

RENFORCEMENT DES ENROBÉS PAR GÉOGRILLE ACIER : ESSAIS DE NOTTINGHAM ET VIRGINIA SMART ROAD

STEEL GEOGRID FOR ASPHALT REINFORCEMENT : NOTTINGHAM TESTS AND VIRGINIA SMART ROAD

Sébastien GASTAUD, Alexandre PLASTRE
France Maccaferri, Valence, France

RÉSUMÉ – Les géogrilles permettent d'accroître la durée de vie des chaussées. Cet article présente les résultats de deux études sur les géogrilles en acier. L'université de Nottingham a montré que, parmi les produits testés, seule la géogrille en acier n'entraîne pas de baisse de la résistance au cisaillement de l'enrobé, or cette propriété est apparue capitale dans la capacité des géogrilles à renforcer les chaussées. L'essai pilote a montré une amélioration significative de l'enrobé renforcé par géogrilles acier tant au niveau de la fissuration que de l'orniérage. Sur la Virginia Smart Road, les mesures réalisées ont permis de mettre en avant une baisse de contraintes et de déformations lors du passage des véhicules et une amélioration de la résistance à la fatigue pouvant atteindre 250 % par rapport à la section non renforcée.

Mots-clés : Géogrille acier, Route, Enrobé, Fissuration.

ABSTRACT – Steel geogrid are considered as an efficient solution to improve road durability. This paper presents the result from two experimental studies on steel geogrids. Nottingham tests have shown that the principal contributing factor which affects the degree of enhanced life is the quality of the bond between the geogrid and the asphalt. Steel geogrid allows such a good bond between the asphalt layers above and below it that the interface is no less stiff than if no grid were present. Pilot Scale Pavements have shown that steel geogrid can lead to an important improvement of asphalt layer by deleting both cracking and rutting. On the Virginia smart road, test results have shown that steel reinforcement improves the fatigue life by a factor up to 250 % compared to the unreinforced section.

Keywords: Steel geogrid, Road, Asphalt, Cracking.

1. Introduction

Les routes constituent le principal axe de transport en France : 85% des marchandises y sont transportées, soit 289 milliards de tonnes-kilomètres/an. La France compte environ 30000 km d'autoroutes et de nationales. L'entretien de ce réseau mobilise environ 1,2G €/an soit environ 40000 €/km, dont un tiers dédié à la réfection des enrobés (MEDDE 2015). En effet, ce matériau complexe se fatigue sous les effets des sollicitations cycliques générées par les charges roulantes et des aléas météorologiques. Cette fatigue se traduit par différents types de pathologies rendant la route impropre à son usage : fissuration, faïençage, orniérage, décollement, nids de poule.... (SETRA, 1996).

Face à ces enjeux, un travail de R&D très important a été réalisé pour accroître la durée de vie des chaussées. Dans un premier temps, les formulations des enrobés ont été améliorées en utilisant divers additifs : moussants, fillers, chaux, tensio-actifs... (Zemmiri, 2008). Outre cette amélioration intrinsèque des enrobés, d'autres solutions consistant à insérer des géosynthétiques dans les routes ont été développées afin de réduire le coût de construction (économie de matériau) et allonger la durée de service. Les géosynthétiques sont utilisés dans les chaussées en Europe depuis plus de 40 ans : les avantages qu'ils confèrent ont été vérifiés aussi bien au laboratoire que sur le terrain (Watn, 2011). On distingue deux grandes fonctions assumées par les géosynthétiques dans les enrobés :

- réduire la résistance au cisaillement des interfaces entre les couches afin de découpler les couches superficielles des couches sous-jacentes. Cette fonction est assumée par des géotextiles présentant une forte capacité de rétention du bitume. Le géotextile saturé de bitume agit comme un sable enrobé : il bloque la propagation de la fissure en la "noyant" dans une interface plastique. Cette fonction de relaxation (*stress relief* en anglais) n'est pas traitée dans cet article ;

- réduire les efforts dans la couche de roulement en les transférant vers les renforts géosynthétiques. Dans ce cas, ce sont des géogrilles qui sont utilisées car elles présentent une raideur à la traction plus importante que celle de l'enrobé. Cet article se focalise sur cette fonction de renforcement.

Cet article présente les principaux résultats de deux études expérimentales sur les géogrilles Acier. Dans la partie 2, les trois essais réalisés par l'université de Nottingham à la demande d'un consortium d'entreprise fabricant des renforts de chaussées sont présentés :

- Essai de cisaillement de l'interface entre deux couches d'enrobé séparées par une géogrille. Cet essai permet de mesurer l'impact de la géogrille sur l'adhésion des couches d'enrobé.
- Essai de flexion 4 points avec barreau semi-supporté. Cet essai permet de comparer toutes les géogrilles dans leur capacité à accroître la résistance à la fatigue avant rupture.
- Essai pilote : une structure de chaussée complète (5 m de long, 1,2 m de haut) a été réalisée dans un hall afin d'évaluer 4 géogrilles différentes.

Bien que les méthodes de dimensionnement diffèrent d'un pays à l'autre, les résultats présentés sont issus d'essais de laboratoire qui, par définition, simplifient la réalité afin de comprendre les mécanismes qui sont, pour leur part universels.

Dans la partie 3, l'essai grandeur réelle du projet Virginia Smart Road est présenté : cette route expérimentale a permis de mesurer les contraintes et les déplacements à différents niveaux de la structure de chaussée. Une modélisation aux éléments finis, calée sur les données acquises par des capteurs intégrés dans la chaussée, a permis d'évaluer l'efficacité du renforcement.

1.1. Fissuration des enrobés

La fissuration résulte de la perte d'élasticité de l'enrobé (fatigue) et de l'accumulation de déformations permanentes. Trois types de contraintes conduisent à une fissuration de la chaussée :

- les charges de trafic sollicitent de manière cyclique l'enrobé en cisaillement dans le plan horizontal (accélération et freinage des véhicules) et en compression sur l'axe vertical (poids des véhicules),
- les variations de température entraînent un retrait thermique des couches d'assise (en particulier celles traitées aux liants hydrauliques) et un changement dans la rhéologie du bitume.
- les mouvements du sol support dus aux cycles gel/dégel et retrait/gonflement ou à des tassements différentiels résultant d'un mauvais dimensionnement des couches de forme (portance insuffisante).

Par ailleurs, l'histoire de la chaussée a une importance capitale : des discontinuités peuvent être présentes en profondeur et entraîner lors de la réhabilitation, une dégradation très rapide de la nouvelle couche de roulement. Cette fissuration, appelée fissuration réfective résulte de la réflexion des fissures profondes dans l'enrobé de surface. Les discontinuités préexistantes peuvent être (Fig.1) :

- les joint entre dalles béton : beaucoup de chaussées ont encore une fondation rigide en béton,
- des discontinuités structurelles suite à un élargissement de la chaussée ou à une tranchée,
- des fissures de l'ancienne chaussée si les couches n'ont pas été rabaotées avant la réhabilitation.



Figure 1. G. Fissuration par retrait thermique. D. Fissuration réfective d'une chaussée fondée sur dalles béton. Norvège (Watn, 2011).

Dans ces situations, une réhabilitation par rechargement ou après rabaotage superficiel est souvent inefficace et peu durable. La fissuration réfective est systématique et peut survenir de façon très rapide

(quelques mois) car la nouvelle couche n'est pas en mesure de s'opposer à la remontée de fissures depuis les couches sous-jacentes (Perez Romero, 2008).

1.2. Renforcement par géogridde

Depuis les années 90, des géogriddes sont installées dans les enrobés afin de retarder la remontée de fissure : les enrobés sont des matériaux résistants à la compression mais faibles en traction : leur renforcement repose sur l'installation de géogriddes dont la raideur en traction est supérieure à celle de l'enrobé (module entre 15 et 20 GPa ; Francken, 2004). Les géogriddes fonctionnent dans l'enrobé comme l'acier dans le béton armé. Les géogriddes sont des structures planes à base de polymères, de fibre de verre ou d'acier qui forment un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction. Trois matériaux (Fig. 2) sont utilisés pour le renfort des enrobés : les géogriddes en fibre de verre (GG-FV) dont le module est d'environ 80 GPa et, plus marginalement, les géogriddes en polypropylène (GG-PP) et les géogridde acier (GG-A) dont le module se situe autour de 200 GPa (Québec-Bitume, 2015).

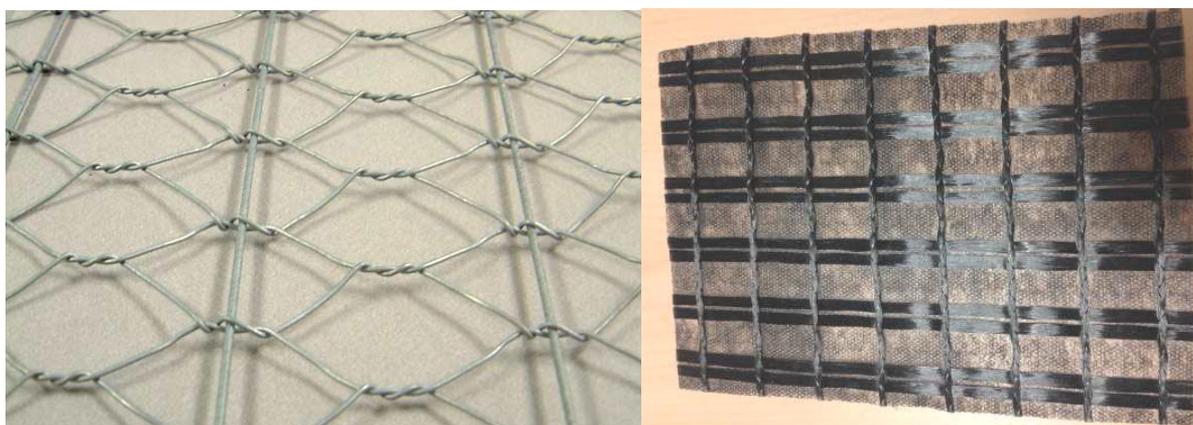


Figure 2. G. Géogridde Acier. D. Géogridde fibre de verre : Macgrid AR.

Les géogriddes peuvent être utilisées en travaux neufs ou en réhabilitation, suite à la réalisation de tranchées, d'élargissements et sur des anciennes chaussées béton. Les géogriddes sont particulièrement efficaces pour lutter contre la fissuration réfléctive : elles bloquent le mouvement des lèvres de la fissure et limitent la sollicitation de la couche supérieure (Baek et Al-Qadi, 2009). Elles sont aussi efficaces pour lutter contre la fissuration due au retrait thermique de l'assise. Les géogriddes sont peu adaptées pour lutter contre les déformations liées au mouvement des couches de fondation.

Il n'existe aucune méthode faisant consensus pour dimensionner les géogriddes. Ceci est dû à la complexité des mécanismes mis en jeu et à la multiplicité des paramètres d'influence : mécanismes de fissuration (réfléctive, fatigue, retrait thermique...), trafic, température, propriétés et histoire des matériaux en place, propriétés des matériaux de réhabilitation, propriétés du géosynthétique et enfin interaction géosynthétique / enrobé. Le choix des géogriddes se fait donc essentiellement sur des retours d'expérience. Signalons ici le groupe de travail «anti-remontée de fissures» porté par le CFG qui réalise actuellement un guide de recommandation pour l'usage des géosynthétiques dans les enrobés, comme il en existe déjà en Suède, Norvège, Allemagne, et Pays-Bas.

1.3. Géogridde acier

La société industrielle MACCAFERRI produit une GG-A depuis les années 80 : le Roadmesh[®]. Cette géogridde est un grillage double torsion muni de barrettes transversales insérées au cours du tréfilage. Les fils ont un diamètre de 2,4 mm et les barrettes de 4,4 mm. Ainsi l'épaisseur atteint 9,2 mm au niveau des jonctions entre grillage et barrette. Cette géogridde est protégée de la corrosion par un alliage de Zinc classe A (EN 10244-2). Ce sont les résultats obtenus avec ce produit qui sont présentés dans cet article.

Le système enrobé / GG-A a fait l'objet d'une multitude d'études en laboratoire et sur le terrain. Dès 1996, Vanelstraete et Francken ont réalisé des essais pour évaluer différents types de renforcement limitant la fissuration réfléctive. Parmi les solutions testées, les GG-A étaient la solution la plus efficace pour limiter la fissuration car elles supportent les grandes contraintes au voisinage des fissures grâce à un fort inter-blocage des particules de l'enrobé sur les fils de renfort (Veys, 1996). Selon la modélisation

développée par Tesoriere et Ticali (2003), les GG-A permettent de réduire la contrainte dans l'enrobé d'au moins 50 % dans toutes les directions et ainsi limiter la fatigue (perte d'élasticité). D'autres études quantifient des facteurs d'amélioration conférés par les GG-A (nombre de cycle supporté par un échantillon renforcé par rapport à un échantillon non renforcé) : supérieur à 3 (Huhnholz, 1996), environ 4 (Elsing et Sobolewski, 1998), jusqu'à 3 (Brown et al., 2001), et 1,5 (Elseifi et Al-Qadi, 2004).

2. Essais de Nottingham

A la demande de 6 sociétés internationales fabriquant des renforts de chaussées, l'université de Nottingham a réalisé en 1999, une étude indépendante pour comparer les différentes solutions existantes. Depuis, aucun autre programme de cette ampleur n'a été mené, voilà pourquoi nous présentons ces résultats. Ils sont tirés du rapport finalisé en octobre 1999 par le Pr. Brown, et ses collègues le Dr Thom, Mr Sanders, Mr Brodrick et Mr Cooper. Beaucoup des résultats sont reportés dans la thèse de Sanders (2001). Le tableau 1 présente les types de géogrilles testées. Les géogrilles en polypropylène et en fibre de verre ont été testées dans leurs versions avec et sans géotextile (GTX).

Tableau 1. Types de géogrilles testées et valeurs mesurées par des essais de traction.

Type de géogrille	Abréviation	Taille de la maille (mm)	Résistance à la traction (kN/m)	Raideur (MN/m)
Géogrille extrudée / étirée en polypropylène	GG-PP	64 x 64	21-24	0,33-0,34
Géogrille en fibre de verre	GG-FV	26 x 40	32-34	0,35-0,6
Géogrille tréfilée en acier	GG-A	85 x 85 (maille hexagonale)	49	22,7

2.1. Essais de cisaillement

Des essais de cisaillement à la boîte ont été réalisés afin de mesurer l'impact des géogrilles dans l'adhésion entre les couches. Les auteurs ont opté pour un chargement cyclique (2 Hz) de l'éprouvette sous contrainte normale de 200 kPa. 1000 cycles complets (contraintes positive et négative) ont été appliqués sur l'éprouvette, au augmentant au fur et à mesure les contraintes imposées (Tab. 2).

Tableau 2. Résultats des essais de cisaillement.

	Raideur au cisaillement de l'interface (MPa/mm)	Effort maximal au cisaillement (kPa)
Non renforcé	> 100	Pas de rupture
GG-PP	24,7	Pas de rupture
GG-PP + GTX	8,1	240
GG-FV	36,4	Pas de rupture
GG-FV+ GTX	14,3	270
GG-A	> 100	Pas de rupture

La plupart des géogrilles entraîne une chute de la raideur au cisaillement de l'interface. Les GG dotées d'un GTX entraînent même une rupture de l'éprouvette, contrairement aux mêmes GG testées sans GTX. Globalement, la présence du GTX lié à la géogrille fait baisser la raideur au cisaillement de l'interface d'un facteur d'au moins 3.

Seule la GG-A n'entraîne pas de baisse de la raideur au cisaillement de l'interface : l'éprouvette renforcée a la même raideur au cisaillement que l'éprouvette sans géogrille. Ceci s'explique par le fait que la GG-A est la géogrille la plus ouverte et la plus épaisse : elle permet un excellent interblocage des particules des deux couches d'enrobé qui l'entourent ; elle ne crée donc pas de plan de rupture.

2.2. Essais de flexion

Des essais de flexion (20°C ; 5 Hz) ont été réalisés avec des barreaux de 400 x 200 x 90 mm³ supportés sur 170 mm aux deux extrémités par de la mousse (12 mm d'épaisseur, rigidité 2 MPa). Le renforcement est placé à 30 mm de la base. Deux points distants de 170 mm imposent une contrainte verticale sur le haut du barreau. Une entaille de 10 mm est réalisée à la base du barreau afin d'imposer le lieu d'initiation de la fissure. Les essais ont été réalisés en imposant une contrainte constante ainsi la ruine du barreau est plus rapide que si le déplacement était imposé (contrainte décroissante) (Fig. 3).

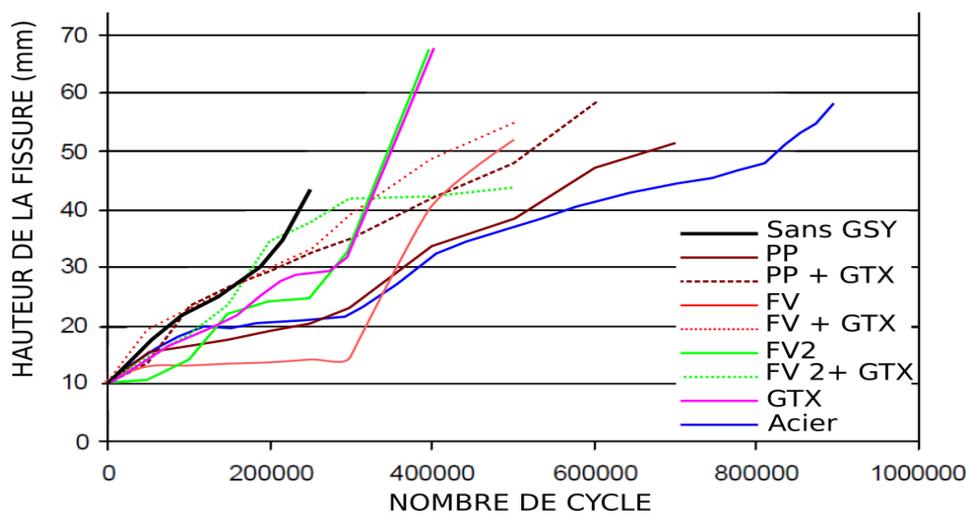


Figure 3. Résultats des essais de flexion.

Les données moyennes sur 3 essais pour chaque type de renforcement sont présentées sur la figure 3. Toutes les solutions géosynthétiques permettent d'allonger la durée de vie du barreau (facteur d'amélioration toujours supérieur à 1,5). Pour les trois GG dotées d'un GTX, les résultats sont moins bons que les mêmes GG sans GTX. La GG-A est la plus performante : le nombre de cycle passe de 250 000 à plus de 900 000 soit un facteur d'amélioration supérieur à 3.

Basé en partie sur les résultats expérimentaux de cette étude, le logiciel OLCRACK a été développé par l'université de Nottingham. Il permet de quantifier les bénéfices tirés de l'utilisation des renforts de chaussée (Thom, 2011). Il permet aussi de comprendre les grandeurs les plus significatives dans le comportement des différentes géogrilles. Cette modélisation montre que l'interaction enrobé / GG a un impact significatif, et plus particulièrement, la capacité des particules de l'enrobé à inter-bloquer les éléments de renforts (Sanders, 2001). C'est précisément grâce à l'efficacité de l'inter-blocage, que les GG-PP et GG-A sont les deux géogrilles qui augmentent le plus la résistance à la fatigue de l'enrobé : elles présentent des ouvertures importantes et des éléments de renfort de grandes dimensions.

2.3. Essai pilote

L'université de Nottingham est dotée d'un banc d'essai (Fig. 4) permettant de faire passer jusqu'à 900 fois par heure, une roue chargée à 12 kN sur une chaussée expérimentale d'une longueur de 5 m.

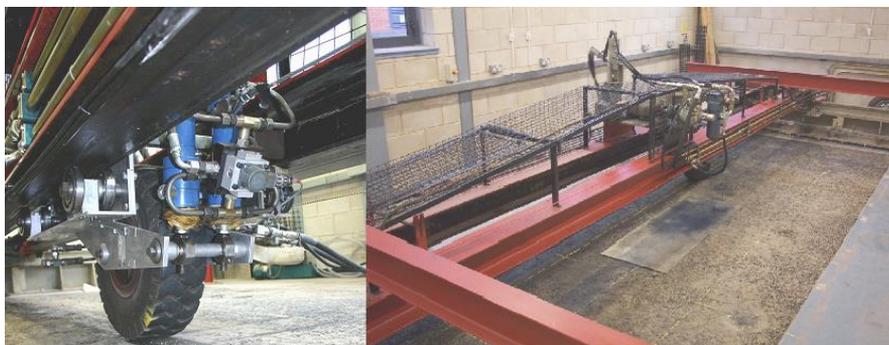


Figure 4. Banc permettant de réaliser l'essai pilote.

Afin d'évaluer 4 géogrilles différentes (GG-PP, GG-PP + GTX, GG-FV + GTX, et GG-A), les expérimentateurs ont opté pour un protocole particulièrement sévère : la température a été fixée à

14°C afin de fragiliser l'enrobé (température la plus faible possible dans l'enceinte d'essai). Pour solliciter l'enrobé en cisaillement, ils ont reproduit une chaussée fondée sur dalles béton (Fig. 5). Afin d'accroître le mouvement de ces dalles, la structure sous-jacente est très compressible avec de bas en haut : marnes du Keuper humidifiées, grave et couche fine de réglage, couche de mousse, dalles béton (0,6 x 0,6 m²) distante de 3 mm. Ils ont ensuite réalisé une couche d'enrobé mince de 60 mm.

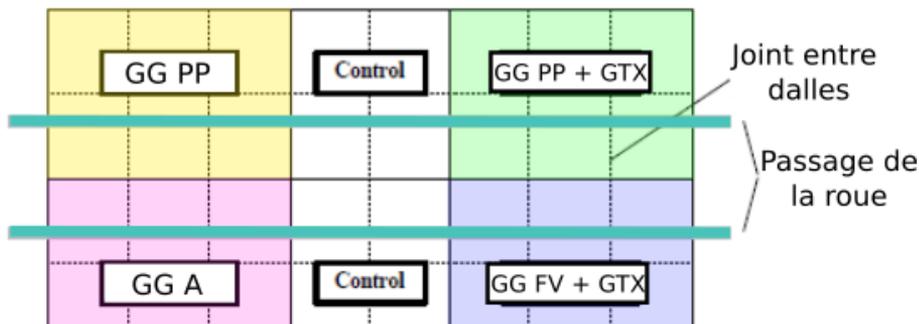


Figure 5. Plan de la zone d'essai.

Au cours des essais, le mouvement relatif des dalles béton entre elles et la propagation des fissures ont été suivis au fur et à mesure de l'accroissement du nombre de passage de la roue (Fig. 6).

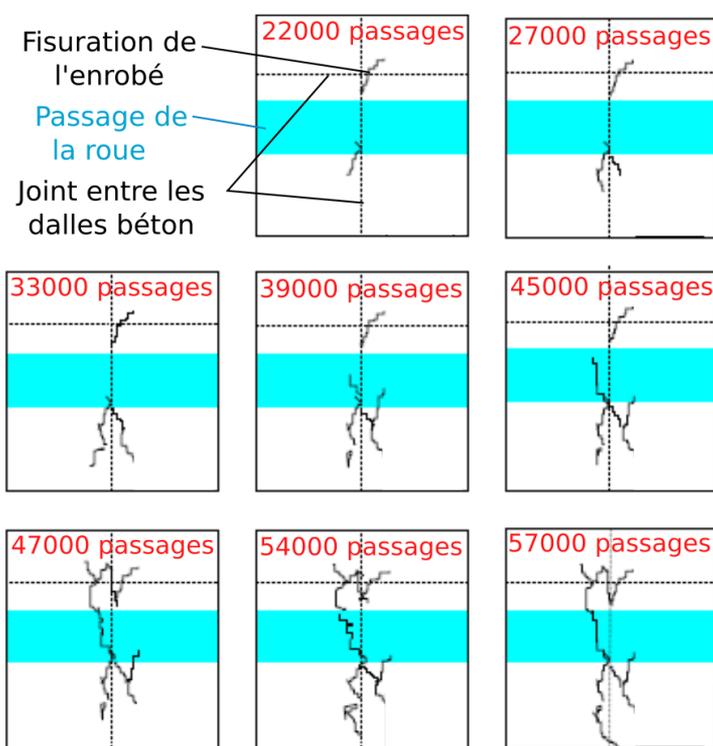


Figure 6. Propagation de la fissuration dans l'enrobé durant l'accroissement du nombre de passage de la roue sur la section renforcée par GG-FV + GTX.

L'essentiel des fissures se développe au niveau des joints entre dalles béton, perpendiculairement à l'axe de passage de la roue. Les auteurs ont suivi l'évolution de la largeur de la zone fissurée. Les essais s'interrompent lorsque la chaussée est trop endommagée pour le roulage de la roue. Les résultats sont présentés dans la figure 7.

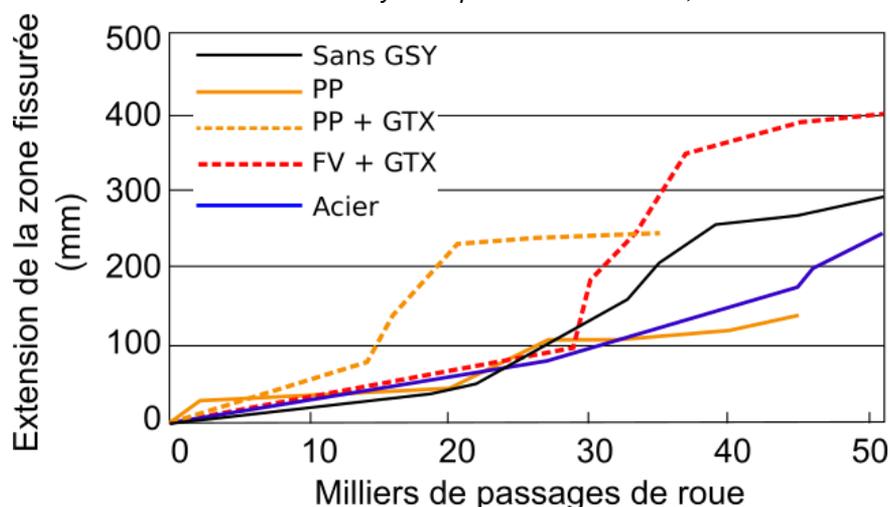


Figure 7. Evolution de la largeur de la zone fissurée au cours de l'essai.

Les deux GG dotées d'un géotextile accroissent la propagation des fissures par rapport au témoin sans géosynthétique. Nous avons vu précédemment que lorsqu'un géotextile était associé à une GG, il induisait une baisse de la raideur au cisaillement de l'interface. Dans les essais pilotes, la présence d'un géotextile apparaît clairement comme délétère : le géotextile constitue un plan de glissement au sein de l'enrobé qui induit des mouvements plus importants et donc une plus grande fatigue de la couche de roulement. Seules la GG-PP et la GG-A permettent de limiter la propagation des fissures.

L'étude de l'orniérage n'était pas prioritaire dans ces essais. Cependant les auteurs ont signalé une baisse significative de ce phénomène de dégradation, en particulier lors d'un essai réalisé à plus forte température (20°C). La figure 8 illustre qualitativement cette amélioration.

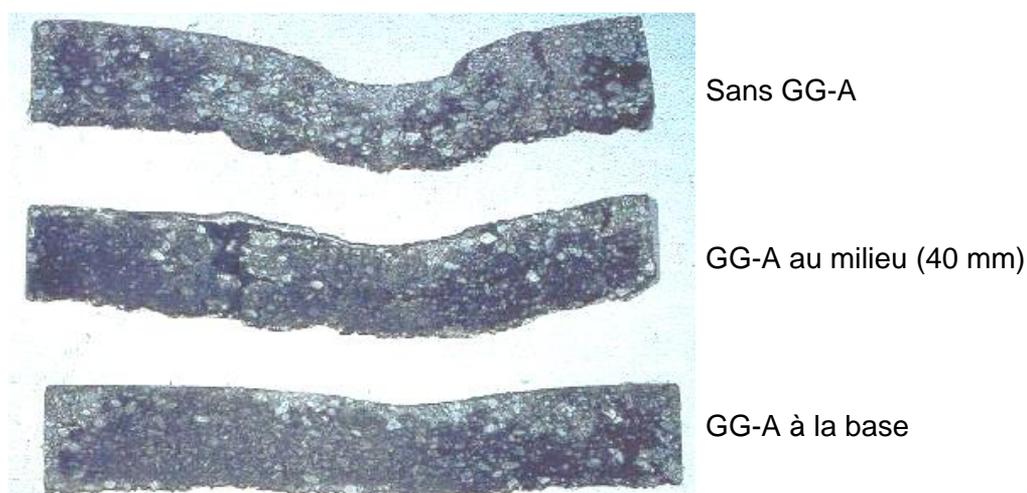


Figure 8. Coupe de l'enrobé après 200000 passages de roue chargée à 9 kN ; 20 °C. Brown et al. 2001.

Dans la section non renforcée, l'orniérage est très important : l'enrobé et les couches supports contribuent à une déflexion de surface de l'ordre de 6 cm. Dans la section renforcée en son milieu, l'orniérage est de l'ordre de 3 cm, l'enrobé ne migre pas latéralement, seules des couches supports contribuent à l'orniérage. Dans la section renforcée à la base, l'orniérage est fortement réduit (1 cm) : Ce comportement s'expliquerait par la forme hexagonale des mailles et l'épaisseur de la GG-A qui permettent un confinement latéral des particules de l'enrobé ce qui limite le fluage latéral. Ce phénomène était déjà identifié par Veys (1996).

Des essais à la fatigue induite par des cycles de température ont aussi été réalisés, ils montrent que les géogrilles ont pour rôle de distribuer la contrainte dans l'asphalte sur une plus grande largeur, et ainsi de diminuer le pic de contrainte au niveau de la fissure, les résultats sont proches de ceux obtenus avec la fatigue induite par un chargement cyclique : ce sont les mêmes grandeurs caractéristiques des

géogrilles qui prévalent et la géogrille acier présente des résultats supérieurs aux autres géogrilles. Les auteurs indiquent que les meilleurs résultats sont obtenus en plaçant les géogrilles dans la partie basse de la structure d'enrobé.

2.4 Conclusion

Pour conclure sur l'ensemble des essais réalisés à Nottingham, les auteurs retiennent :

- La raideur de la géogrille n'est pas la propriété la plus significative pour juger de sa capacité à lutter contre la fissuration.
- Les géogrilles fonctionnent en évitant que les deux côtés d'une fissure ne s'écartent. Les géogrilles présentant des bandes épaisses fonctionnent mieux car les efforts entre l'enrobé et la géogrille sont mieux transmis. Les résultats expérimentaux montrent que la raideur de l'interface géogrille / enrobé est un des paramètres les plus importants.
- Lorsque les géogrilles sont munies d'un géotextile, la perte de raideur au cisaillement de l'interface est plus forte que pour les géogrilles seules, car ces produits limitent le contact enrobé/enrobé. Les essais en flexion ont même mis en avant l'impact délétère des GTX liés aux géogrilles : ils entraînent une rupture du barreau plus rapide que le barreau contrôle sans géosynthétique.
- La GG-A présente à la fois une grande surface ouverte et des fils et barrettes de gros diamètres disposés dans 4 directions du plan. Ces caractéristiques géométriques confèrent aux GG-A la plus forte raideur au cisaillement de l'interface : elles permettent d'atteindre une raideur supérieure à 100 MPa/mm, alors que toutes les autres géogrilles ont une raideur inférieure à 40 MPa/mm.

3. Virginia Smart Road

La VSR est une route longue de 3,5 km construite spécialement pour des activités de R&D. Elle comporte des sections de 100 m de long qui permettent d'étudier différentes structures de chaussées, avec ou sans système de renfort. Deux sections de la VSR ont été équipées de GG-A. Dans la section I, la GG-A a été installée dans une couche d'enrobé à haut module. Dans la section L, la GG-A a été installée dans une couche d'assise drainante. Des capteurs de contraintes de compression et de déformations ont été installés à différents niveaux de la chaussée afin d'évaluer les descentes de charge et les déformations dans la route lors du passage des véhicules (Fig. 9). Cette partie est une synthèse des résultats obtenus par le Pr Al-Qadi et ses collaborateurs (Al-Qadi et al. (2003), Al-Qadi et Elseifi (2004), Elseifi et Al-Qadi (2005)).

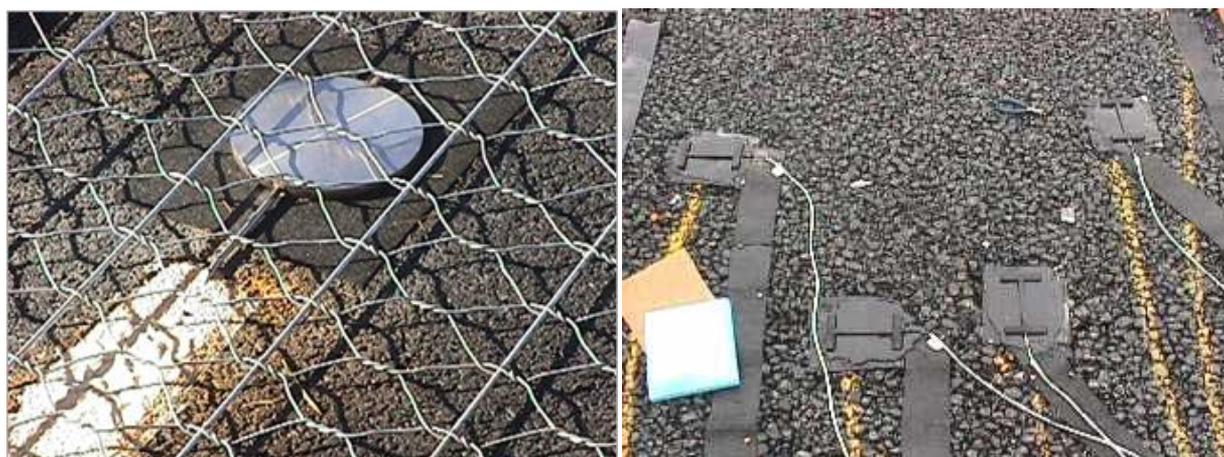


Figure 9. G. Capteur de contrainte totale installé sous la GG-A. D. Jauges de déformation.

Les mesures montrent une diminution de la contrainte dans la chaussée lors du passage d'un véhicule dans les zones renforcées par GG-A par rapport aux zones non renforcées. La contrainte est diminuée d'environ 15 à 25%. Afin d'évaluer l'efficacité du renforcement en termes d'amélioration de la résistance à la fatigue, une modélisation par éléments finis a été réalisée. La figure 10 illustre les facteurs d'amélioration obtenus entre une zone renforcée par GG-A et une zone non renforcée.

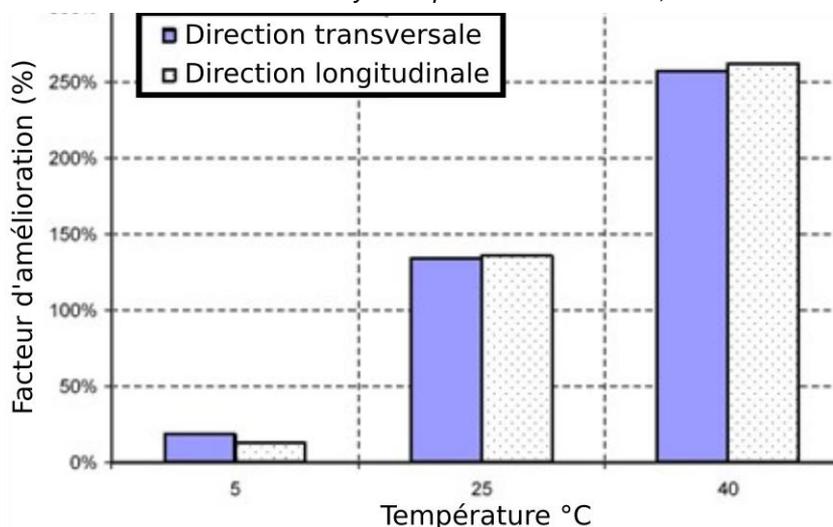


Figure 10. Facteur d'amélioration de la résistance à la fatigue modélisée sur la base des mesures de contrainte et déformation dans la VSR.

La modélisation numérique de type éléments finis de ses essais, menées par Elseifi et Al-Qadi (2005), montre que le renforcement est d'autant plus efficace que la température est élevée : quand la raideur de l'enrobé diminue, les déplacements sont plus importants au passage d'un véhicule. La GG-A oppose alors sa raideur (non dépendante de la température) à ces déplacements et reprend une grande partie des efforts. La GG-A lutte ainsi contre la fatigue de l'enrobé. Les auteurs concluent que les GG-A sont en mesure d'améliorer grandement la durée de vie de la chaussée en diminuant les contraintes, les déformations et donc la fatigue de l'enrobé (Elseifi et Al-Qadi, 2005).

4. Conclusion

Les essais de Nottingham ont montré que la raideur au cisaillement de l'interface apparaissait comme une propriété clé du système enrobé / géogrille pour améliorer la résistance à la fatigue de l'enrobé. Les géogrilles Acier qui présentent une très grande surface ouverte et une épaisseur importante sont les seules géogrilles parmi les produits testés, qui n'entraînent pas de baisse de la raideur au cisaillement de l'interface. Leur géométrie favorise l'inter-blocage des particules (transfert des efforts) et limite les discontinuités au sein de la structure de chaussée (résistance de l'interface). Dans les essais de flexion ensuite réalisés, les GG-A montrent un comportement similaire à celui de la GG-PP. Dans les essais pilotes, les conditions d'essais sévères ont mis en évidence une amélioration importante de l'enrobé lorsqu'il était renforcé par GG-A tant au niveau de la fissuration que de l'orniérage.

Sur la Virginia Smart Road, les mesures réalisées au sein de la route, et ensuite, modélisées aux éléments finis, ont permis de mettre en avant une baisse de contrainte et de déformation dans la chaussée lors du passage des véhicules et donc une amélioration de la résistance à la fatigue pouvant atteindre 250 %.

Les GG-A apparaissent donc comme des produits polyvalents, permettant de lutter à la fois contre la fissuration et l'orniérage. Il est conseillé d'utiliser ces géogrilles dans les contextes à très fortes sollicitations (portuaire et aéroportuaire) lors de la construction ou d'une rénovation lourde. En effet pour un fonctionnement optimal, les GG-A doivent être installées à la base des couches liées.

5. Références bibliographiques

- Al-Qadi I.L., Elseifi M., Leonard D. (2003). Steel reinforcing nettings mechanism to delay reflective cracking in asphalt concrete overlays, *Journ. of Asso. Asphalt Paving Techno.* 8, 388 – 423.
- Al-Qadi I.L., Elseifi M. (2004). Field installation and design considerations of steel reinforcing netting to reduce reflection of cracks. 5th Int. RILEM Conf., 37, 97–104.
- Baek J., Al-Qadi I.L. (2009). Effectiveness of steel netting interlayer in controlling reflective cracking HMA over JPCP. MAIREPAV6
- Brown S.F., Thom N.H., Sanders P.J. (2001). A study of grid reinforced asphalt to combat reflection cracking. Annual Meeting of Asso. Asphalt Paving Techno.
- Brown S.F., Thom N.H., Sanders .P.J., Brodrick B.V., Cooper S. (1999). Reinforced Asphalt: Final Report No PGR 99025 Department of Civil Engineering, University of Nottingham
- Elsing A., Sobolewski J. (1998). Asphalt-layer polymer reinforcement: long-term experience, new design method, recent developments. 5th Int. Conf. on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, 3, 1523-1532.
- Elseifi M. et Al-Qadi I.L. (2004) Field installation and design considerations of steel reinforcing netting to reduce reflection of cracks. 5th Int. RILEM Conf.
- Elseifi M., Al-Qadi I.L. (2005). Effectiveness of steel reinforcing netting in combating fatigue cracking in new flexible pavement systems, *Jour. of Transportation Engineering, ASCE*, 131 (1), 37 – 45.
- Francken L. (2004). Prevention of cracks in pavements: achievements and open questions. 5th Int. RILEM
- Huhnholz M. (1996). Asphalt reinforcement in practice, 3th Int. RILEM, 456-463.
- Montepara A., Tebaldi G., Costa A. (2005). Performance evaluation of a surface pavement steel reinforcement. 5th ICPT
- MEDDE (2015). Chiffres clés du transport, Edition 2015. Service de l'observation des statistiques
- MEDDE (2012). L'entretien et l'exploitation du réseau routier national non concédé, Rapport d'activité 2012. Direction des infrastructures de transport.
- Perez Romero S.A. (2008). Approche expérimentale et numérique de la fissuration réfléctive des chaussées. Thèse de doctorat de l'université de Limoges.
- Québec-Bitume (2015). Les enrobés à module élevé adaptés aux climats froids. *Techno-Bitume*, 9, 1-20
- Sanders P.J. (2001). Reinforced asphalt overlays for pavements. PhD thesis, University of Nottingham. Disponible le 24/11/16 sur <http://eprints.nottingham.ac.uk/12221/1/368938.pdf>
- SETRA (1996). L'entretien courant des chaussées. Guide Pratique
- Tesoriere G., Ticali D. (2003). Il comportamento delle pavimentazioni stradali all'azione tangenziale dei carichi. *Rivista Le Strade*
- Thom N.H. (2011). A simplified computer model for grid reinforced asphalt overlays. 4th Int. RILEM, 37-46
- Vanelstraete A., Francken L. (1996). Laboratory testing and numerical modelling of overlay systems on cement concrete slabs. 3th Int. RILEM, 211-220
- Veys J.R.A. (1996). Steel reinforcing for the prevention of cracking and rutting in asphalt. 3th Int. RILEM, 402-417.
- Watn A. (2011). Géosynthétiques dans les structures routières : expériences européennes. *Rencontres géosynthétiques 2011, Tours*, 47-62
- Zemmiri A.A. (2008). Comparaison des formulations d'enrobés à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniéage. Mémoire pour le Certificat d'études supérieures de l'ENTPE de Lyon.