'analyse qui permet d'estimer le comportement en fatigue d'une couche d'accrochage à partir des résultats d'essais monotones, simples et rapides à réaliser. L'étude expérimentale consiste alors en la réalisation d'essais monotones (torsion et double cisaillement direct) et d'essais de fatigue (double cisaillement direct) de manière à couvrir la gamme complète de rupture allant d'un $\frac{1}{4}$ de cycle (monotone) à 10^6 cycles de chargement. Trois natures d'interfaces sont étudiées : sans couche d'accrochage et deux couches d'accrochage à base de bitumes purs de grades différents : 35/50 et 70/100.

2. PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE DE L'ETUDE

Dans les années 1970, l'auscultation de certaines chaussées dont la surface se dégradait prématurément mettait en évidence des défauts de liaison notamment entre la couche de roulement et la couche de base. L'ampleur de ce type de dégradation était telle qu'il touchait plus de 5% du réseau linéaire et conduisait à des travaux d'entretien lourds, 2 à 5 fois plus coûteux que l'entretien normal. En novembre 1986, le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) a fait paraître une note d'information relative au décollement des couches de revêtement de chaussées (SETRA, 1986) pour préconiser l'utilisation d'une couche d'accrochage aux interfaces de collage. On pourrait croire que l'apparition des pathologies de rupture d'interface s'est accentuée avec l'utilisation des couches de roulement minces. En effet, les bétons bitumineux minces (épaisseur de 30 à 50 mm) ont été développés dans les années 1970 comme solution d'entretien de chaussées dont l'état structural ne nécessitait pas un renforcement mais auxquelles il fallait redonner des caractéristiques de surface suffisantes (Di Benedetto *et al.*, 2005). Il faut noter que, dans ces types de structures, l'interface entre la couche de roulement et sa couche sous-jacente est fortement sollicitée en cisaillement.

En France, selon les règles en vigueur vis-à-vis de la conception des chaussées, les structures sont principalement dimensionnées sur la base de 2 critères : la rupture par fatigue des couches en matériaux liés et l'orniérage des couches en matériaux non liés. La performance mécanique du collage aux interfaces entre couches de chaussée n'est pas abordée. Lors du dimensionnement de la structure de chaussée, le traitement de l'interface se limite au choix, suivant les matériaux en contact et défini de manière conventionnelle, d'un état soit parfaitement collé, soit glissant, soit semi-collé. Les méthodes de dimensionnement des chaussées adoptées aux Etats-Unis (AASHTO) et au Royaume-Uni (DMRB) font, comme en France, l'hypothèse d'un collage parfait entre deux couches d'enrobés bitumineux pendant toute la durée de vie de la chaussée. Cependant le cas d'une interface parfaitement collée ou glissante n'est pas réaliste (Uzan *et al.*, 1978), (Romanoschi, 1999).

Le comportement mécanique d'une interface est caractérisé par sa raideur au cisaillement. Celle-ci lie, dans un domaine élastique linéaire et pour de petits déplacements, la contrainte de cisaillement au déplacement relatif à l'interface. L'état de l'interface conditionne la répartition des contraintes et des déformations dans la structure de chaussée. A titre d'exemple, on choisit la structure de chaussée (PF2/GB3/GB3/BBSG) (Figure 1) issue du catalogue des structures types de chaussées neuves. Pour ce type de structure, la durée de vie conventionnelle est calculée à partir de la valeur de déformation horizontale (allongement) ε_i à la base de la couche de fondation, avec l'hypothèse d'un collage parfait à chaque interface. Sur la base d'une modélisation de structure de chaussée en 2D avec le code aux éléments finis Cast3M, lorsque l'interface entre la couche de roulement (BBSG) et la couche de base (GB3) passe d'un état parfaitement collé (Pcollée) à un état réaliste ($K_s = 78$ MPa/mm, issue de nos essais de fatigue), on remarque que la valeur de déformation ε_i augmente de 4,86% (Figure 1), ce qui conduit à une diminution de la durée de vie de la chaussée de 22%. De plus, si l'état du collage à l'interface se dégrade dans le temps (diminution de la valeur de K_s), on observe une augmentation de ε_i , ce qui accélère la dégradation de la structure de chaussée.

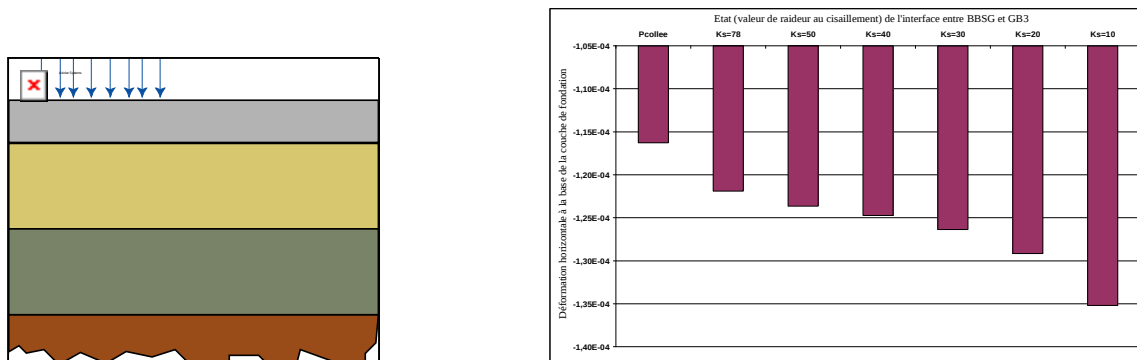


Figure 1. Effet de l'état de l'interface sur la durée de vie d'une structure de chaussée.

La campagne expérimentale proposée dans ce travail consiste à étudier le comportement mécanique de l'interface dans la gamme complète d'une étude de durabilité : de l'essai monotone à l'essai de fatigue à grand nombre de cycles. A terme, des lois de fatigue et d'endommagement d'interface seront proposées. Le concepteur de structure de chaussée pourra alors prendre en compte le comportement en fatigue de l'interface afin de mieux estimer la durée de vie de la chaussée.

3. ETUDE EXPERIMENTALE

3.1. TYPES D'ESSAIS ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

Dans ce travail, la durabilité mécanique du collage à l'interface de deux couches d'enrobés bitumineux est étudiée à travers deux essais de laboratoire : l'essai de double cisaillement et l'essai de torsion. L'essai de cisaillement direct, généralement réalisé sur une éprouvette composée de deux couches, est le plus fréquemment rencontré dans la littérature lorsqu'on s'intéresse à la caractérisation du comportement en cisaillement monotone des couches d'accrochage. Afin de rendre symétrique l'essai de cisaillement (géométrie et chargement), le laboratoire 3MsGC de l'Université de Limoges a adopté le principe de l'essai de double cisaillement (Tableau 1), initialement développé pour étudier le phénomène de la remontée des fissures dans les enrobés (Petit *et al.*, 2002), puis adapté à l'étude du comportement en cisaillement des couches d'accrochage. L'essai de double cisaillement (monotone ou fatigue) est réalisé sur une éprouvette composée de trois couches, deux à deux collées ou non par une

couche d'accrochage. L'essai de torsion est pratiqué, sur des éprouvettes cylindriques bimatériaux. Il présente l'avantage de pouvoir être réalisé aussi bien en laboratoire que sur chantier. Par contre il reste limité, dans sa conception actuelle, à une sollicitation monotone.

Dans cette étude, l'interface étudiée est celle entre deux couches d'enrobés bitumineux dont l'un est représentatif d'un béton bitumineux très mince (BBTM) et l'autre d'un béton bitumineux semi grenu (BBSG). Le Tableau 1 présente les différents paramètres de la campagne expérimentale.

Tableau 1. Principes d'essais, programme expérimental et nombre d'essais exploités.

Type d'interface (couche d'accrochage à base de bitume...)	Essais de double cisaillement (DC)				Essais de torsion (T) Interface	
	Monotone		Fatigue		Monotone	
	10°C	20°C	10°C, 10 Hz	20°C, 10 Hz	10°C	20°C
Bitume pur (35/50)	12	12			10	12
Bitume pur (70/100)	10	11	26	12		
Sans émulsion			10			

3.2. MATERIAUX ET EPROUVETTES

Les deux couches d'accrochage testées dans cette étude sont des émulsions bitumineuses classiques à rupture rapide de type C65B4 selon la norme prEN 13808:204(F). Chacune d'elles est dosée à 65% de bitume pur de grade 35/50 (ou 70/100), et uniformément répartie à l'interface à raison de 300 g/m² de bitume résiduel. Le liant utilisé dans la formulation (Tableau 2) des couches d'enrobés (BBSG 0/10 et BBTM 0/10) est un bitume pur de grade 35/50.

Les éprouvettes prismatiques et cylindriques sont prélevées sur une plaque fabriquée en laboratoire au moyen d'un compacteur de plaque (NF EN 12697-33) dans un moule de dimensions 400 x 600 x 150 [mm³]. Un plan de sciage, respectivement de carottage, permet d'extraire respectivement 12 éprouvettes prismatiques de dimensions (25+55+25) x 70 x 50 [mm³] et 11 éprouvettes cylindriques de diamètre 100 mm et de hauteur (50+30) mm. Après séchage, les éprouvettes sont collées sur des casques métalliques pour assurer la transmission des sollicitations. Préalablement à la réalisation de l'essai, l'éprouvette est conditionnée pendant 6 h dans un caisson climatique installé sur la machine d'essai afin d'obtenir un champ de température homogène et stable (10 ou 20°C) dans les matériaux.

Tableau 2. Caractéristiques des couches d'enrobés bitumineux (fabrication de la plaque).

Couche	Enrobés	Granularité	Bitume	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

3.3. INSTRUMENTATION ET ACQUISITION

Le pilotage des essais se fait en mode force. Suivant le principe d'essai à appliquer, une machine d'essai de type servohydraulique permet d'appliquer la sollicitation nécessaire. Pendant l'essai monotone (torsion ou cisaillement), les valeurs de force (mesurées par le capteur de force de capacité ± 100 kN) et de déplacement (mesurées à la fois par un capteur LVDT de course ± 75 mm et par un extensomètre de course ± 1 mm) sont enregistrées en fonction du temps. Après un déplacement relatif de 8 mm du vérin (la rupture de l'éprouvette s'est assurément produite), le pilotage de la machine d'essai bascule en mode déplacement pour arrêter la procédure d'essai. Pendant l'essai de fatigue

(cisaillement), on enregistre également les signaux de chargement et de déplacement (LVDT et extensomètre) en fonction du temps. L'acquisition des signaux est modulée. A chaque déclenchement, chaque signal, composé de 2 cycles consécutifs, est échantillonné sur 200 points. La procédure d'essai s'arrête automatiquement lorsque la régulation ne parvient plus à asservir la consigne de sollicitation (écart de 20%).

4. INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1. COMPORTEMENT DU COLLAGE EN CISAILLEMENT MONOTONE

La rupture macroscopique de l'éprouvette se traduit par des géométries de rupture nettes et franches aux interfaces entre couches d'enrobés. Le comportement en cisaillement monotone de l'interface est généralement caractérisé à partir de 2 paramètres : la résistance au cisaillement qui représente la valeur maximale de la contrainte de cisaillement atteinte pendant l'essai et la raideur au cisaillement qui lie la contrainte de cisaillement au déplacement relatif à l'interface. A partir des résultats des essais monotones de double cisaillement et de torsion, les valeurs nominales respectives de la contrainte de cisaillement appliquée à l'interface sont définies par [Eq. 1]. Uniquement définie à partir des résultats de l'essai de double cisaillement, la valeur tangente de la raideur au cisaillement de l'interface K_{STG} est calculée sur une portion pseudo-linéaire du graphe contrainte de cisaillement – déplacement relatif avec [Eq. 2].

$$\text{Contrainte de cisaillement à l'interface} \begin{cases} \text{Double cisaillement : } \tau = \frac{F}{S_1 + S_2} \\ \text{Torsion : } \tau_R = \frac{F \cdot D}{\pi \cdot R^3} \end{cases} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\text{Valeur tangente de la raideur au cisaillement de l'interface : } K_{STG} = \frac{\tau^{\max}/3 - \tau^{\max}/10}{\Delta u_3 - \Delta u_{10}} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Avec :

- F : effort appliqué pour générer la sollicitation de torsion ou de cisaillement ;
- S_1 et S_2 : sections initiales des deux interfaces de l'éprouvette prismatique ;
- D : diamètre du disque de transmission de l'effort (120 mm) et R : rayon de l'éprouvette (50 mm) ;
- $\tau^{\max}$: résistance au cisaillement de l'interface (obtenue pour $F = F_{\max}$) ;
- Δu_{10} et Δu_3 : déplacements relatifs à l'interface correspondant à $\tau^{\max}/10$ et à $\tau^{\max}/3$;

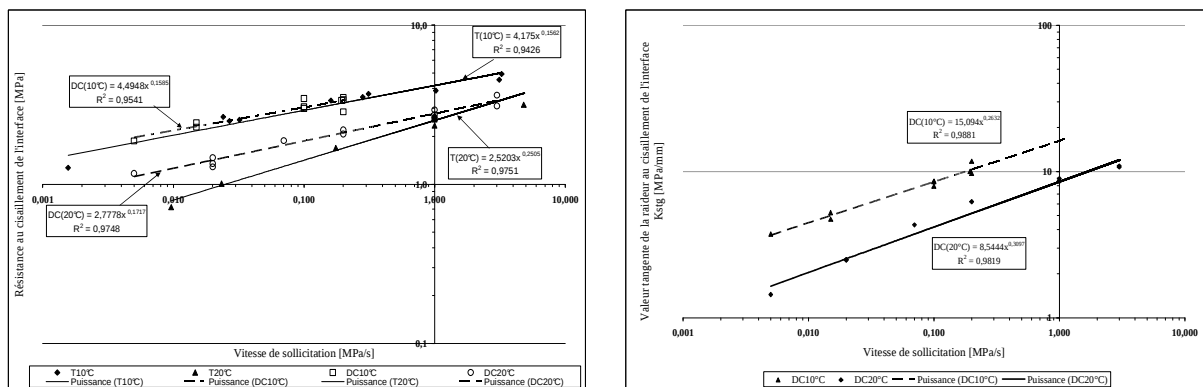


Figure 2. Paramètres de la loi de comportement en cisaillement monotone de l'interface.

L'analyse des résultats des essais monotones de double cisaillement montre que dans un repère bi-logarithmique, la résistance et la raideur au cisaillement de l'interface augmentent linéairement avec la vitesse de sollicitation mais décroissent avec l'augmentation de la température (Figure 2). De plus, à 10 et 20°C, des ajustements par des lois puissances conduisent à de bonnes corrélations entre les paramètres de la loi de comportement et la vitesse de sollicitation, et les coefficients obtenus sont presque identiques. On retrouve les mêmes types d'évolution de la résistance au cisaillement lorsqu'on interprète les résultats des essais de torsion. Cependant, les ajustements par des lois puissances proposés à 10 et 20°C ont des coefficients différents.

Lorsqu'on s'intéresse à la corrélation entre les essais monotones de cisaillement et de torsion, on remarque qu'à 10°C, les valeurs de résistance au cisaillement obtenues à partir des deux types d'essais sont identiques, mais différentes à 20°C lorsque les vitesses de sollicitation sont inférieures à 1 MPa/s. Ces observations permettent de définir des conditions d'essais (à 10°C et au-delà de 1 MPa/s pour 20°C) pour tirer plus d'informations sur les résultats de l'essai de torsion réalisé en laboratoire ou sur chantier.

4.2. COMPORTEMENT DU COLLAGE EN FATIGUE

Lors des essais de fatigue, la rupture est bien localisée aux interfaces, mais une cohésion résiduelle subsiste : les couches d'enrobés ne sont pas séparables à la main. Le traitement des données d'acquisition vise à déterminer l'évolution, pendant l'essai, des amplitudes des signaux de force et de déplacement centrés autour de zéro et de l'angle de déphasage entre ces deux signaux. L'interprétation de l'essai de fatigue repose sur les résultats de ce traitement.

Le comportement en fatigue d'un matériau est généralement défini par la relation entre le niveau de chargement appliqué et le nombre de cycles de chargement provoquant la rupture du matériau. Ce nombre de cycles est associé à un critère de rupture. De manière conventionnelle, le nombre de cycles à la rupture est défini pour une chute de 50% de la raideur initiale de l'éprouvette pour les matériaux bitumineux. Dans le cas de notre étude où le pilotage est à force constante (Figures 3 et 4), le nombre de cycles à la rupture $N_{R50\%}$ correspond au nombre de cycles de chargement lorsque l'amplitude initiale du déplacement est doublée. Outre ce critère classique de 50% de raideur initiale, on se propose de calculer et de comparer les nombres de cycles à la rupture de l'essai donnés par trois autres critères (Figure 4).

- Critère de force (défaut de pilotage) : on considère que l'interface de collage entre couches d'enrobés est rompue lorsque la machine d'essai ne parvient plus à asservir sa consigne de pilotage en force. Le nombre de cycles à la rupture, noté N_{RFORCE} , correspond alors au nombre de cycles de chargement lorsque l'amplitude de la force est supérieure de 10% à la consigne de pilotage ;
- Critère de pentes (raideur de l'éprouvette) : on associe à la rupture de l'interface de collage entre couches d'enrobés, le changement brusque de pente de la courbe d'évolution de la raideur de l'éprouvette au cours de l'essai. Le nombre de cycles à la rupture, pour ce critère, est noté $N_{RPENTE-R}$;
- Critère de pentes (énergie dissipée par cycle) : on considère que l'interface de collage entre couches d'enrobés est rompue lorsque qu'on observe un changement brusque de pente de la courbe d'évolution de l'énergie dissipée par cycle pendant l'essai. Le nombre de cycles à la rupture est noté $N_{RPENTE-ED}$.

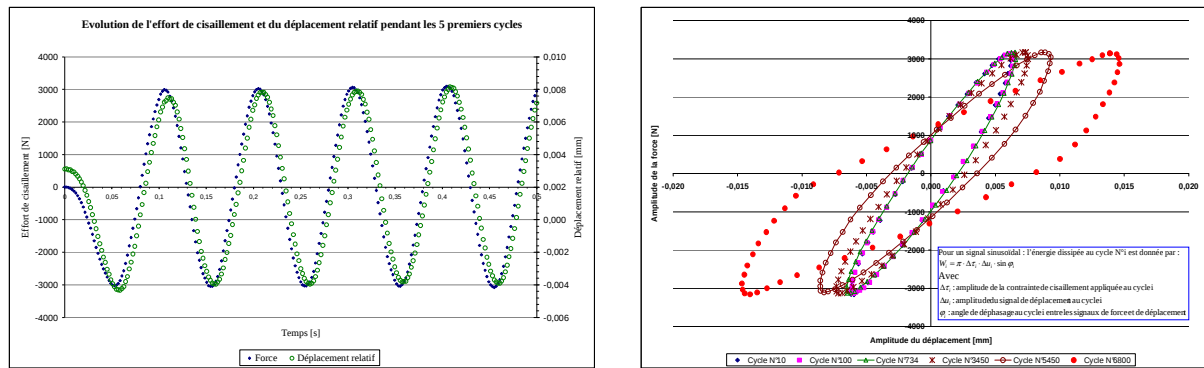


Figure 3. Signaux de force et de déplacement et courbes d'hystérésis (éprouvette PLQ17-2, 10°C).

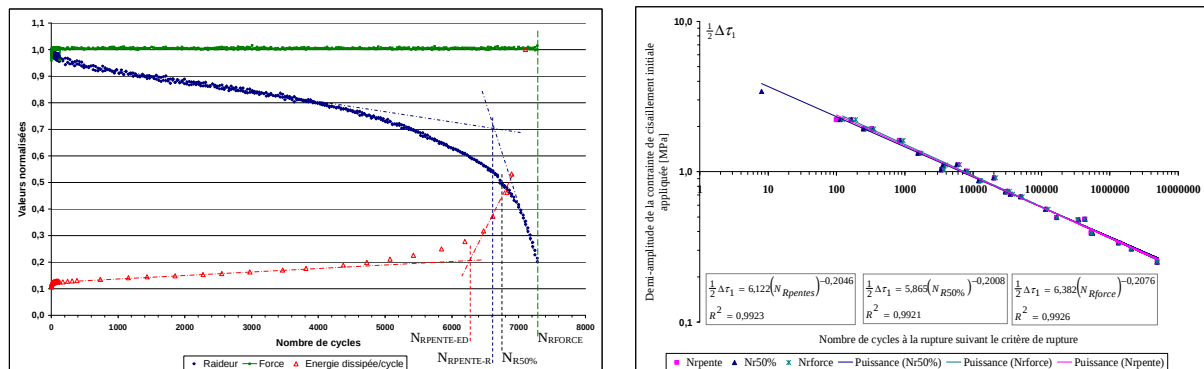


Figure 4. Lois de fatigue d'un type d'interface pour différents critères de rupture (10Hz, 10°C).

Le comportement de l'éprouvette PLQ 17-2 présenté sur les Figures 3 et 4 est représentatif du comportement en fatigue des éprouvettes testées. Les résultats montrent que la machine d'essais asservit parfaitement la consigne de pilotage tout au long de l'essai (avant rupture des interfaces). L'observation de l'évolution des courbes d'hystérésis nous renseigne sur l'approche de la rupture de l'éprouvette qui se traduit par une « irrégularité » croissante de la forme initialement elliptique de l'hystérésis. Une hystérésis plus déformée fait apparaître les phénomènes d'engrènement entre granulats à l'interface.

Les différentes valeurs de nombre de cycles à la rupture données par les 4 critères proposés, sont comparables. On remarque qu'à 10°C, des ajustements par des lois puissances conduisent à de bonnes corrélations entre le niveau de sollicitation appliqué et le nombre de cycles à la rupture quelque soit le critère adopté. Le critère classique de chute de 50% de la raideur initiale est plus simple et rapide d'utilisation, nous le choisissons pour estimer le nombre de cycles à la rupture.

La loi de comportement donnée sur la Figure 4 traduit le comportement en fatigue d'un des 3 types d'interface étudiés (Tableau 1) à 10°C et 10 Hz. Les essais de fatigue sur les autres types d'interface ont donné des résultats similaires. Une analyse plus approfondie des résultats des essais de fatigue est effectuée en exploitant les résultats de l'énergie dissipée. Cette analyse permet de localiser le passage de l'endommagement à la rupture macroscopique de l'interface. On parvient également à prédire, pour la combinaison de matériaux étudiés et dans la gamme de sollicitations mécanique et thermique adoptées, le comportement en fatigue de l'interface sur la base des résultats de l'essai monotone de double cisaillement.

5. CONCLUSIONS

Le travail présenté dans cet article traite de la caractérisation du comportement mécanique d'une interface de collage entre deux couches d'enrobés bitumineux au travers d'essais monotones (torsion et double cisaillement direct) et d'essais de fatigue (double cisaillement direct) réalisés à 10 et 20°C et pilotés en force. Une des problématiques de ce travail de recherche est de trouver une méthode d'analyse qui permet d'estimer les paramètres du comportement en fatigue de l'interface à partir des résultats des essais monotones. Trois types d'interface ont été étudiés : sans couche d'accrochage et deux couches d'accrochage à base de bitumes purs de grades différents : 35/50 et 70/100.

En monotone, le comportement de l'interface est caractérisé par les valeurs de résistance et de raideur au cisaillement. Pour des vitesses de sollicitation entre 0,002 et 4,8 MPa/s, les résultats montrent que, dans un repère bi-logarithmique, les paramètres de la loi de comportement augmentent linéairement avec la vitesse de sollicitation mais décroissent avec l'augmentation de la température. A 10 et 20°C, des ajustements, sous forme de lois puissances, avec des coefficients presque identiques, conduisent à de bonnes corrélations entre la résistance au cisaillement et la vitesse de sollicitation. Lorsqu'on s'intéresse à la corrélation entre les essais de torsion et de cisaillement, on remarque que les valeurs de résistance au cisaillement issues des deux essais, et calculées à partir de l'hypothèse d'un comportement élastique « équivalent », sont comparables sous certaines conditions expérimentales.

Les essais de fatigue ont permis de proposer des lois de fatigue pour les matériaux étudiés et dans les conditions expérimentales choisies (10 et 20°C). Des ajustements de types lois puissances conduisent à de bonnes corrélations entre l'amplitude de la sollicitation appliquée et le nombre de cycles à la rupture (calculé selon 4 critères différents). On observe également l'endommagement progressif du collage de l'interface de par l'évolution de sa valeur de raideur au cisaillement. Dans cette configuration d'essai, et pour les matériaux étudiés, on arrive à prédire la loi de fatigue de l'interface sur la base des résultats des essais monotones de double cisaillement.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Diakhaté M., Phelipot-Mardelé A., Millien A., Petit C. (2006) « Shear fatigue behaviour of tack coats in pavements » *Road Materials and Pavement Design*, vol. 7, n° 2/2006, p. 201-222.
- Di Benedetto H., Corté J.-F. (2005) « Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges », Hermès Sciences, Collection traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux.
- LCPC-SETRA (1994) « Conception et dimensionnement des structures de chaussées, guide technique », Paris.
- Mohammad L.N., Wu Z., Raqib M.A. (2005) « Investigation of the behaviour of asphalt tack coat interface layer » *LTRC, Baton Rouge*, report n° FHWA/LA.04/394.
- Petit C., Laveissière D., Millien A. (2002) « Modelling of reflective cracking in pavements: fatigue under shear stresses » *Proceedings of the 3rd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research*, Amsterdam, the Netherlands, p. 111-123.
- Romanoschi A.S. (1999) « Characterization of pavement layer interfaces » PhD thesis, Louisiana State University, Baton Rouge.
- SETRA (1986) « Le décollement des couches de revêtement de chaussées », note d'information.
- Uzan J., Livney M., Eshed Y. (1978) « Investigation of adhesion properties between asphaltic concrete layers » *Proceedings asphalt paving technology*, vol. 47, n° 1978, p. 495-521.