

Modélisation du comportement mécanique des interfaces de couches de chaussées sous sollicitations monotones

R. KTARI^a, F. FOUCHAL^b, A. MILLIEN^c, C. PETIT^d

- a. Université de Limoges, GEMH-GCD, 17, Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France, rahma.ktari@unilim.fr
- b. Université de Limoges, GEMH-GCD, fazia.fouchal@unilim.fr
- c. Université de Limoges, GEMH-GCD, anne.millien@unilim.fr
- d. Université de Limoges, GEMH-GCD, christophe.petit@unilim.fr

Mots clefs : interface, endommagement, traction, cisaillement, mesure de champs, rugosité, mode mixte, modèle de zone cohésive (CZM), méthodes des éléments finis (EF)

1 Résumé étendu

Les chaussées sont des structures multicouches composites soumises à des sollicitations combinées de mécaniques et climatiques. Les méthodes de dimensionnement conventionnelles considèrent l'interface entre deux couches soit parfaitement collée, soit parfaitement glissante, en fonction de la nature des couches en présence [1]. Depuis déjà plusieurs années, des dégradations sévères sont observés au niveau des couches de surface, et peuvent être directement corrélées à des décollements par arrachement ou par glissement entre couches, ceci malgré la mise en œuvre d'une couche d'accrochage ou de systèmes de renforcements par géogrilles. Ces pathologies sont fréquemment rencontrées sur des sections de chaussées fortement sollicitées en cisaillement (zones de freinage-accelération, giratoire, rampes, etc.), dans le cas de structures particulières telles que les quais de déchargement, les taxiways des aéroports, les sols industriels, ou encore dans le cas des chaussées comportant une couche de roulement de faible épaisseur. Les ruptures constatées peuvent se produire en sollicitations monotones sévères, à très faible nombre de cycles ou encore en fatigue [2], [3] et [4]. Toutes ces données montrent que la compréhension et la modélisation du comportement mécanique de l'interface est un paramètre clé pour le dimensionnement des structures de chaussées.

Par ailleurs, la modélisation des interfaces est bien développée dans le domaine des matériaux composites [5], [6], et des maçonneries [7] ... Cette application a également intéressé les chercheurs dans le domaine des chaussées [8], [9] et [10] au cours de ces dix dernières années. Les études expérimentales ont montré que la qualité de collage entre couches de chaussées est corrélée à l'adhésion (dosage en bitume résiduel, type de bitume, âge, conditions de mise en œuvre, propreté de la couche d'accrochage, présence de l'eau, température,...) [3], [4], [11] et à l'engrènement (macrotexture, granulométrie, type d'agrégat,...) [12], [13], [14] et [15]. En raison de ces préoccupations, une étude de caractérisation expérimentale et numérique est proposée dans le présent travail.

Notre première contribution porte sur la caractérisation expérimentale des performances mécaniques de l'interface en mode I et mode II à travers des essais de traction directe (DTT), de double cisaillement (DST), et de cisaillement sur éprouvette double entaillée (DNST). Les différents essais sont réalisés sur un bicouche bitumineux issu d'une planche expérimentale du projet RILEM-SIB [11]. Les deux couches sont composées d'un même enrobé bitumineux de type EB 12,5, d'une épaisseur nominale de 50 mm. Deux types d'interface sont traités dans cette étude, interface soit renforcée par des fibres de carbone / fibre de verre de maille de l'ordre 20 x 20 mm² notée (CF) ou interface non renforcée et composée d'une simple couche d'accrochage en bitume notée (UN).

La partie expérimentale est consacrée à la caractérisation du comportement endommageable de l'interface par l'utilisation des méthodes optiques de mesure de champs : corrélation d'images (Digital Image Correlation : DIC) et suivis de marqueurs (Mark tracking methods : MTm). Les champs de déplacement analysés par ces méthodes sans contact ont permis d'étudier le comportement du bicouche à deux échelles différentes : à l'échelle matériau et à l'échelle interphase/interface. La première échelle d'analyse, appelée analyse globale, est menée dans le but de déterminer les paramètres mécaniques (module d'Young et coefficient de Poisson) de l'enrobé bitumineux. La deuxième échelle d'analyse, nommée analyse locale au voisinage de l'interface, a permis de localiser l'interphase et d'identifier sa largeur caractéristique d'engrènement (épaisseur), ses propriétés mécaniques homogénéisées (module d'Young, coefficient de Poisson) ainsi que sa cinétique d'endommagement. Enfin, une approche simplifiée d'homogénéisation a permis de combiner les résultats issus des deux analyses, afin de caractériser le comportement endommageable d'une interface modèle sans épaisseur. Cette approche a permis d'identifier les paramètres mécaniques d'adhésion et d'endommagement (rigidités normale et tangentielle, vitesse d'endommagement et énergie de décollement en mode I et II ...) au niveau de l'interface.

La deuxième contribution de ce travail porte sur la modélisation du comportement mécanique de l'interface entre bicouches bitumineux. Une modélisation par éléments finis des essais de traction et de cisaillement est proposée. Les simulations numériques sont faites sous le logiciel Cast3M en déformation plane 2D. Le maillage et les conditions aux limites associées aux essais DTT et DST sont présentés dans la figure 1. L'endommagement est associé à un comportement cohésif de l'interface entre deux couches de matériaux élastiques équivalents. Un comportement visco-plastique endommageable est choisi pour la modélisation de l'interface. Le modèle retenu a été proposé par O. Allix et P. Ladevèze [16], il est implémenté sous le code éléments finis Cast3M par L. Gornet [17] comme loi de comportement d'un élément de type joint. Développé initialement pour l'étude du délaminage des matériaux composites, il s'agit d'un modèle de zone cohésive associant la mécanique de la rupture et la mécanique de l'endommagement. Les mécanismes d'endommagement sont régis par des variables internes. Ce modèle permet de prendre en compte l'endommagement en mode mixte, gouverné par un taux de restitution d'énergie équivalent aux deux modes de sollicitations (I et II) et une viscosité interfaciale en tenant compte de la vitesse de l'endommagement. Dans un premier temps, les simulations sont effectuées pour le cas d'une interface lisse. Une étude paramétrique est proposée pour les deux types d'essais afin de visualiser l'effet des différents paramètres du modèle. Les résultats numériques obtenus sont comparés avec les données expérimentales des essais en traction et en cisaillement jusqu'au pic (figure 2). Ces comparaisons montrent que le modèle permet de reproduire le décollement et l'endommagement en mode I et II observés expérimentalement.

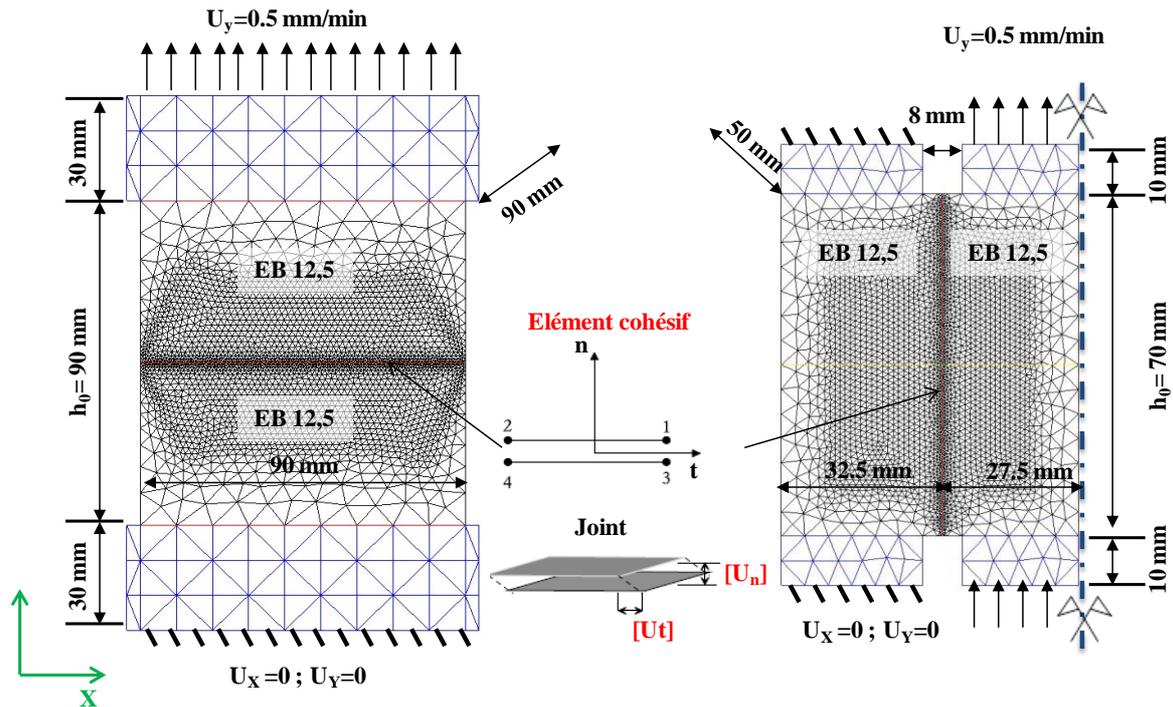


Figure 1 Maillage et conditions aux limites associés aux essais DTT et DST (symétrique)

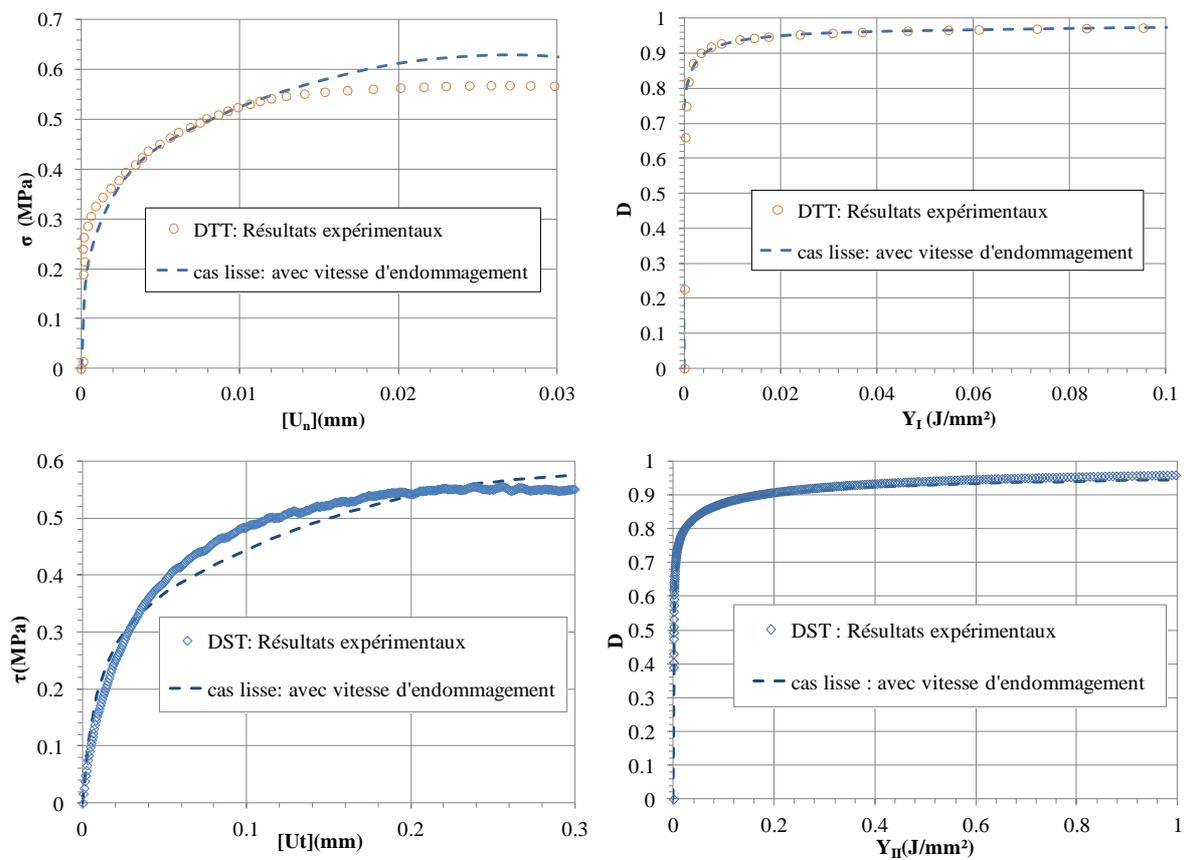


Figure 2 Comportement d'interface en mode I et II en cas lisse

La troisième contribution porte sur l'étude de l'effet de la rugosité sur le comportement mécanique de l'interface en mode I et II. Des simulations numériques sont proposées pour différentes formes

d'aspérités : profil de rugosité réelle issue de la méthode de la projection de franges [18] ou périodiques (triangulaire, sinusoïdale, en créneau et carrée) (figure 3). A l'issue de cette étude numérique, une loi reliant l'adhérence en traction et en cisaillement à la rugosité de l'interface est proposée.

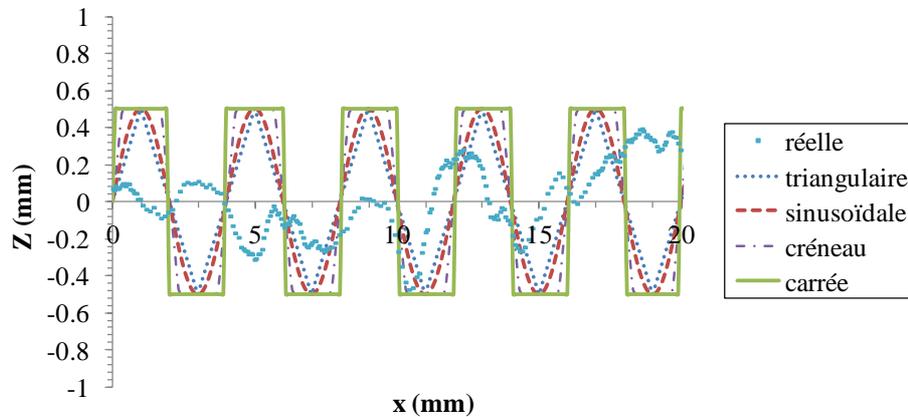


Figure 3 Profil de rugosité réelle et différentes formes de rugosité périodiques

($R_a = 0.5$, $\lambda = 4$ mm)

Références

- [1] SETRA, Le décollement des couches de revêtement de chaussées, 1986.
- [2] LCPC-SETRA, Conception et dimensionnement des structures de chaussée, guide technique, Paris, 1994.
- [3] M. Hun, A. Chabot, F. Hammoun, A four-point bending test for the bonding evaluation of composite pavement. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavement, Delft, 2012.
- [4] C. Petit, M. Diakhaté, A. Millien, A. Phelipot-Mardele, & B. Pouteau, Pavement Design for Curved Road Sections Fatigue Performance of Interfaces and Longitudinal Top-down Cracking in Multilayered Pavements, Road Mater. Pavement Des10 (2009) 609–624.
- [5] A. Ould Khaoua, F. Lebon, C. Licht and G. Michaille, Thin layers in elasticity: A theoretical and numerical study. In ASME, editor, Processing of the 1996, Engineering Systems Design and Analysis Conference, Vol 4, pp. 171-178, 1996.
- [6] M. Raous, Y. Monerie, Unilateral contact, friction and adhesion in composite materials. In: Martins, J.A.C., Monteiro Marques, M. (Eds.), Contact Mechanics. Kluwer, Dordrecht, 2002, pp. 333-346.
- [7] F. Fouchal, F. Lebon, M. L. Raffa, and G. Vairo, An Interface Model Including Cracks and Roughness Applied to Masonry, the open civil engineering Journal 8(2014) 263–271.
- [8] H. Kim, M. Arraigada, C. Raab, and M. Partl, Numerical and Experimental Analysis for the Interlayer Behavior of Double-Layered Asphalt Pavement Specimens. J. Mater. Civ. Eng. 23, Special issue: Multiscale and Micromechanical Modeling of Asphalt Mixes, 2011, pp. 12-20.
- [9] H. Ozer, I.L. Al-Qadi, Z. Leng, Fracture-Based Friction Model for Pavement Interface Characterization, Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board. 2057 (2008) 54–63. doi:10.3141/2057-07.
- [10] A. Zofka, M. Maliszewski, A. Bernier, R. Josen, A. Vaitkus, R. Kleizienė, Advanced shear tester for evaluation of asphalt concrete under constant normal stiffness conditions, Road Materials and Pavement Design, 2015.
- [11] F. Canestrari, G. Ferrotti, X. Lu, A. Millien, M. N. Partl, C. Petit, A. Phelipot-Mardelé, H. Piber, and C. Raab, “Mechanical testing of interlayer bonding in asphalt pavements advances in inter-

- laboratory testing and evaluation of bituminous materials,” in *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials*, vol. 9, M. N. Partl, H. U. Bahia, F. Canestrari, C. de la Roche, H. Di Benedetto, H. Piber, and D. Sybilski, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, pp. 303–360.
- [12] F. A. Santagata, M. N. Partl, G. Ferrotti, F. Canestrari, A. Flisch, Layer characteristics affecting interlayer shear resistance in flexible pavements. *J Assoc Asphalt Paving* 77 (2008)221–256
- [13] C. Raab, A.O. Abd El Halim, M.N. Partl., Interlayer bond testing using a model material, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 190-199.
- [14] A.C. Raposeiras, A. Vega-Zamanillo, M.A. Calzada-Pérez, D. Castro-Fresno, Influence of surface macro-texture and binder dosage on the adhesion between bituminous pavement layers, *Construction and Building Materials* 28 (2012) 187-192.
- [15] A. D’Andrea, C. Tozzo, A. Boschetto, L. Bottini, Interface Roughness Parameters and Shear Strength, *Modern Applied Science*, Vol. 7, No. 10, 2013, Canadian Center of Science and Education. 2013.
- [16] O. Allix, P. Ladeveze, D. Leveque, L. Perret, Identification and validation of an interface damage model for delamination prediction, *Proceedings of Complas 5*, Barcelone, Espagne, 1996, pp. 1139-1147.
- [17] L. Gornet, H. Ijaz A, high-cyclicelastic fatigue damage model for carbon fibre epoxy matrix laminates with different mode mixtures, *composites: Part B* 42 (2011) 1173-1180.
- [18] R. Ktari, I. Leandry, A. Millien, F. Fouchal, O. Pop, C. Petit, Characterization of bituminous layers interfaces: From the mechanical behaviour to the modelling, in : *Asphalt Pavements - Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements, ISAP*, Raleigh, North Carolina, USA, 2014, pp. 1271-1279.