



N°d'ordre NNT : 2020LYSET009

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
opérée au sein de
l'École Nationale des Travaux Publics de l'État

École Doctorale N° 162
Mécanique, Energétique, Génie Civil et Acoustique (MEGA)

Spécialité / discipline de doctorat : Génie Civil

Soutenue publiquement le 29/06/2020, par :

Reuber Arrais Freire

Utilisation de géogrilles en fibre de verre pour le renforcement des couches d'enrobé bitumineux

Résumé en Français

Devant le jury composé de :

DJERAN MAIGRE, Irini	Prof., INSA de Lyon	Présidente
CHAZALLON, Cyrille	Prof., INSA de Strasbourg	Rapporteur
CANESTRARI, Francesco	Prof., Università Politecnica delle Marche	Rapporteur
RIOT, Mathilde	Expert, Afitexinov	Examinatrice
POUGET, Simon	Dr., EIFFAGE Infrastructures	Examineur
DI BENEDETTO, Hervé	Prof., Université de Lyon/ENTPE	Directeur de thèse
SAUZÉAT, Cédric	Prof., Université de Lyon/ENTPE	Co-Directeur de thèse
LESUEUR, Didier	Dr., Afitexinov	Invité
VAN ROMPU, Julien	Dr., EIFFAGE Infrastructures	Invité

Récemment, l'utilisation de géogrilles en fibre de verre placées dans des couches d'enrobé bitumineux a augmenté comme solution technique pour réhabiliter les chaussées, prolonger sa durée de vie et réduire les coûts d'entretien. Ils pourraient être utilisés à la fois pour la réhabilitation et la construction de nouvelles chaussées bitumineuses. Le renforcement par géogrille peut être efficace pour réduire les principaux problèmes des chaussées souples à travers le monde, les ornières et les fissures. Les géogrilles en fibre de verre sont préférables pour présenter à la fois une résistance et une flexibilité à haute tension. Il est également thermiquement et chimiquement stable aux températures de malaxage pour les enrobés bitumineux, et facilement démontable par fraisage dans le cas de travaux d'entretien de chaussées supplémentaires. De nombreux travaux ont également indiqué que la géogrille en fibre de verre présente de meilleures performances en termes de résistance à la fissuration par rapport aux autres types de géogrilles. Les géogrilles sont également efficaces pour le renforcement des couches granulaires et des chaussées en béton.

Cette thèse de doctorat a été développée au Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), France. Il faisait partie d'un partenariat entre les sociétés françaises Afitexinov et EIFFAGE Infrastructures, et ENTPE. Il a également bénéficié du soutien du programme brésilien de science sans frontières (CsF - *Ciência sem Fronteiras*). L'objectif de cette étude est de contribuer au développement de nouveaux géosynthétiques structurés pour le renforcement des couches bitumineuses des chaussées, ainsi que de méthodes de dimensionnement transférables vers l'ingénierie. En plus de fournir des informations utiles qui pourraient permettre la proposition d'une nouvelle méthode de conception pour les structures de chaussées renforcées. À cette fin, cinq complexes de plaque ont été conçues, quatre à deux couches et une entière, contenant le même type d'enrobé bitumineux quelle que soit la configuration. À partir des plaques à deux couches, trois ont été renforcées par la combinaison de deux géogrilles en fibre de verre (résistance à la traction maximale de 50 et 100 kN/m) avec deux émulsions comme couche d'accrochage (bitume pur et modifié par SBS). La dernière plaque bicouche était non renforcée, ne contenant que du bitume en émulsion pur à son interface. Cinq complexes de plaques ont été utilisés pour mener cette recherche. Ils ont été divisés en deux groupes concernant la présence d'interface. Le complexe A n'a pas d'interface, tandis que B, C, D et E ont une interface et sont désignés comme des plaques bicouches. Concernant les dalles bicouches, elles sont également divisées en deux groupes concernant la présence de géogrille en fibre de verre: non renforcée (complexe B) et renforcée (complexe C, D et E). Le complexe C est une combinaison de géogrille 100 kN/m avec une émulsion à base de bitume pur. Le

complexe D est une combinaison de géogridde de 50 kN/m avec une émulsion à base de bitume pur. Le complexe E est une combinaison de géogridde de 100 kN/m avec une émulsion à base de bitume modifié aux polymères.

Des échantillons cylindriques et en forme de poutre ont été carottés dans les plaques afin de mener quatre campagnes expérimentales. Les échantillons cylindriques ont été carottés avec un diamètre de 75 mm et une hauteur de 140 mm, et dans deux directions de carottage différentes. Les spécimens nommés type H ont été carottés horizontalement, par rapport à la direction de compactage du rouleau, tandis que ceux nommés type V ont été carottés verticalement. De plus, certains spécimens cylindriques carottés verticalement ont été carottés dans un diamètre plus grand (136 mm), appelés spécimens de type VL.

La première campagne expérimentale a porté sur la caractérisation du comportement des éprouvettes cylindriques renforcées par une géogridde en fibre de verre dans le domaine de petites déformations (amplitude de 50 $\mu\text{m/m}$) à l'aide de essais cycliques de traction-compression, appelés essais de module complexe. Une nouvelle méthode d'analyse d'interface a été proposée pour les essais de module complexes sur les échantillons renforcés par géogridde et ayant l'interface orientée perpendiculairement à la direction longitudinale de l'échantillon cylindrique. La deuxième campagne expérimentale a porté sur la caractérisation à la charge de traction axiale monotone. Trois températures (0, 19 et 40°C) ont été combinées avec deux vitesses de déformation (2 et 0,002%/min) pour la caractérisation. La troisième campagne expérimentale concernait la caractérisation à la fatigue. Des essais de traction-compression sinusoïdale à 10°C, 10 Hz et à déformation contrôlée à différentes amplitudes (80, 90, 100 et 110 $\mu\text{m/m}$) ont été effectués. La quatrième campagne expérimentale a porté sur la caractérisation sur la résistance à la propagation des fissures. L'essai *four-point bending notched fracture* (FPBNF), développé au LTDS/ENTPE, a été réalisé sur les échantillons prismatiques en forme de poutre avec 550 × 70 × 110 mm de dimension. L'essai a été réalisé en contrôlant le déplacement du piston à la vitesse de 2 mm/min. Un dispositif de corrélation d'image numérique (DIC) 3D a été utilisé pour calculer le champ de déformation pendant la propagation de la fissure ainsi que son hauteur.

Campagne expérimentale de traction-compression cyclique

Le but de cette partie est de présenter la campagne expérimentale menée pour caractériser les éprouvettes, à partir de différents complexes, au domaine des petites déformations à l'aide

d'essais cycliques de traction-compression. Ces essais sont appelés de module complexe. De plus, la machine hydraulique utilisée pour effectuer le test, les transducteurs utilisés pour mesurer les variations physiques, la température et la force pendant le test sont détaillés.

Récemment, des nombreux types de logiciels sont utilisés pour le calcul multicouche dans le dimensionnement de nouvelles chaussées, par exemple MEPD-G aux États-Unis et Alizé en France. Le renforcement de la géogridde peut être inclus en tant que couche équivalente si ses propriétés (rigidité, coefficient de poisson), ainsi que l'épaisseur, sont connues. Ainsi, il est nécessaire de caractériser les propriétés mécaniques de l'interface en laboratoire. Une nouvelle méthodologie pour la détermination du comportement viscoélastique linéaire (VEL) de l'interface renforcée par des géogriddes est présentée concernant les éprouvettes de type V. Deux approches ont été utilisées pour caractériser l'enrobé bitumineux et l'interface d'une éprouvette de type V lors d'un essai de module complexe. La première est une approche globale qui utilise l'hypothèse de la mécanique des milieux continus. Le second suppose que l'interface est infiniment fine. A partir de cette méthodologie, chaque éprouvette de type V donne deux modules complexes différents, l'un concernant l'enrobé bitumineux (E_A^*) et l'autre de l'interface (E_G^*). La deuxième approche d'analyse d'interface est réalisée en supposant que l'interface est un film mince. Dans ce cas, le comportement pourrait être représenté par une raideur d'interface (K_G^*) qui représente la raideur qui relie la discontinuité à l'interface. À partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes ont pu être tirées:

- Les matériaux non renforcés ont présenté un comportement LVE qui a été modélisé avec succès à l'aide du modèle 2S2PD.
- Le module complexe concernant les couches de mélange bitumineux (E_A^*) dans les éprouvettes renforcées a été obtenu avec succès et validé avec les résultats obtenus pour des mélanges sans le renforcement.
- Le comportement d'interface obtenu est VEL et il pourrait être modélisé par 2S2PD.
- Le module complexe de l'interface (E_G^*) dans les éprouvettes renforcées a été obtenu avec succès et validé à l'aide de l'éprouvette B (interface sans géogridde) en obtenant le même ordre de grandeur classiquement obtenu dans les essais sur le film de bitume.
- The complex modulus concerning interface (E_G^*) in reinforced specimens was successfully obtained and validated using specimen B (interface without geogrid) by obtaining the same order of magnitude of a bitumen film thickness and modulus.

- La méthode considérant le milieu continu dans la couche d'interface et celle basée sur une interface comme un film mince donnent des comportements VEL similaires.
- La méthodologie proposée pourrait être un outil très utile pour améliorer le calcul de dimensionnement des structures de chaussées renforcées par géogrilles.
- La qualité de la liaison d'interface, concernant l'application correcte du dosage d'émulsion et l'amélioration de l'adhérence par modification pour SBS, a présenté une influence plus élevée dans la rigidité de l'interface que le type de géogrille.
- Un faible niveau de mobilisation de la géogrille a été obtenu à des faibles amplitudes de déformation sur les essais de traction-compression des éprouvettes type H. Surtout pour les éprouvettes avec interface avec du bitume modifié par SBS.

Campagne expérimentale de traction

La plupart des études dans la bibliographie liée au renforcement des géogrilles ont convenu de ses avantages pour limiter le développement de fissures réfléchissantes. L'étape supplémentaire dans l'étude des avantages du renforcement des géogrilles est l'identification d'autres mécanismes de renforcement qui peuvent améliorer les performances des chaussées. Certains auteurs ont travaillé sur l'augmentation de la capacité structurelle de la chaussée due au renforcement, en particulier le contrôle de la déformation permanente dans les couches de chaussée.

Le but de ce chapitre est de présenter la campagne expérimentale menée pour caractériser les cinq complexes différentes, soumises à des sollicitations axiales monotones. La procédure expérimentale et les dispositifs sont présentés, ainsi que les échantillons testés pour cette caractérisation. Dans ce chapitre, des discussions sur l'effet de la taille du diamètre et le comportement de l'interface dans les échantillons de type V, en fonction des résultats des essais, sont organisées. Par ailleurs, une vérification du principe d'équivalence temps-température sur le comportement plastique des enrobés bitumineux et sur les domaines non linéaires est réalisée. Enfin, la contribution de la géogrille au support de traction des éprouvettes renforcées de type H est évaluée.

En ce qui concerne les essais effectués sur les éprouvettes de type V, un calcul similaire effectué pour l'essai de module complexe a été à nouveau effectué. Les données obtenues des

deux couples d'extensomètres ont permis de calculer la déformation axiale d'enrobé bitumineux (ε_A) et la déformation axiale de la couche d'interface (ε_G). Cette méthode suppose que la mesure de la déformation axiale de chaque extensomètre est la composition de ε_A et ε_G .

À partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes ont pu être tirées:

- La méthodologie d'analyse d'interface basée sur celle présentée pour l'essai de module complexe a été utilisée avec succès pour mesurer la déformation au niveau de l'interface. Cette méthode a été capable de caractériser le comportement de l'interface pendant les essais de traction.
- Lors des essais de traction réalisés sur des éprouvettes de type V contenant une interface (renforcée ou non), l'interface était la plus responsable du support de charge lors des essais de traction. La déformation mesurée dans l'enrobé bitumineux a été beaucoup plus petite que la déformation mesurée dans l'interface. Ainsi, la qualité de la liaison d'interface a une influence directe sur la résistance à la traction maximale des éprouvettes de type V.
- La variation du diamètre de l'éprouvette renforcée de type V n'a présenté aucune différence significative concernant le comportement en traction. De plus, la variation obtenue était principalement due à la qualité de la liaison d'interface et aux différences rencontrées dans l'interface des échantillons.
- La vitesse de déformation lente utilisée pour la validation du principe d'équivalence temps-température doit être calculée en utilisant le a_T calculé sur l'équation du modèle WLF sur les données VEL, obtenue dans l'essai de module complexe, comme cela est classiquement fait dans les travaux de LTSD / ENPTE. Le a_T obtenu à partir des tests de balayage de fréquence peut entraîner des erreurs.
- Bien que les vitesses de déformation lentes aient été légèrement différentes, le principe d'équivalence temps-température a été validé pour toutes les complexes (renforcées ou non) concernant les éprouvettes de type H.
- Concernant les échantillons de type V du complexe A, le principe d'équivalence temps-température a également été validé. Cependant, pour les échantillons contenant des interfaces, le principe d'équivalence temps-température n'a pas été concluant puisque les essais étaient contrôlés par la mesure de l'extensomètre, qui est une composition de la déformation de l'enrobé bitumineux et de l'interface.
- Les éprouvettes renforcées de type H à hautes températures la géogrille n'a pas été mobilisée, peut-être en raison d'un glissement dans l'interface causé par la viscosité

élevée du bitume. Cependant, avant l'étape de fluage, la courbe contrainte vs déformation présentait la même pente que la ligne correspondant à la réponse élastique de la géogrille, ce qui pourrait indiquer une mobilisation de la géogrille à ce point.

- Les éprouvettes renforcées de type H à basses températures il y a une plus grande possibilité de mobilisation de géogrilles pendant l'essai. Cependant, il n'a pas d'influence significative sur la résistance à la traction en raison de la rigidité élevée du mélange bitumineux dans ces conditions d'essai.
- L'interface contenant uniquement du bitume a présenté une résistance à la traction plus élevée que les éprouvettes renforcées. Cependant, la résistance de l'interface doit être influencée par son épaisseur réelle et l'interface des éprouvettes renforcées est au moins trois fois plus épaisse.

Campagne expérimentale de fatigue

Certains auteurs soutiennent l'idée que la géogrille augmente la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux renforcés. La méthode française de dimensionnement présente une vérification de la résistance à la fatigue sur sa procédure en utilisant le paramètre ε_6 (amplitude de déformation correspondant à un million de cycles de durée de vie de fatigue) dans le calcul de la déformation admissible (ε_{adm}). Donc, une augmentation de la résistance à la fatigue due au renforcement des géogrilles pourrait conduire à une grande amélioration dans le dimensionnement des nouvelles structures de chaussées. De plus, cela pourrait conduire à une diminution de l'épaisseur de la couche d'enrobé bitumineux dans la structure finale de la chaussée, ce qui a un impact important sur les coûts de construction des chaussées.

Le but de cette partie est de présenter la campagne expérimentale de tests de fatigue étudiée dans ce travail. Des essais de traction-compression sinusoïdales à 10°C, 10Hz et de déformation contrôlée à différentes amplitudes sont réalisés pour caractériser la durée de vie en fatigue. Seuls les échantillons carottés dans le même sens de compactage (type H) sont utilisés pour mener la campagne expérimentale. La procédure d'essai, ainsi que la presse hydraulique et les capteurs utilisés pour mesurer les variations physiques, la température et la force pendant l'essai sont entièrement détaillés dans ce chapitre. De plus, la procédure d'analyse est présentée, ainsi que la définition des critères de rupture. Des discussions concernant l'influence de la présence et du type de géogrille ont lieu ainsi que le type de couche d'accrochage en émulsion sur la

résistance à la fatigue des mélanges bitumineux. Enfin, l'effet de la géogrid dans les paramètres de fatigue utilisés dans la méthode française de dimensionnement des chaussées est obtenu.

À partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes ont pu être tirées:

- Comme on le trouve classiquement dans la littérature, les tests à des amplitudes de déformation plus élevées ont supporté moins de cycles avant la détérioration de l'échantillon, quelle que soit la présence et le type de la géogrid.
- Quel que soit le complexe, le premier critère de rupture était $N_{f_concavity}$ et c'était le critère le plus précis pour identifier la transition entre les phases II et III. Les critères classiques $N_{f_slope_φ}$ et $N_{f_50\%}$ ont présenté des ruptures plus retardées.
- Regardless of the complex, the earliest failure criterion was $N_{f_concavity}$ and it was the most accurate criterion to identify the transition between phases II to III. The classical $N_{f_slope_φ}$ and $N_{f_50\%}$ criteria presented later failure, overestimating it.
- Les différents complexes ont présenté une sensibilité distincte à la variation d'amplitude de la déformation. Les complexes renforcés (C, D et E) étaient plus résistants à la fatigue à des amplitudes de déformation élevées et moins résistants à la fatigue à de faibles amplitudes de déformation par rapport aux non renforcés (A et B).
- Le complexe contenant du SBS a présenté plus de résistance à fatigue dans les amplitudes de déformation élevées. Les complexes avec géogrid de 50 et 100 kN/m et émulsion de bitume ont présenté des courbes de Wöhler similaires. La même chose s'est produite avec les complexes non renforcés (contenant ou non l'interface). Il suggère que l'augmentation de la qualité de la liaison d'interface due à la présence de SBS était plus significative sur la résistance à la fatigue que la résistance à la traction maximale de la géogrid.
- La géogrid pourrait ne pas être entièrement mobilisée lors de l'essai de fatigue, ce qui pourrait conduire à une sous-estimation de la contribution de la géogrid à la performance en fatigue des enrobés bitumineux renforcés, principalement liée à la géométrie de l'éprouvette utilisée pour la caractérisation dans ce travail.
- Pour la méthode française de dimensionnement des chaussées, selon le paramètre ε_6 obtenu dans ce travail, l'effet de renforcement de la géogrid était négligeable.

Campagne expérimentale de propagation de fissures

De nombreux travaux de la littérature démontrent que le renforcement par géogridde peut être efficace pour réduire la propagation des fissures dans les chaussées. Les géogriddes ont été proposées pour contrôler la fissuration réfléchissante depuis les années 1970, lorsque la *Federal Highway Administration* (FHWA) américaine a institué un programme pour réduire la fissuration réfléchissante sur les routes. Les fissures réfléchissantes sont les fissures sur la couche de surface formées par la propagation de celles présentées dans la couche sous-jacente. Le renforcement par géogriddes a été indiqué car il pourrait fonctionner comme un composant de soulagement des contraintes et donc efficace pour retarder la fissuration par réflexion. De nombreux travaux ont indiqué une amélioration notable des performances des enrobés bitumineux du fait du renforcement, retardant l'initiation et la propagation des fissures. De plus, la technique de corrélation d'image numérique (DIC) s'est avérée être un outil avantageux permettant d'identifier différents mécanismes de rupture lors de la propagation de fissures dans des poutres renforcées et montrant la capacité de soulagement des contraintes grâce aux géogriddes.

Le but de ce chapitre est de présenter la campagne expérimentale de test de propagation de fissure étudiée dans ce travail. Les essais de fracture entaillée par flexion en quatre points (FPBNF) conçus à l'Université de Lyon/ENTPE ont été réalisés dans trois poutres de chaque complexe. Pour mieux analyser les tests, un dispositif de DIC 3D a été utilisé pour calculer le champ de déformation lors de la propagation de la fissure ainsi que sa pointe. On évalue l'influence de la présence et du type de géogridde ainsi que du type de couche d'accrochage e sur la résistance à la propagation des fissures des enrobés bitumineux. Enfin, une analyse à partir des résultats DIC est réalisée pour évaluer la capacité de détente des mélanges bitumineux de renforcement de géogridde en fibre de verre ainsi que le comportement à la fissuration.

À partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes ont pu être tirées:

- La présence de l'interface avec uniquement du bitume sur la poutre n'a pas modifié la résistance à la propagation des fissures par rapport au complexe A (sans interface) sur les courbes force vs flèche.
- La même valeur du pic de charge a été obtenu quelle que soit la constitution de l'échantillon. Sauf pour la configuration D, qui présentait le P_{max} le plus bas.
- La présence de la géogridde n'influence pas sensiblement la courbe depuis le début jusqu'à la valeur du pic de force dans la courbe force vs flèche.
- Un plateau de Force a été observé dans les résultats à partir de 1mm de flèche expliqué par la mobilisation de la géogridde lors du test.

- La résistance maximale à la traction de la géogrid influence directement la capacité de support de chargement de la poutre à la propagation de la fissure.
- La présence de géogrid pourrait effectivement retarder la propagation des fissures dans les poutres renforcées.
- Les échantillons renforcés présentent une propriété de soulagement des contraintes en raison de la présence de la géogrid. Pour la plupart des échantillons renforcés, la fissure a dévié sa trajectoire lorsqu'elle a atteint l'interface avec la géogrid. Alors que pour ceux non renforcés, la fissure présentait un chemin de propagation simple.
- Compte tenu de l'approche énergétique, les éprouvettes contenant l'interface avec seulement l'émulsion (B) présentaient l'énergie la plus faible nécessaire à la propagation des fissures. Le complexe D (50kN/m et bitume pure) présentait le taux de restitution d'énergie le plus faible des éprouvettes renforcées, mais 1,9 fois plus élevé que B. Le complexe C (100kN / m et bitume pure) et E (100kN/m et bitume modifié par SBS) présentaient un taux de restitution d'énergie similaire, environ 3,3 fois supérieur à B et 1,7 fois supérieur à D.
- Un comportement de déformation classique des poutres soumises à la flexion étudiée en génie civil a été mesuré en utilisant l'analyse de la déformation moyenne en fonction de la hauteur de poutre, obtenues à partir des résultats DIC en fonction de la hauteur de la poutre des éprouvettes non renforcées.
- Jusqu'au pic de charge, la géogrid est située à l'axe neutre de la poutre. Par conséquent, il n'est mobilisé qu'au début de la propagation de la fissure.

Perspectives

Suite à ces conclusions, quelques recommandations et perspectives de recherches futures sont présentées ci-après.

- Une caractérisation complémentaire de la déformation permanente à haute température, classiquement utilisée pour la caractérisation de l'orniérage (autour de 60°C), doit être réalisée. A cette température, la rigidité de l'enrobé bitumineux diminue et la géogrid pourrait fortement contribuer à l'amélioration des performances des chaussées.

- La création d'une nouvelle méthode de dimensionnement des structures de chaussées, basée sur une adaptation d'une méthode préexistante qui rend compte des effets contributifs de la géogridde fonde dans cette thèse de doctorat. Les contributions de la géogridde pourraient être basées sur une combinaison des résultats de fatigue, concernant le paramètre de pente de la courbe de Wöhler en fatigue ($-1/b$), avec l'augmentation de la résistance à la propagation des fissures.
- Construction et suivi d'un essai terrain renforcé par les géogriddes en fibre de verre et des émulsions utilisées comme couche d'accrochage dans cette étude, afin de valider les résultats obtenus lors de la caractérisation en laboratoire. De plus, la performance à long terme d'une chaussée renforcée par une géogridde en fibre de verre pourrait être évaluée.