

## **Titre de la thèse: Thermomechanical behaviour of interface between pavement layers in bituminous mixtures**

Résumé en français:

Les chaussées sont constituées par un empilement de plusieurs couches qui reposent sur un sol de fondation. Bien que chaque couche ait une fonction distincte, elles supportent collectivement les charges du trafic et les répartissent sur la couche de fondation et au sol naturel. Conformément à leurs fonctions respectives, les couches sont construites avec des matériaux et des épaisseurs différents. Une structure de chaussée correctement dimensionnée doit pouvoir supporter les intempéries et les charges de trafic pendant toute sa durée de vie. En outre, elle doit offrir sécurité et confort aux véhicules et aux passagers. Les couches bitumeuses utilisées dans la partie supérieure de la structure de chaussée sont généralement collées entre elles par du bitume émulsionné au moment de sa mise en œuvre. Les couches doivent être parfaitement collées un niveau de cette interface puisque cela influence fortement la durabilité de la structure de chaussée. La détérioration du collage à l'interface entre deux couches au fil du temps, sous l'effet des conditions météorologiques et de la circulation, peut entraîner des détériorations prématurées de la structure de la chaussée. Il est ainsi peu probable que le collage à l'interface soit préservé pendant toute la durée de vie de la chaussée, comme le supposent la plupart des méthodes de conception. Or, il n'existe que peu d'études permettant de quantifier le niveau de collage, au début ni son évolution tout au long de la vie d'une chaussée.

C'est l'objectif de ce travail de caractériser et modéliser le comportement de l'interface bitumineuse entre deux couches de chaussées. Pour cela le manuscrit de thèse se décompose en 5 chapitres qui sont résumés ci-après.

Le chapitre 1 présente une revue de la littérature sur l'échelle des matériaux d'une chaussée, notamment les granulats, le sable, les charges et le liant. Quelques idées sur l'échelle de la structure d'une chaussée seront introduites. En outre, l'importance des interfaces entre les couches d'une structure de chaussée sera soulignée. Afin d'évaluer le comportement des interfaces, diverses approches ont été développées, tant in situ qu'en laboratoire. Certaines d'entre elles seront présentées dans ce chapitre. Ainsi, divers dispositifs expérimentaux ont été utilisés à la fois in situ et en laboratoire. Ces dispositifs ont la capacité d'appliquer une charge de cisaillement monotone ou cyclique, ainsi que des températures et des amplitudes de charge variables, à des échantillons en laboratoire. Néanmoins, un inconvénient majeur de ces appareils est la présence de champs de contrainte et de déformation (ou de déplacement) non homogènes à l'interface, ce qui empêche de déterminer les propriétés intrinsèques de l'interface.

Le dispositif 2T3C développé à l'ENTPE/Université de Lyon et utilisé dans ce travail de thèse permet d'appliquer un champ de contraintes et de déformations quasi-homogènes (i) dans les deux couches de l'enrobé et (ii) les champs de déformations dans les couches et l'écart de déplacement à l'interface seront présentés dans le chapitre suivant.

Pour finir ce chapitre, certains modèles seront introduits pour caractériser une interface et un mélange bitumineux en couches dans différents domaines de comportement thermomécanique.

Le chapitre 2 est dédié à la présentation de l'appareil prototype appelé 2T3C ("Torsion, Traction, Compression sur Cylindre Creux" en français ou "Torsion, Tension, Compression on Hollow Cylinder" en anglais). Conçu pour étudier les caractéristiques thermomécaniques de l'interface entre les couches bitumineuses, il a été développé à l'ENTPE/Université de Lyon. Le principe de l'essai sur cylindre creux est présenté dans la première section. La section suivante définit chaque composant du dispositif 2T3C. Dans la troisième section, les systèmes de mesure et d'acquisition sont décrits. Enfin, une section décrit l'approche informatique intégrée à la corrélation d'images numériques (CIN) 3D afin de déterminer la déformation dans chaque couche et l'écart de déplacement à l'interface.

L'un des avantages de de du dispositif 2T3C est que les champs de contrainte et de déformation appliqués dans les deux couches et les champs de contrainte et de déplacement à l'interface sont quasi-homogènes. Pour que cette hypothèse soit valable, l'épaisseur de la paroi des échantillons cylindriques creux doit être suffisamment faible par rapport au diamètre. Les rayons extérieur et intérieur sont respectivement de 86 mm et 61 mm. Le rapport entre le rayon intérieur et le rayon extérieur est de 0,71, ce qui correspond à une hypothèse d'homogénéité acceptable. Les échantillons testés sont des cylindres creux à double couche, et les deux couches ont approximativement la même hauteur. La hauteur totale d'un cylindre creux à double couche est de 125 mm.

Les échantillons sont placés à l'intérieur d'une chambre thermique qui régule la température dans une large gamme allant de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$ , ce qui est suffisant pour tester un échantillon composé de mélanges bitumineux. Deux capteurs thermiques (PT100) sont placés sur les surfaces intérieure et extérieure de l'échantillon testé pour surveiller les températures et vérifier que la température est uniforme à l'intérieur de l'échantillon. Deux côtés de la chambre

thermique sont dotés de fenêtres transparentes, permettant à quatre caméras de prendre des images de l'extérieur.

L'appareil 2T3C est équipé d'une presse hydraulique qui peut imposer une charge axiale ou/et de torsion de manière cyclique ou monotone. La charge axiale maximale est de  $\pm 100$  kN, et la charge maximale de torsion est  $\pm 2$  kN.m. Pour la charge cyclique, la fréquence maximale est de 10 Hz en tension/compression et en torsion. Deux cellules de charge mesurent la force normale et la torsion appliquées par la presse. Il y a quatre capteurs sans contact. Deux d'entre eux mesurent les déplacements axiaux relatifs des casques supérieur et inférieur sur deux faces diamétrales opposées de l'échantillon. Ils permettent d'obtenir la déformation axiale globale ( $\epsilon_{zzg}$ ) comme valeur moyenne. Les deux autres donnent les déplacements globaux dans la direction tangentielle ( $u_{\theta zg}$ ) et permettent, de la même manière, d'obtenir la déformation globale de cisaillement ( $\epsilon_{\theta zg}$ ). La déformation de cisaillement globale est utilisée par la presse pour contrôler la charge de cisaillement pendant l'essai (charge sinusoïdale). La précision des capteurs est de 0,1  $\mu$ m. Le dispositif de corrélation d'image permet d'obtenir les déplacements dans une zone autour de l'interface. L'analyse développée permet d'en déduire les déformations de cisaillement dans chaque couche pour définir le module complexe de cisaillement pour chaque enrobés. Le saut de déplacement tangentiel est également déterminé à l'interface, considérée pour l'analyse comme sans épaisseur, et il permet de caractériser le comportement de l'interface par une rigidité d'interface complexe.

Le chapitre 3 décrit les procédures des essais réalisés au cours de la thèse sur les échantillons cylindriques creux à double couche en utilisant l'appareil 2T3C. Les compositions des matériaux à l'interface et dans les couches sont présentées dans la première partie. Les processus de fabrication des plaques et de préparation des échantillons sont ensuite détaillés. L'essai de module complexe en cisaillement, l'essai de non-linéarité et l'essai de fatigue sont les trois types d'essais réalisés avec les objectifs suivants à l'esprit :

- Etudier les propriétés thermomécaniques d'une interface non endommagée en « petites déformations », ainsi que le comportement visco-élastiques des mélanges

bitumineux dans les couches entourant l'interface, sur une large plage de température et fréquence,

- Etudier les effets de l'amplitude de sollicitations lors des essais cycliques sur le comportement de l'interface,
- Etudier le comportement à la fatigue des interfaces et des mélanges bitumineux dans les couches sous sollicitations cycliques.

Chaque étude a donné lieu à une campagne expérimentale spécifique sur quatre configurations d'interface, pour déterminer les effets de la variation de la teneur résiduelle du bitume à l'interface et des différents types d'interface sur le comportement thermomécanique, la performance en fatigue et l'effet de non-linéarité.

20 échantillons ont été testés. Tous les cylindres creux bicouches comprennent des couches supérieures constituées d'un mélange BBSG3 et des couches inférieures constituées d'un mélange EME2. Les échantillons de référence ont une couche d'accrochage à l'interface faite de bitume pur 160/220 avec une teneur résiduelle de 350 g/m<sup>2</sup>. Tous les échantillons de référence ont été soumis à l'essai du module complexe de cisaillement. La rigidité d'interface en cisaillement a été mesurée pour caractériser le comportement de l'interface et le module complexe de cisaillement pour les deux enrobés. Deux niveaux d'amplitudes de déformation globale de cisaillement ont été appliqués (50 et 200  $\mu\text{m/m}$ ), et trois niveaux de contraintes axiales constantes (-0,026, -0,125, -0,250 MPa) ont été appliqués pendant l'essai de module complexe de cisaillement. Les essais de module complexe de cisaillement ont été lancés à cinq températures (de 0°C à 40°C) et à cinq fréquences (de 0,01 Hz à 1 Hz). Pour les échantillons soumis à des contraintes axiales supérieures à -0,026 MPa, les essais à 40 °C n'ont pas été effectués, afin de réduire l'effet de fluage possible à haute température. Deux échantillons ont été soumis à des essais de non-linéarité (REFC-1, REFD-2). Les essais de fatigue ont été lancés à une température de 10 °C et à une fréquence de 3 Hz. La (mesure du module complexe pour les enrobés et la mesure de la rigidité d'interface ont été réalisées à 1 Hz). Trois autres configurations d'interface, comprenant un autre type de bitume à l'interface (bitume modifié SBS pour l'émulsion) et des teneurs en bitume résiduel à l'interface (250 et 450 g/m<sup>2</sup>), ont été testées afin d'évaluer leurs influences sur le comportement de l'interface. Pour ces configurations, les échantillons ont été testés avec une déformation de cisaillement globale de 50  $\mu\text{m/m}$  et une contrainte axiale de -0,026 MPa.

Les résultats des essais de module complexe de cisaillement et de l'étude de la non-linéarité sont détaillés au chapitre 4. Ils sont réalisés dans le domaine des petites déformations

50  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour l'ensemble de l'éprouvette et des moyennes déformations, 200 $\mu\text{m}/\text{m}$  pour l'ensemble de l'éprouvette.

La première partie décrit la procédure de dérivation de la rigidité complexe de l'interface et du module complexe des couches bitumineuses à partir des résultats d'un essai de module complexe de cisaillement réalisé avec l'appareil 2T3C. Le principe de superposition temps-température est introduit et le modèle viscoélastique linéaire (LVE) 2S2P1D est utilisé pour caractériser le comportement thermomécanique des couches bitumineuses. Les échantillons de cylindres creux 2T3C sont soumis à deux niveaux d'amplitudes globales de déformation par cisaillement, et le comportement de l'interface varie. À une amplitude de déformation globale de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , le modèle LVE 2S2P1D caractérise efficacement le comportement de l'interface. Néanmoins, lorsque la déformation de cisaillement globale est de 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ , le modèle visco-élasto-plastique  $\text{DBN}_{\text{PDSC}}$  sera mis en œuvre pour analyser les propriétés thermomécaniques des interfaces et caractériser la dissipation plastique.

Enfin, ce chapitre présente les résultats des expériences de non-linéarité qui expliquent l'effet l'amplitude de sollicitation sur les matériaux bitumineux soumis à un essai cyclique.

Différentes conclusions ont été tirées. Pour les mélanges bitumineux, le principe de superposition temps-température (TTSP) est validé. Le modèle LVE 2S2P1D reproduit avec succès le comportement thermomécanique des mélanges bitumineux en couches. En ce qui concerne les interfaces, les résultats valident le TTSP dans tous les résultats d'essai. Les observations suivantes ont pu être faites en fonction des différentes sollicitations:

- Pour une déformation de cisaillement globale de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , combinée à la contrainte axiale de -0,026 MPa : L'interface a montré son comportement LVE, et le modèle LVE 2S2P1D caractérise avec succès la thermomécanique des interfaces.
- Pour une déformation de cisaillement globale de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , combinée à trois contraintes axiales de -0,026 MPa, -0,125 MPa et -0,250 MPa : L'interface a montré son comportement LVE, et le modèle LVE 2S2P1D caractérise avec succès la thermomécanique des interfaces. Cependant, les contraintes de cisaillement axial ont une influence sur le module statique qui est un paramètre 2S2P1D utilisé pour décrire la friction et l'adhésion de la structure des agrégats, plus spécifiquement les agrégats de deux couches aux interfaces.
- Pour une déformation de cisaillement globale de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , combinée à la contrainte axiale de -0,026 MPa sur des échantillons avec différentes teneurs en couches d'accrochage et différents types de couches d'accrochage : La variation du contenu de la couche

- d'accrochage n'affecte pas le comportement LVE des interfaces. De même, la modification a des influences vraiment mineures sur les résultats expérimentaux et la modélisation LVE.
- Pour une déformation de cisaillement globale de  $200 \mu\text{m/m}$ , combinée à la contrainte axiale de  $-0,026 \text{ MPa}$  : L'interface présente une dissipation plastique pendant l'essai cyclique, et le modèle LVE 2S2P1D sous-estime l'angle de phase de la rigidité complexe de l'interface dans l'espace de Black et la courbe maîtresse de l'angle de phase. Le modèle visco-élasto-plastique DBNPDSC avec l'ajout de la dissipation plastique dans les éléments élastiques d'un modèle Kelvin-Voigt généralisé est présenté. Ce modèle a été utilisé pour décrire la dissipation plastique et permet de surmonter la sous-estimation de l'angle de phase à partir d'un modèle LVE.
  - Les tests de non-linéarité révèlent l'influence sur le module de cisaillement complexe, à la fois en norme et en angle de phase. L'augmentation de l'amplitude de la déformation de cisaillement globale (écart de déplacement à l'interface) réduit la norme et augmente l'angle de phase de la rigidité complexe de l'interface.

Le chapitre 5 est dédié à la présentation des résultats obtenus lors des essais de fatigue. Dans la première section, l'effet transitoire sera vérifié afin de confirmer la fiabilité des résultats de fatigue dérivés de la procédure expérimentale proposée. Dans la littérature, il est recommandé de commencer les mesures du module complexe sur les mélanges bitumineux à partir du troisième cycle, en fonction de la fréquence et de la température des essais. Avec une procédure d'essai spécifique telle que décrite au chapitre 3, les modules de cisaillement complexes dans les couches et la rigidité de l'interface ont été mesurés à partir du deuxième cycle. Ensuite, les résultats des essais de fatigue à trois niveaux différents d'amplitudes de déformation en cisaillement global ( $50 \mu\text{m/m}$ ,  $150 \mu\text{m/m}$ ,  $200 \mu\text{m/m}$ ) sont présentés. La rupture par fatigue a été observée exclusivement aux interfaces, et non à l'intérieur des couches. Six critères de fatigue sont utilisés pour déterminer la durée de vie en fatigue d'une interface. Comme mentionné au chapitre 4, les contraintes axiales peuvent influencer la cohésion entre les agrégats à l'interface et améliorer le module statique  $K_{00}$  (un paramètre dans la modélisation 2S2P1D). Les mêmes niveaux de contraintes axiales ( $-0,026 \text{ MPa}$ ,  $-0,125 \text{ MPa}$ ,  $-0,250 \text{ MPa}$ ) ont donc été étudiés pour déterminer leur influence sur le comportement en fatigue. En outre, il y a trois autres configurations avec une teneur en bitume résiduel plus élevée ou plus basse, et avec un bitume modifié SBS aux interfaces. Les résultats du chapitre 5 montrent les effets de ces différentes interfaces sur le comportement à la fatigue. Ensuite, la non-linéarité a été prise en considération pour les essais de fatigue aux interfaces. Enfin, le comportement en fatigue

par cisaillement de la couche bitumineuse a été étudié. En examinant la stabilité des évolutions des modules de cisaillement complexes, il est possible de savoir si un échantillon est déjà en rupture à l'interface.

Les essais de fatigue ont été lancés sur 20 cylindres creux à double couche. Les essais de fatigue de trois échantillons ont échoué en raison d'une coupure de courant et d'une surcharge de la mémoire de l'ordinateur lors de l'acquisition des données. Il s'agit des échantillons REFC-3, REFD-3 et LDO-1. Sur les 17 autres essais de fatigue réussis, les différentes combinaisons de paramètres de chargement appliqués aux échantillons et les différentes configurations d'interface ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Pour les trois niveaux d'amplitudes globales de déformation par cisaillement 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}/\text{m}$  et 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ , combinés à une contrainte axiale de -0,026 MPa : six critères sont utilisés pour évaluer la durée de vie en fatigue d'une interface : (1) le critère de réduction de 50 % de la rigidité ( $N_{f50}$ ) ; (2) le critère de l'angle de phase maximal ( $N_{f\phi_{\max}}$ ), (3) le critère de l'énergie dissipée maximale ( $N_{fW_{\max}}$ ), (4) le critère du changement de pente de la courbe d'évolution de l'énergie dissipée ( $N_{fslp,W}$ ), (5) le changement de pente de la courbe d'évolution des contraintes ( $N_{fslp,\tau\theta z}$ ), et (6) le changement de pente de la courbe d'évolution de l'écart de déplacement à l'interface ( $N_{fslp,\Delta u\theta}$ ). Grâce aux six critères, six lignes de Wohler ont été tracées dans le diagramme  $\Delta u_{\theta,0} - \text{Log } N_f$ .
- Pour une déformation globale en cisaillement de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , combinée à une contrainte axiale de -0,026 MPa : trois échantillons de la configuration de référence ont été testés avec le même paramètre de chargement. Les résultats montrent une bonne répétition.
- Pour une déformation globale de cisaillement de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , combinée à trois contraintes axiales de -0,026 MPa, -0,125 MPa et -0,250 MPa : plus la contrainte axiale appliquée est élevée, plus la durée de vie en fatigue de l'interface est importante.
- Pour une déformation de cisaillement globale de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , combinée à la contrainte axiale de -0,026 MPa sur des échantillons avec différents teneurs en couches d'accrochage et différents types de couches d'accrochage : l'augmentation de la teneur en couche d'accrochage à l'interface n'augmente pas la durée de vie en fatigue. Cependant, les résultats de trois échantillons avec la plus grande utilisation de couche d'accrochage de 450 g/m<sup>2</sup> n'ont pas été bien répétés.
- Pour une déformation de cisaillement globale de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , combinée à la contrainte axiale de -0,026 MPa sur les échantillons avec la couche d'accrochage modifiée avec du polymère :

la durée de vie en fatigue de l'interface utilisant du bitume à l'interface a été notablement améliorée.

Le biais de non-linéarité a été incorporé dans l'analyse des résultats de fatigue avec une grande influence. Les modules complexes de cisaillement du mélange bitumineux en couches ne sont pas notablement affectés pendant les essais de fatigue. Cependant, en observant la stabilité de la mesure des modules complexes de cisaillement (norme et angle de phase) du mélange bitumineux en couches pendant les essais de fatigue, il est possible de déterminer quand il y a une défaillance de fatigue à leur interface. Cette observation peut donc être considérée comme un critère de fatigue.