



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

**Approche tribologique du comportement en
surface de chaussée**

Auteurs / Organisme :

Philippe Reynaud, Benoit PICOUX,
Christophe Petit
Laboratoire GC2D, Université de Limoges

Tranche 4

Thème de rattachement :

PR3-3 Cas des couches de roulement

DVDC/R/049

N° lettre de commande : LC/21/

DVDC/132 Septembre 2024

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Eric LAYERLE et Christine LEROY

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	3
2 Introduction	4
3 Présentation des structures et instrumentation	5
3.1 Matériaux et structures de la couche de surface	5
3.2 Instrumentation	6
3.2.1 Jauges de déformations	6
3.2.2 Capteurs de température	11
3.2.3 Contrôle de température en surface	12
3.2.4 Mesures de l'ornière	13
3.3 Chargement	14
4 Résultats	15
4.1 Réponse mécanique en surface	15
4.1.1 Déformations transversales	15
4.1.2 Validation des calculs numériques SAM	18
4.2 Réponse mécanique à l'interface	21
4.3 Etude de l'orniérage	23
4.3.1 Profils transversaux	24
4.3.2 Profondeur d'orniérage	25
4.3.3 Modèles prédictifs	27
5 Conclusion	28

1 Résumé

La tranche 4 du projet a pour but de valider quelques calculs de SAM en roulement pur (cf. tranches 1 et 2) pour les déformations en surface et en profondeur. Nous avons mis en œuvre sur une chaussée expérimentale à l'intérieur d'une halle isolée un grand nombre de dispositifs de mesures des déformations présentes dans la chaussée lors du passage d'une charge roulante. Le simulateur MLS10 a été employé afin de réaliser ces mesures. Quatre couches de surface ont été évaluées et ce pour des températures contrôlées.

Les résultats obtenus sont :

- la validation des champs de déformations réels dans la couche de surface avec un contact roulant réel,
- l'exploitation de résultats d'ornières pour différentes couches de surfaces, en température contrôlée.

Abstract

Section 4 of this project aims to validate the SAM results (see sections 1 and 2) for surface and depth deformations. An experimental pavement inside an isolated hall has been instrumented with many devices to measure the deformations present in the pavement during the passage of a rolling load. The MLS10 simulator was used to perform these measurements. Four surface layers have been designated for controlled temperatures.

The results obtained are :

- validation of real stress fields in the surface layer with real rolling contact,
- exploitation of rut results for different surface layers, under controlled temperature.

2 Introduction

L'objectif de ce projet est de pouvoir utiliser le code de calcul du contact pneu-chaussée SAM [1] présenté dans les tranches 1 et 2 en toute confiance pour l'étude et la prédiction du comportement des chaussées sous l'effet du trafic.

Lors de la tranche 1, nous avons validé l'utilisation de SAM par des mesures de pression de contact en surface dans des phases de chargement statique avec l'utilisation d'un capteur de surface de type Tekscan (résistif). Pour la tranche 2, nous avons effectué des comparaisons avec le logiciel existant ALIZE au niveau des calculs de pression de contact en statique. Nous avons aussi intégré les efforts longitudinaux et transversaux présents dans un contact roulant réel pneu-chaussée.

Cette tranche 4 du projet DVDC a pour but de valider les calculs de SAM concernant les déformations en surface et en profondeur, un nouveau dispositif de mesure de déformations par fibres optiques a été testé au laboratoire ainsi que des mesures par extensométrie et jauges de déformations qui sont des méthodes plus classiques.

La simulation en grandeur réelle sur une chaussée expérimentale instrumentée a été effectuée avec le simulateur de trafic MLS 10 nouvellement acquis par le laboratoire [2]. La réalisation de ces essais a permis d'avancer dans la validation de l'utilisation du code SAM en roulement pur dans des conditions réelles (mesures des déformations avec capteur à fibres optiques et jauges de déformation dans les premiers centimètres). Ces essais sont réalisés à l'intérieur d'une halle isolée permettant d'avoir des températures constantes dans les couches bitumineuses.

Suite aux travaux réalisés lors de la tranche 1 et 2 dont les objectifs ont été atteints, à savoir la validation des résultats du code de calcul SAM et la mise en évidence de :

- la vulnérabilité de la couche de surface,
- l'importance de la prise en compte du contact réel (mesures de validation avec capteur Tekscan),
- Calculs des contraintes normales et tangentielles avec chargement en virage, en phase d'accélération et en phase de freinage.

Nous attendons cette fois des résultats scientifiques en terme :

- de validation des champs de déformations réels dans la couche de surface avec un contact roulant réel
- d'exploitation de résultats d'ornières pour différentes couches de surfaces, en températures subies puis en températures imposées.

3 Présentation des structures et instrumentation

3.1 Matériaux et structures de la couche de surface

La dégradation des couches de surface est principalement liée à l'augmentation des chargements des poids lourds et à l'apparition de nouveaux matériaux associée à une diminution de l'épaisseur des couches de roulement. Ces matériaux changent de comportement avec le temps et les variations de température, des intempéries et les conditions de roulement. De telles modifications sont, en général, liées à la nature et aux caractéristiques des matériaux utilisés. Afin d'évaluer la performance des couches de surface, il est nécessaire de collecter suffisamment de données sur plusieurs matériaux différents. Pour cette raison, quatre matériaux de couche de surface ont été sélectionnés (cf. Figure 1).

La première couche testée est composée d'un béton bitumineux semi – grenu BBSG (cf. Figure 1a). Le choix de ce matériau de référence est justifié par la volonté de vouloir faire des essais sur un matériau fréquemment employé et donc suffisamment étudié et documenté.

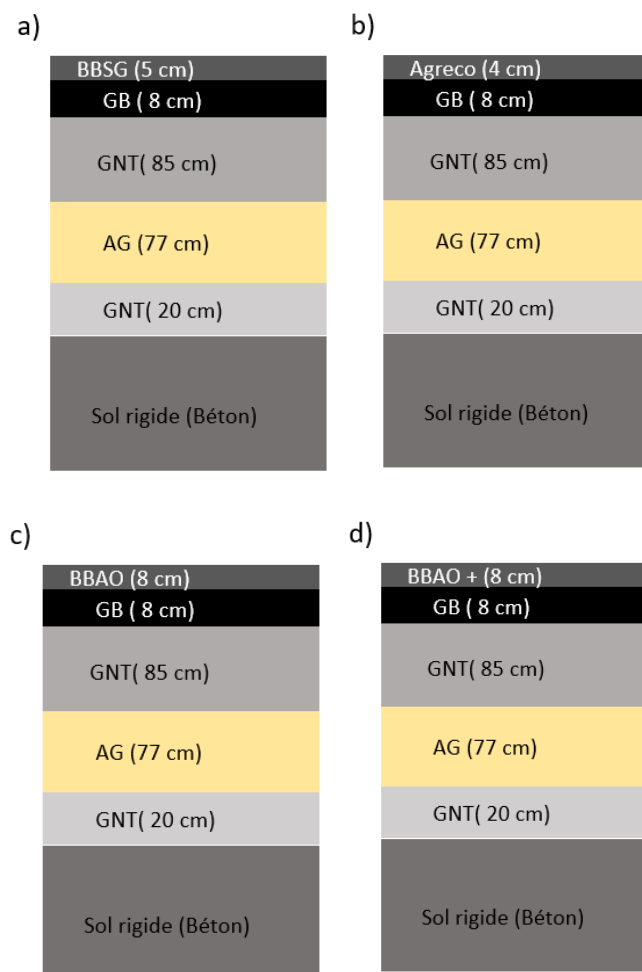


Figure 1 : Couches de surface testées

Pour la deuxième couche de roulement testée, nous avons choisi le produit AGRECO de la société Malet parmi les enrobés à froid dans le but d'avancer dans l'analyse de leurs comportements et de proposer un modèle de prédiction vis-à-vis de l'orniérage (Figure 1b).

Le troisième matériau testé est un enrobé bitumineux anti-orniérant BBAO de la société Malet (Figure 1c). Le but de ce choix est de comparer les performances de ce dernier avec un matériau standard (BBSG) vis-à-vis de l'orniérage.

La quatrième campagne d'essai a été réalisée sur un second enrobé bitumineux anti-orniérant BBAO + (Figure 1d) dont les propriétés mécaniques ont été améliorées par rapport au BBAO. L'objectif de la dernière campagne est aussi de valider l'ensemble des résultats issus des trois campagnes précédentes dont l'objectif principal était de suivre l'évolution de l'orniérage pour un nombre de cycle et des plages de températures définies.

3.2 Instrumentation

L'analyse du comportement mécanique des couches de surface nécessite de quantifier les sollicitations s'exerçant au passage des charges. Ces données sont accessibles en instrumentant la couche de surface à des profondeurs spécifiques lors de la mise en œuvre ou après la fin des travaux. Pour cela, les capteurs utilisés dans les couches bitumineuses doivent répondre à certaines conditions. Ils doivent être conçus pour adhérer correctement aux mélanges bitumineux pour assurer le suivi de leurs comportements sous diverses conditions expérimentales. Proche de la surface, les capteurs sont plus sensibles au problème d'endommagement lié au compactage, aux températures élevées de mise en œuvre et au passages répétés des charges. Pour cette raison, le choix du type de capteurs utilisés a été basé sur les critères suivants :

- résister aux sollicitations thermiques et mécaniques de mise en œuvre,
- résister aux sollicitations imposées par le passage répétées charges lors des essais,
- assurer le suivi du comportement des enrobés sous différentes conditions environnementales,
- assurer une lecture répétable, fine et fiable des essais.

3.2.1 Jauges de déformations

Pour quantifier et analyser les déformations en couche de surface, nous avons utilisé des jauges résistives d'une longueur de 50,8 mm et d'une résistance de 350 Ω (modèle C2A-06-20CLW-350 de Vishay). La plage de fonctionnement de ces jauges est de -50°C à +80°C et leur plage de mesure est de $\pm 30\ 000\ \mu\text{def}$, soit $\pm 3\ \%$. Sa longueur active de la grille est égale

à 50 mm. Chaque jauge a été connectée au système d'acquisition de données HBM Spider-8. Cet équipement est capable de mesurer la déformation appliquée à l'échantillon sur la base des signaux entrants en quantifiant le changement de résistance des jauges utilisées lorsqu'elles sont comprimées ou étirées.

- **Jauges de déformations en surface**

Le positionnement précis des jauges de déformations est une partie essentielle du travail préalable. Durant les quatre campagnes, des jauges de déformations transversales ont été collées au niveau de la couche de surface (Figure 2). Pour la couche de BBAO+, nous avons collé une jauge en surface au centre du jumelage. La jauge Vishay collée sur un substrat lisse de blanc de Meudon en surface G1 est placée à 0,6 m de l'axe de la charge de jumelage. Le choix de 0,6m a été pris du fait de la sollicitation en extension à cette distance.

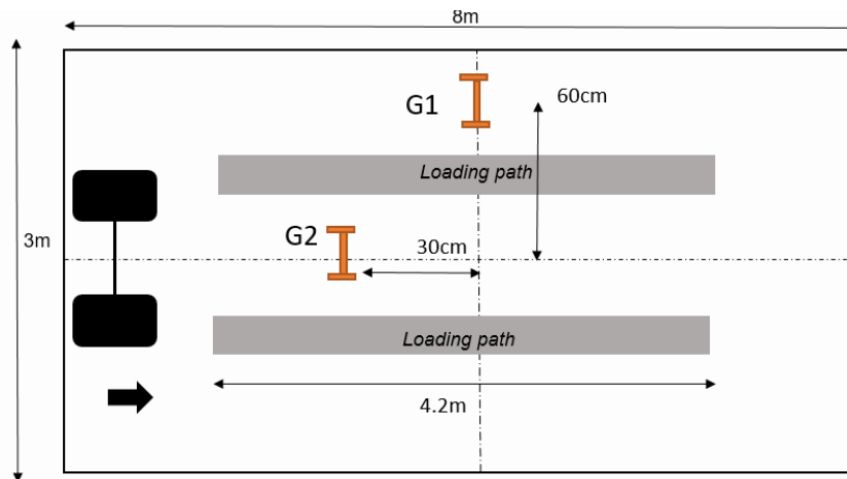


Figure 2 : Plan d'implantation des jauges de déformation en surface pour les 4 matériaux (la jauge G2 n'est utilisée que pour le matériau BBAO+)

Les mesures de déformation données par ces jauges se trouvent dans la partie 4.1.1.

- **Jauges de déformations à l'interface**

L'étude du comportement près de la surface nécessite l'analyse des sollicitations sur toute la profondeur de la couche de roulement. Des jauges de déformations ont été collées à la base de la couche de roulement et au sommet de la couche de base GB (cf. figure 5 et 6). L'instrumentation a été effectuée avant mise en œuvre de la couche de roulement en assurant une bonne protection de ces dernières. Différentes technologies ont été utilisées pour évaluer avec précision le comportement structural au niveau de l'interface à l'aide des essais en vraies grandeurs. Des jauges de déformations longitudinales et transversales, des capteurs en fibre optique et également des extensomètres ont été ainsi utilisés.

La couche de référence BBSG n'est instrumentée qu'en surface ;

La couche de roulement en Béton Bitumineux à Emulsion (AGRECO) a été instrumentée avec des jauges de déformations transversales et longitudinales et des capteurs en fibre optique à réseaux de Bragg (Figure 3a). Les capteurs à fibre optique (FBG) sont basés sur un miroir distribué dans un segment court de la fibre optique, réfléchissant une plage de longueurs d'onde limitée et transmettant toutes les autres. Le principe de fonctionnement est basé sur une variation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre, qui agit comme un filtre sélectif en longueur d'onde avec une longueur d'onde de réflexion centrale. La longueur active des capteurs utilisée est de 10 mm. En raison de la fragilité de ce type de capteurs, une protection par une nappe tissée est utilisée (Figure 3b).

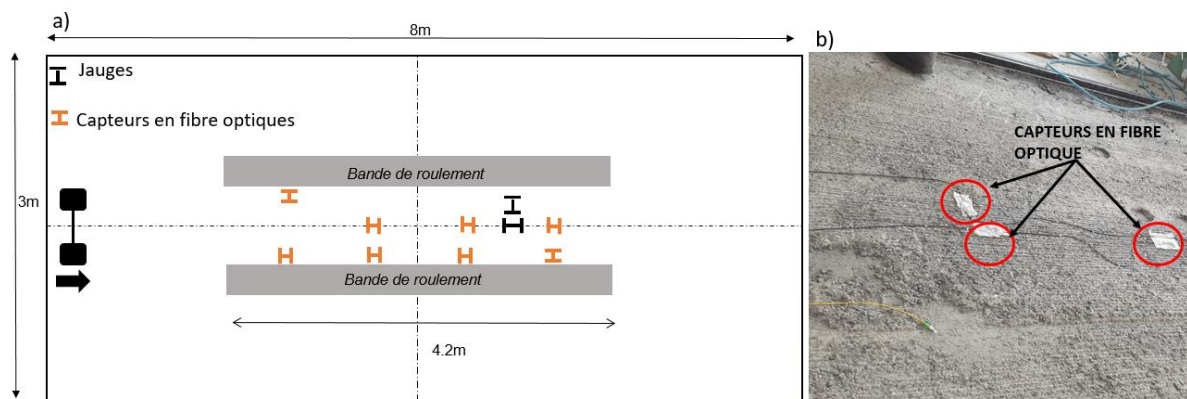


Figure 3 : a) Plan de l'implantation de l'instrumentation au niveau de l'interface de l'Agreco
b) Mise en oeuvre des capteurs en fibre optique au niveau de l'interface de l'Agreco

Les capteurs en fibre optique ne mesurent pas la contraction s'exerçant lors du passage de la charge. Cette absence peut s'expliquer par le fait que les capteurs ne possèdent pas d'ancrage et qu'en conséquence les efforts ne sont pas correctement restitués au capteur. Seuls les signaux des jauges vont donc être analysés pour cette grandeur.

L'interface de la troisième campagne d'essais avec le Béton bitumineux Anti-Orniérant (BBAO) a été instrumentée par des jauges de déformations et un extensomètre en fibre optique. La longueur active de l'extensomètre est de 10 cm, elle a été insérée dans un barreau en plastique (barre centrale H). Ce barreau est ensuite ancré dans deux barreaux en aluminium permettant d'assurer une bonne adhérence avec le mélange bitumineux une fois mis en œuvre. Enfin le capteur a été protégé par un mélange de bitume (Figure 4).

Chaque campagne d'essais est suivie d'un rabotage de la couche de surface en conservant la même couche de GB. Le rabotage n'étant pas parfait, nous avons observé, après les trois campagnes d'essai précédentes, la présence d'un résidu de 2 cm composé d'un mélange des trois matériaux testés.

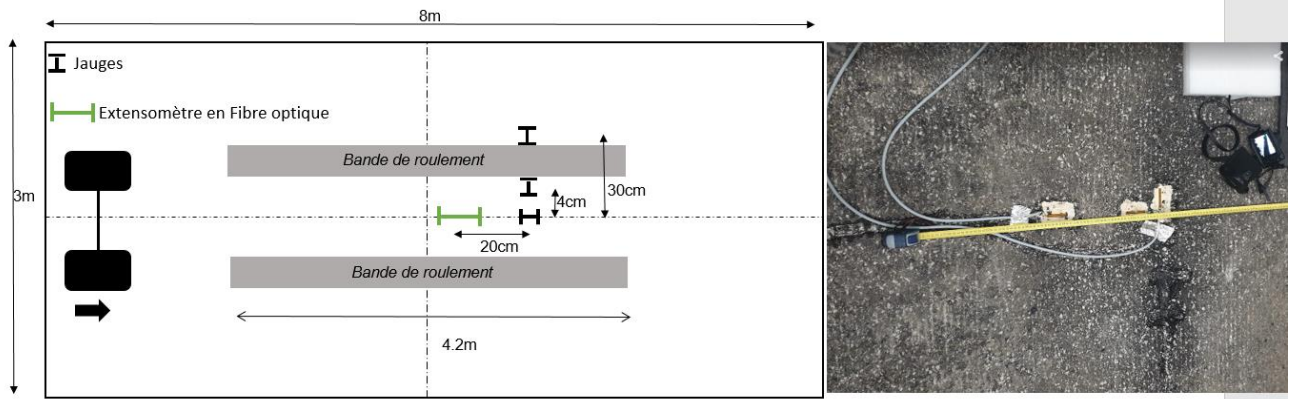


Figure 4 : Plan de l'implantation de l'instrumentation au niveau de l'interface de BBAO

Pour cette raison l'instrumentation à l'interface du béton bitumineux Anti-Orniérant amélioré (BBAO+) a été implanté comme suit : des jauges de déformations longitudinales et transversales ont été collées à l'interface de la grave bitume (Figure 5) dans l'axe du jumelage. Des jauges de déformations longitudinales et transversales ont été placées au sommet de la couche résiduelle dont une jauge longitudinale dans l'axe du jumelage et une transversale au bord extérieur du pneu (Figure 6).

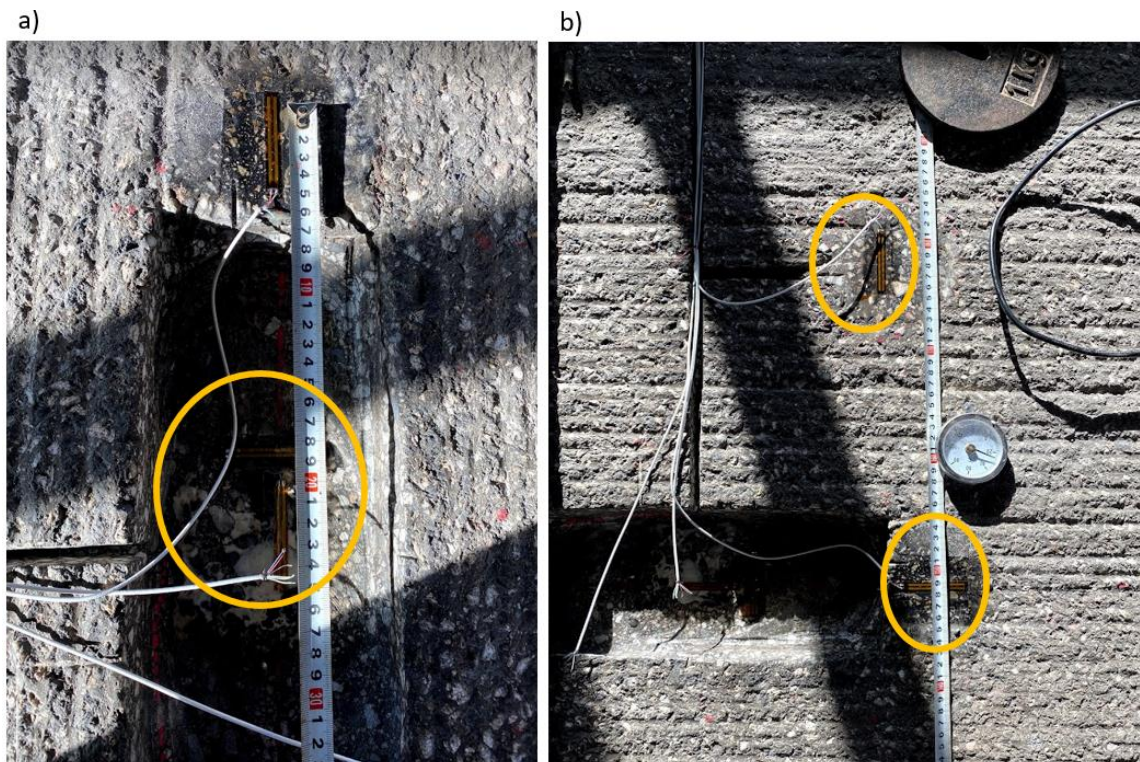


Figure 5 : Implantation des jauges au niveau de l'interface

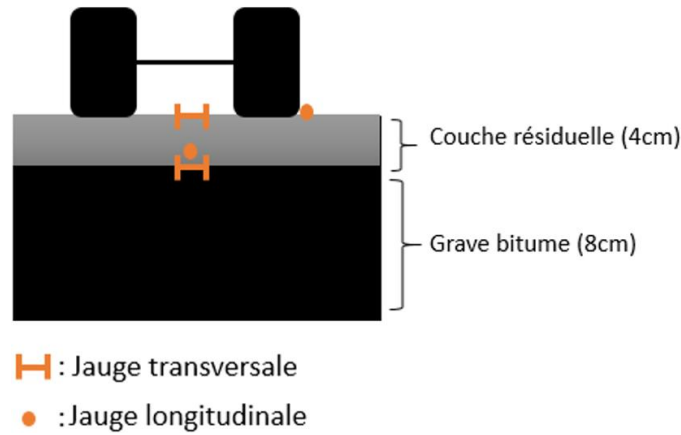


Figure 6 : Coupe transversale de l'implantation des jauges

L'interface BBAO+ et la couche de grave bitume a été instrumentée par un extensomètre, la longueur active de l'extensomètre est de 5 cm. Le capteur a été placé dans la zone courante du roulement entre l'axe du jumelage (Figure 7).

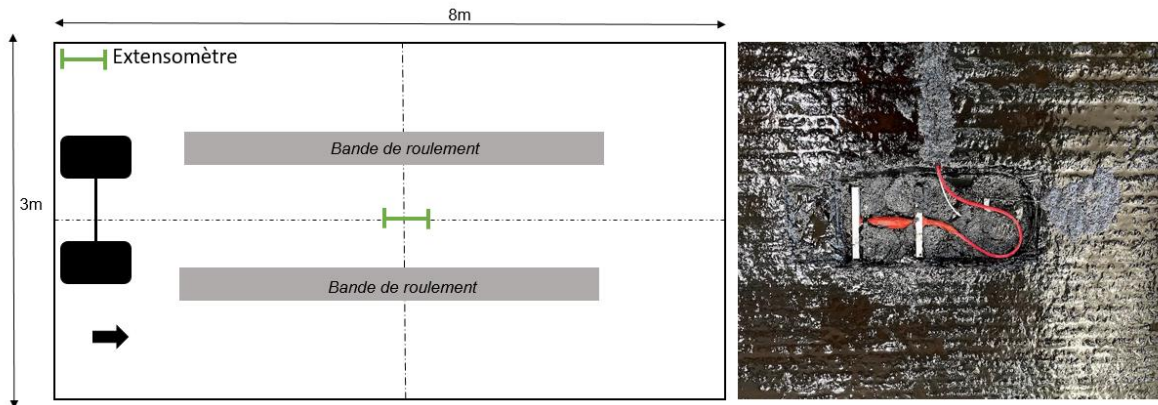


Figure 7 : Positionnement de l'extensomètre à interface GB et BBAO+

En conclusion, les différentes couches de surface ont été instrumentées avec différentes techniques de mesures et le choix du type d'instrumentation est jugé toujours par la volonté de tester la performance de chaque moyen de mesure pour évaluer le comportement de la couche de surface. Le tableau 1 représente le résumé de toute l'instrumentation implantée au niveau de la chaussée.

	Jauges en Surface	Jauges à l'interface	Extensomètre FO	Extensomètre Pont complet (prototype)
BBSG	Z = 0 m			
BBE (Agreco)	Z = 0 m	Z = - 0,04 m		
BBAO	Z = 0 m	Z = - 0,08 m		
BBAO+	Z = 0 m	Z = - 0,08 m	Z = - 0.08m	Z = - 0.08m

Tableau 1 : Instrumentations placées dans la couche de surface

Le tableau 2 présente les paramètres mécaniques des couches de surface testées. Les modules d'Young ont été recalculés avant chaque nouvelle campagne d'essai par calcul inverse issus de mesures FWD.

	Epaisseur (cm)	Module élastique équivalent (MPa)	Coefficient de Poisson
Structure 1			
BBSG (15°C,10Hz)	5	5400	0.35
GB (15°C,10Hz)	8	13400	0.35
Structure 2			
Agreco (19°C,10Hz)	4	3588	0.35
GB (15°C,10Hz)	8	11960	0.35
Structure 3			
BBAO (16°C,10Hz)	6	7013	0.35
GB (15°C,10Hz)	8	11600	0.35
Structure 4			
BBAO+(19°C ,10hz)	6	12000	0.35
GB(17°C ,10hz)	8	8000	0.35

Tableau 2 : Paramètres mécaniques des couches de surface

3.2.2 Capteurs de température

Les capteurs de température utilisés durant les essais sont des capteurs à résistance de type Pt 100 (en surface) et des thermocouples (en profondeur). L'échange thermique entre le matériau et le capteur se fait par conduction. Chaque couche de la fosse est équipée d'un thermocouple de type K (Figure 8). Les thermocouples sont protégés dans des gaines en plastique pour éviter leurs détériorations lors de la mise en œuvre.

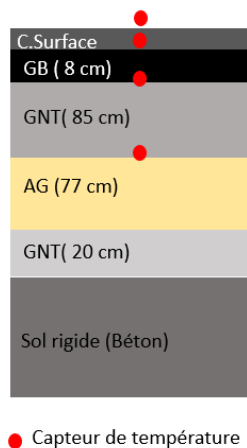


Figure 8 : Positionnement des capteurs de temperature dans l'épaisseur de la chaussée

3.2.3 Contrôle de température en surface

La maîtrise de la température de la surface de la chaussée est assurée par un système de chauffage. Six panneaux infrarouges (Figure 9) ont été placés à proximité de la chaussée pour augmenter la température avant les essais. Le régime permanent (température stabilisée) est établi après environ 7 heures de fonctionnement, la régulation de la température se fait manuellement en gérant l'ouverture des portes de la halle d'essais. L'alimentation des panneaux infrarouge est stoppée lorsque la température en surface atteint la consigne fixée. Lors des essais de roulement, la chaleur produite par le simulateur MLS 10 permet de maintenir la température choisie en gérant sa ventilation.

La mesure de la température de surface est effectuée par 2 sondes Pt 100 collées sur l'enrobé proches de la zone de roulement. L'évolution des températures pendant les essais est présentée sur la figure 10 en fonction du nombre de cycles. Chaque campagne est composée de 100 000 cycles avec un cycle thermique identique.



Figure 9 : Système de chauffage infrarouge de la couche surface

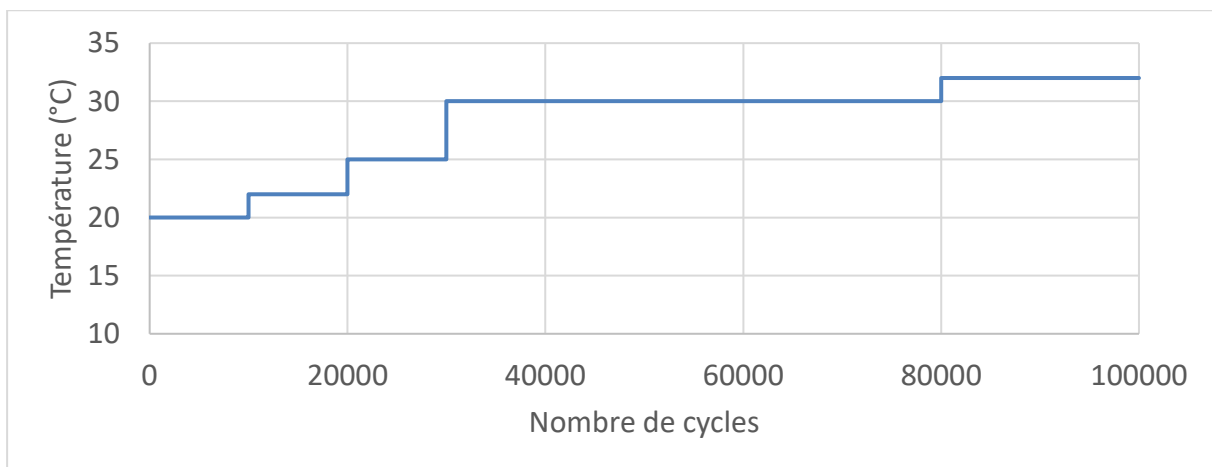


Figure 10 : Evolution des températures en surface pour les couches BBSG, BBAO et BBAO+

3.2.4 Mesures de l'ornière

Pour suivre l'évolution de l'orniérage de la couche de surface, des mesures du profil transversal ont été effectuées avec un profilomètre. Il s'agit d'un dispositif de mesure se composant d'une poutre en acier et d'une roue sur la face inférieure (Figure 11).

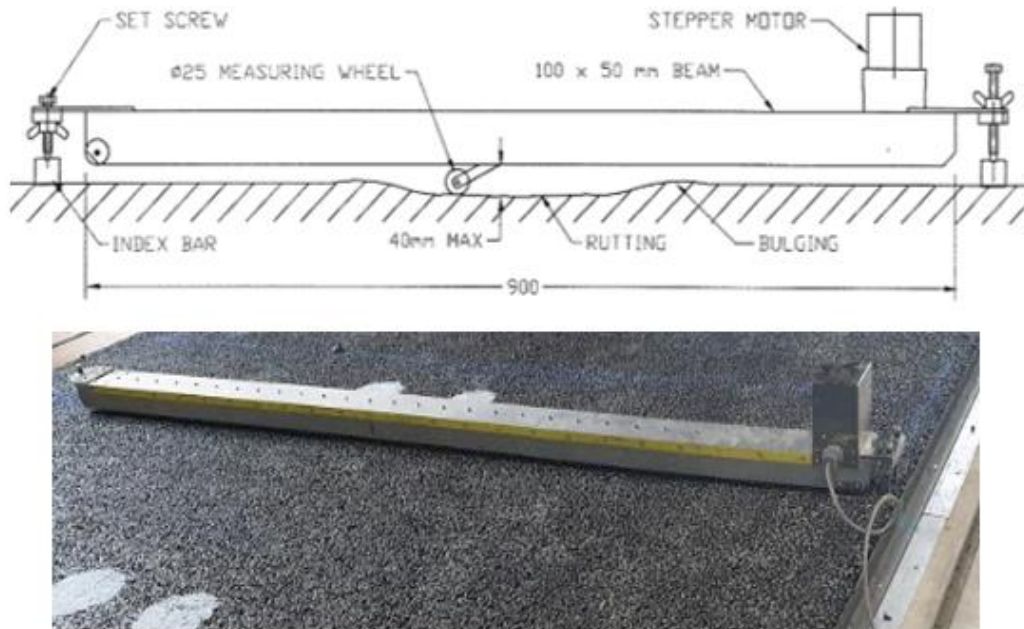


Figure 11 : Système de mesure de l'orniérage (Profilomètre)

Pour chaque mesure, la poutre est d'abord posée sur deux plaques d'acier collées à la surface de la chaussée, en dehors de la zone de trafic pour la mesure du « point de référence ». La distance entre le palpeur porté par la poutre et la chaussée peut être réglée à l'aide d'une paire de pieds réglables à chaque extrémité de la poutre. Cette configuration fournit un cadre stable pour les mesures. Une roue mobile (palpeur) située dans la partie basse de la poutre se déplace au contact de la surface de la chaussée relevant toutes irrégularités avec une précision de 0.1 mm. La combinaison des mouvements verticaux et horizontaux permet de reproduire le profil transversal de la chaussée. Ce profil évolue au cours des essais en raison de l'apparition d'une ornière. Par conséquent, des mesures ont été prises périodiquement après un nombre régulier de cycles afin de suivre l'évolution de l'ornière par rapport au nombre de charges accumulées. D'autres techniques, comme un scanner et une technique de photogrammétrie, ont été également utilisées pour suivre l'évolution de l'orniérage de la couche de surface.

Le scanner utilisé est un scanner 3D Artec Eva dont les données sont traitées à l'aide du logiciel Artec Studio 13 Professional®. Cet outil fonctionne sur le principe de la lumière structurée. Une séquence de motifs est projetée sur l'objet étudié. La caméra enregistre la

déformation de ces motifs par le relief du sujet et crée un modèle 3D. La technique de photogrammétrie consiste à prendre plusieurs photographies sous différents angles et distances. Ces photographies sont ensuite traitées par un logiciel (Recap Photo®) qui détecte les points communs entre chacune d'elles et reconstruit un fichier de points tridimensionnel.

Ces différentes techniques ont fait l'objet d'une étude comparative avec les résultats du profilomètre.

3.3 Chargement

Notre choix du simulateur s'est porté sur le simulateur de trafic MLS10 (Figure 12) fabriqué à Cape Town en Afrique du Sud en 2006 sous la surveillance du designer Johan Müller.

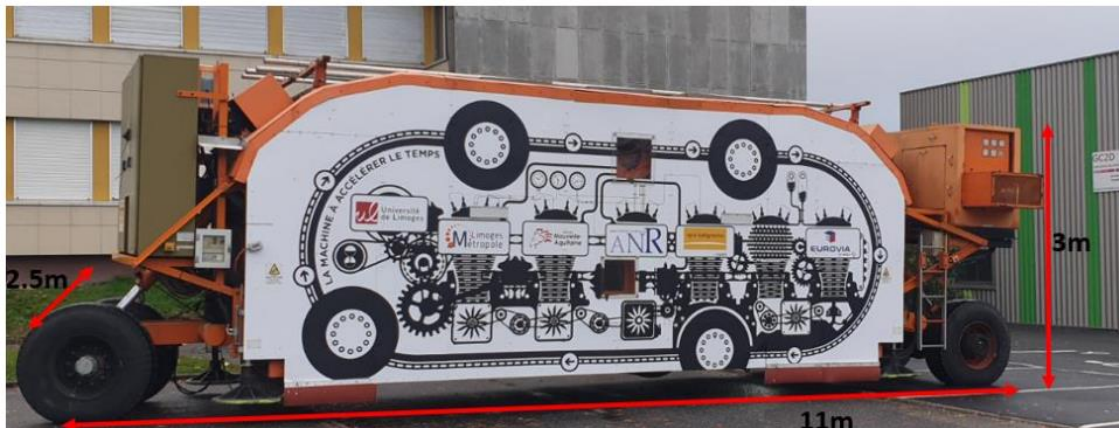


Figure 12 : Le simulateur de trafic MLS10

MLS10 est équipé de quatre bogies supportant les roues. MLS10 peut être utilisé avec différentes configurations, les roues de chargement peuvent être jumelées ou simples avec une charge allant de 40 à 75 kN. La charge est appliquée à l'aide d'un système hydraulique composé d'un vérin et d'un accumulateur. Un système de calibrage statique est utilisé au préalable pour ajuster la charge de l'essieu. Ce simulateur est conçu pour permettre aux bogies de se déplacer à une vitesse allant de 5 à 22 km/h. A la vitesse maximale, 6000 charges d'essieu sont appliquées par heure. Un mouvement latéral de l'appareil pour simuler un balayage latéral de la charge peut être aussi appliqué. Fonctionnant au gazole, MLS10 a une capacité de fonctionnement de 300 heures. La chaussée est alors sollicitée dans un seul sens sur une longueur d'environ 4,2 m. Dans notre cas, la charge sur chaque jumelage est de 6.5 tonnes (65 kN), la moitié de l'essieu standard français. Un jumelage est constitué par deux pneus 295/65 R22.5 (de diamètre égal à 940 mm). Les bords des pneus sont espacés de 100 mm. La vitesse adoptée pour nos simulations est d'environ 8 km/h avec 2000 passages d'essieux à l'heure.

4 Résultats

4.1 Réponse mécanique en surface

4.1.1 Déformations transversales

- Enrobés à chaud BBAO et BBOA+

La température des enrobés bitumineux influence de manière significative la réponse dynamique de la chaussée. La Figure 13 présente l'évolution des signaux de déformations transversales en surface de chaussée au passage d'une charge pour les deux enrobés à chaud à différentes températures. On constate alors que l'augmentation de la température fait accroître de manière significative l'amplitude de la déformation. Les profils de déformation indiquent que la zone de diffusion des signaux devient plus importante lorsque la température décroît. La durée des signaux (entre le début de la zone d'influence de la charge sur le capteur et le pic en extension, compté positivement sur la figure) décroît progressivement avec l'augmentation de la température.

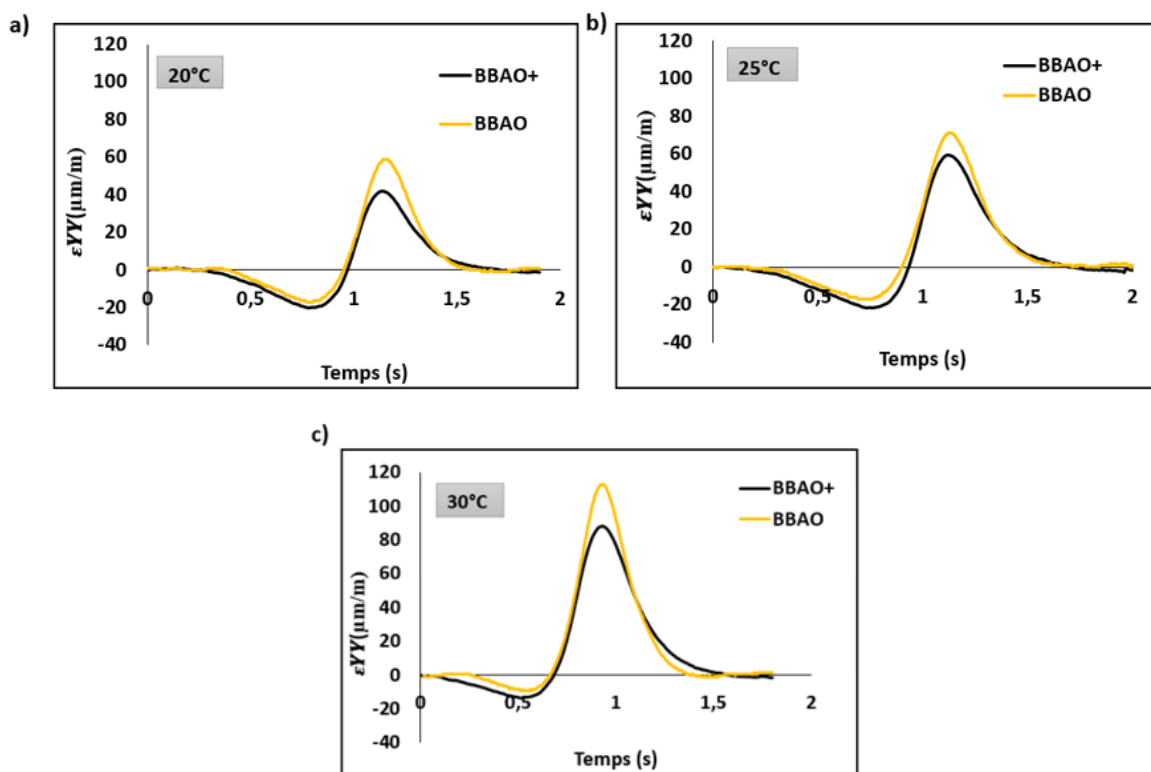


Figure 13 : Signaux de déformations transversales en surface (à $h=0$ et $y=0,60\text{m}$) pour les matériaux BBAO et BBAO+ à différentes températures

Comme le montre la Figure 13, la déformation maximale $\epsilon_{yy\text{max}}$ mesurée en surface de la chaussée varie avec la température. Bien que la déformation mesurée ait été influencée par le changement de température, on pourrait aussi s'attendre à ce que d'autres facteurs tels que

le nombre de cycles soient pris en compte pour expliquer le changement de déformation et un éventuel endommagement tout au long des essais. D'autres phénomènes comme le comportement d'interface qui dépend probablement aussi de la température (« collé/glissant » avec potentiellement une sensibilité à la température différente de celle des couches) peuvent influencer la déformation mesurée ([5]). Une courbe de régression exponentielle proportionnelle à la température est alors utilisée pour ajuster les données. Pour corriger l'effet de la température, un modèle de régression a été utilisé. Pour déterminer la réponse à une température de référence de 25°C, des facteurs de correction sont déterminés à partir des deux équations suivantes :

$$\varepsilon(T_{ref}) = CR. \varepsilon(T_{mes})$$

Avec :

$$CR (BBAO) = e^{0,0639(T-T_{Ref})}$$

$$CR (BBAO+) = e^{0,0472(T-T_{Ref})}$$

CR est le facteur de correction utilisé pour déplacer la déformation mesurée d'une température T à la température de référence de 25°C. Sur la base des équations précédentes, les réponses de déformation mesurée ont été ajustées à une température de référence de 25°C. Cet ajustement a permis de caractériser l'effet de l'endommagement par fatigue de la couche de surface. La Figure 14 illustre la variation de la déformation corrigée en fonction de nombre de cycles. Comme le montre cette figure, la déformation transversale en surface est restée relativement constante avec l'augmentation du nombre de cycles pour les deux matériaux, qui ne sont pas encore fatigués par les essais MLS10. Les courbes de la figure 13 montrent l'absence d'endommagement en surface pour le BBAO+ et BBAO car la déformation reste constante jusqu'à 80 000 cycles.

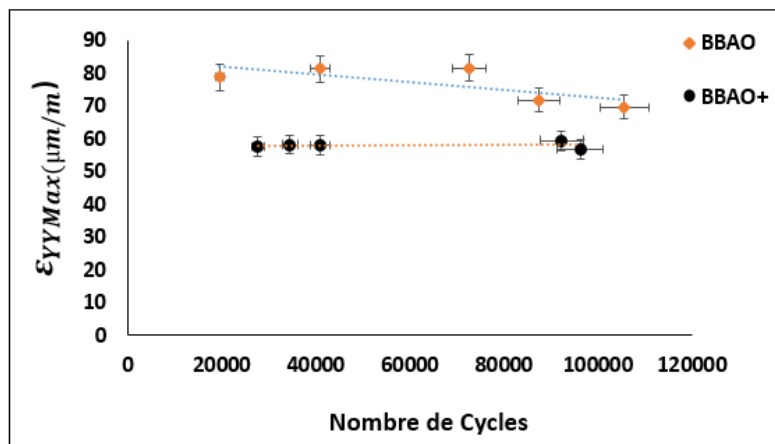


Figure 14 : Variation de la déformation transversale maximale corrigée à la température de référence de 25°C en fonction du nombre de cycles

- **Enrobé à froid AGRECO**

La Figure 15 illustre la déformation transversale en surface de l'enrobé à froid au passage de l'essieu MLS10 à différentes températures. Comme pour les enrobés à chaud et sous un chargement dynamique, la déformation transversale en surface est en extension lorsque le point de mesure est situé à l'extérieur du contact.

Lorsque la charge s'approche du point de mesure, les déformations deviennent positives (extensions) et augmentent jusqu'à atteindre un maximum au passage de la charge. Lorsqu'elle s'éloigne du point de mesure, l'état initial se rétablit progressivement. L'effet de la température apparaît clairement. Plus la température est importante, plus l'extension est grande. Contrairement aux enrobés à chaud, la zone de diffusion des signaux est quasi-identique avec l'augmentation de la température. Ce comportement peut s'expliquer par la présence de liaisons cimentaires qui réduisent la sensibilité thermique et la réponse visqueuse des enrobés à froid.

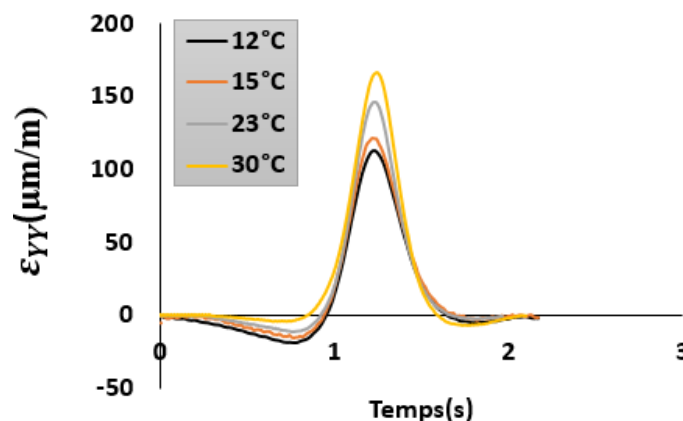


Figure 15 : Signaux de déformations transversales en surface (à $h=0$; $y=60\text{cm}$) pour l'Agreco (signal moyen après 10.000 cycles)

Pour déterminer la fatigue de l'Agreco, nous avons procédé de la même manière que précédemment. Les déformations transversales maximales ont été rapportées à une température de référence de 15°C (cf. Figure 16). L'évolution de la déformation est quasi constante en fonction du nombre de cycles, ce qui signifie, qu'à ce niveau de nombre de cycles, l'Agreco n'est pas encore fatigué. On peut remarquer que le niveau de déformation maximale est bien plus important que celui des enrobés à chaud et ce pour une température plus basse.

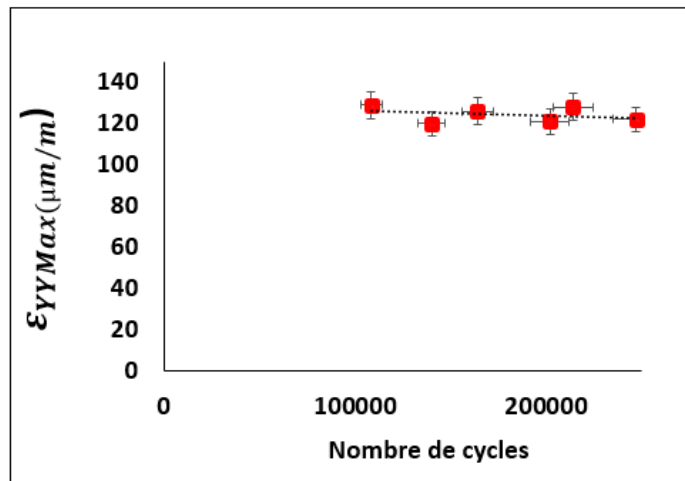


Figure 16 : Variation de la déformation transversale maximale corrigée à la température de référence de 15°C en fonction de nombre de cycles (Agreco)

4.1.2 Validation des calculs numériques SAM

La Figure 17 illustre les résultats de déformations transversales déterminés en surface pour les trois matériaux (Agreco, BBAO, BBAO+, voir paramètres tableau 2) et pour différentes modélisations du contact de pneu-chaussée.

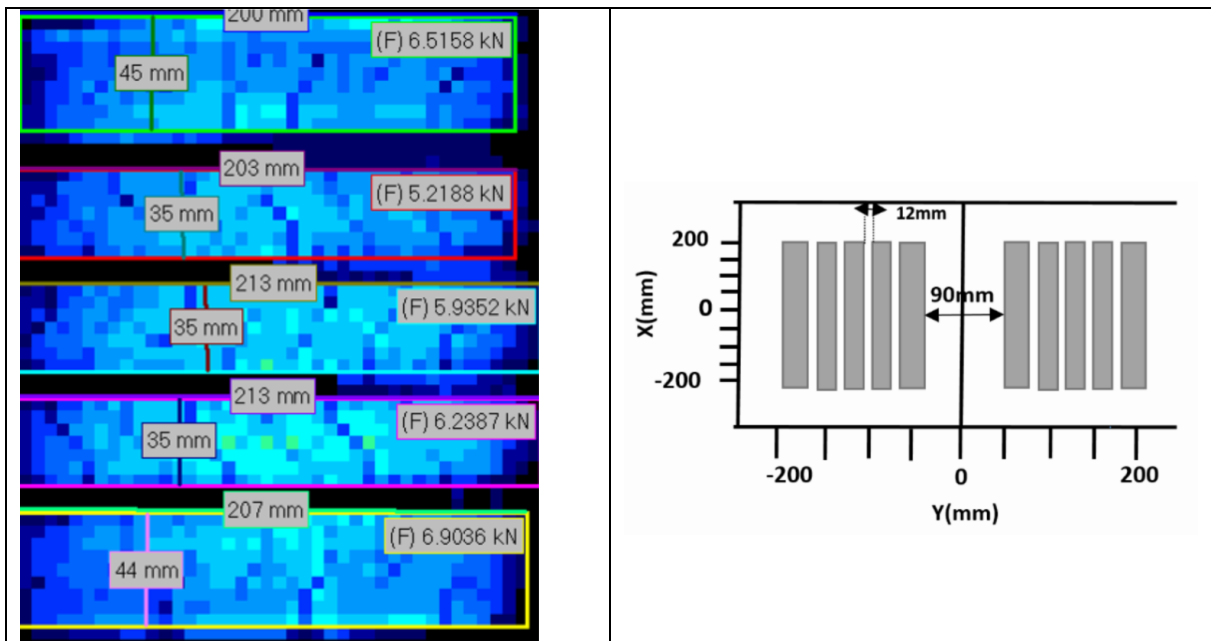


Figure 17 : à gauche : Empreinte d'un seul pneu mesurée avec le capteur Tekscan , à droite : Empreinte équivalente intégrée sur ViscoRoute

Le premier modèle de charge utilisé sur ViscoRoute consiste en un chargement uniforme avec une empreinte rectangulaire. La pression de contact dans ce cas est estimée à 0.66 MPa. Les calculs sur ViscoRoute ont été également réalisés avec une empreinte équivalente au pneu MLS10. Cette empreinte a été reconstituée à partir des mesures de pression de contact. En premier lieu, l'empreinte d'un seul pneu (référence 295/80R22.5) du simulateur MLS10 a été

mesurée avec le capteur de pression de contact TekScan. Les essais ont été effectués en statique avec une charge de 32.5 kN. La charge totale a ensuite été décomposée en sous - charge rectangulaire, chaque rectangle possédant une pression moyenne locale. Finalement, la géométrie de l’empreinte de l’essieu MLS10 a été intégré sur ViscoRoute par symétrie. La Figure 17 présente la mesure issue de l’outil TekScan et la modélisation associée. L’essieu est supposé symétrique et centré sur le point (0,0). La sculpture du pneu est composée de cinq nervures et quatre rainures. L’espace entre chaque nervure est considéré constant. L’espace entre les deux pneus est supposé égal à l’espace réel de l’essieu MLS10 (soit 9 cm). Dans SAM, le profil réel du pneu a été intégré par une technique de photogrammétrie tandis que ses propriétés ont été estimées par des essais de déflexion du pneu ([3], [4]).

Ces signaux de déformations transversales sont les résultats d’un calcul élastique réalisé sur ViscoRoute et SAM à une température de 20°C.

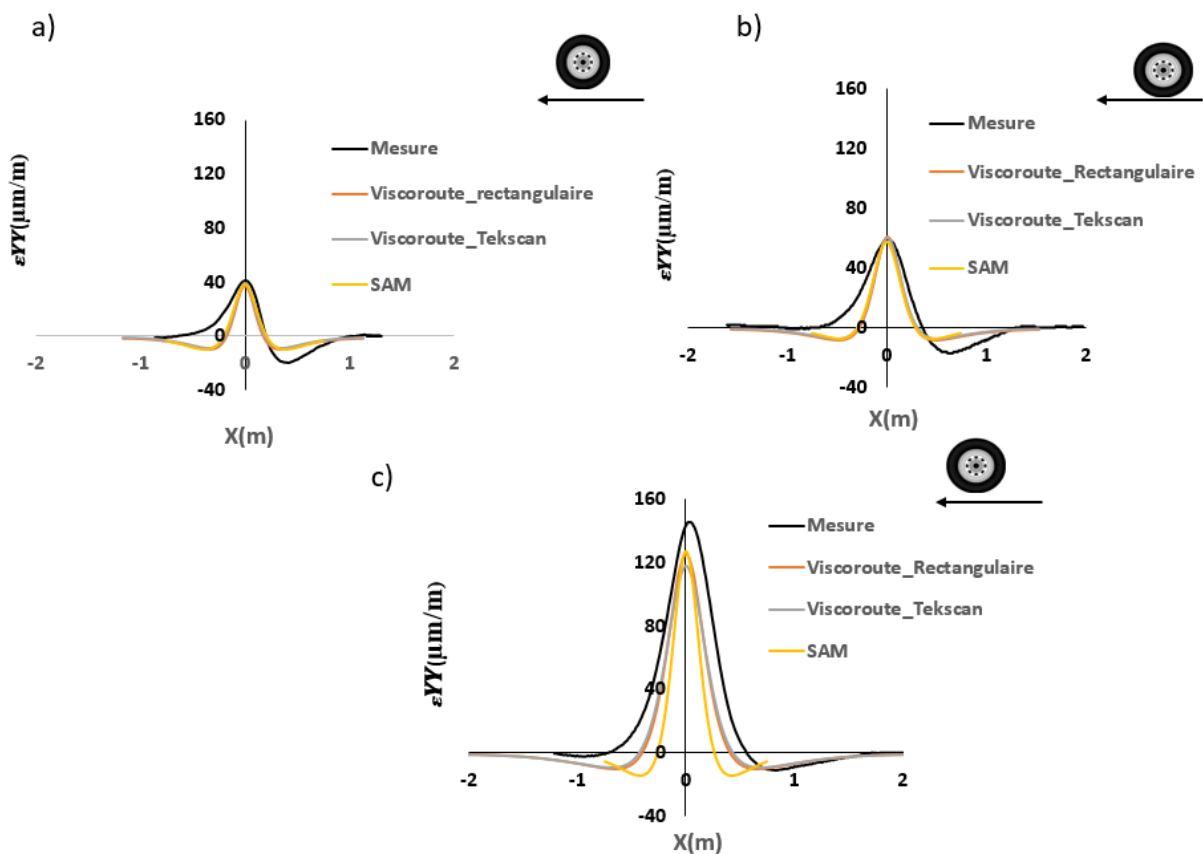


Figure 18 : Signaux de déformations transversales à 20 °C, après 10.000 Cycles (à h = 0 ; y = 60).

a) BBAO+, b) BBAO, c) Agreco

Pour les trois matériaux, la comparaison des signaux mesurés et calculés nous informe que les modélisations élastiques ne peuvent que reproduire partiellement la forme des déformations mesurées. Les Figure 18 a et b indiquent que, pour les enrobés à chaud (BBAO

et BBAO+), les pics en extension calculés correspondent bien aux réponses mesurées avec un écart de 1,3 %.

D'autre part, les simulations numériques présentent un pic en contraction moins prononcé. Ces différences peuvent s'expliquer par :

- La variation de l'épaisseur lors de la mise en œuvre ;
- la présence d'un gradient de température ;
- les conditions de collage de la couche de liaison ;
- la taille des jauges ;
- et d'autres paramètres (comme la viscoélasticité, par exemple).

Cet écart peut être aussi dû aux paramètres de calculs. Les matériaux bitumineux sont en effet considérés comme neufs et à comportement élastique dans les calculs alors que la chaussée a déjà subi une diminution de sa rigidité à cause des conditions environnementales et du nombre de cycles. La comparaison montre également que pour les enrobés à froid (Agreco), les modélisations ont tendance à sous-estimer les déformations (Figure 17c). L'écart entre la déformation calculée et mesurée est d'environ 20%. Cette différence peut être expliquée de nouveau par les conditions de mises en œuvre et de réalisation des essais (gradient de température, taille des capteurs) mais aussi par les hypothèses de calculs.

L'analyse des signaux montre que, hors zone de roulement, les déformations issues des calculs ViscoRoute (empreinte rectangulaire ou empreinte équivalente, cf. figure 17) et celles déterminées par SAM (vraie géométrie du pneu, pression de contact maxi de 1,4 MPa) sont quasiment identiques. Ainsi, dans la suite, nous choisissons une empreinte rectangulaire (pression de contact de 0.66 MPa) pour les comparaisons entre ViscoRoute et SAM.

Les résultats expérimentaux montrent clairement l'effet de la viscoélasticité des enrobés sur la déformation transversale. Il apparaît une dissymétrie entre les signaux mesurés et les signaux élastiques. On remarque que les calculs élastiques donnent un signal symétrique contrairement au signal réel où l'effet visqueux entraîne une dissymétrie du signal. Dans la suite, nous choisirons donc de réaliser des modélisations viscoélastiques et élastiques équivalentes. La Figure 19 illustre la déformation transversale en surface ($h = 0$) au centre du jumelage ($y = 0$) au passage d'un essieu simple pour le matériau BBAO+. L'essieu MLS10 est équipé de pneus jumelés et roule à 11 km/h. La déformation transversale devient plus importante à mesure que la charge se rapproche de la jauge jusqu'à un maximum au passage de celle-ci. Après le passage de la charge, la déformation décroît progressivement jusqu'au retour à zéro. La partie centrale du signal présente un saut de déformation. Ce saut de déformation est expliqué par le cheminement des contraintes lors du passage de la charge.

La contrainte longitudinale engendre un saut de déformation par effet Poisson et une diminution de la déformation transversale d'environ 35% correspondant au coefficient de Poisson. Pour un coefficient de Poisson constant, les sauts de déformations seront d'autant plus prononcés que le ratio entre les contraintes transversales et longitudinales sera petit. La contrainte transversale engendre une contraction dans le sens transversal alors que la contrainte longitudinale génère une extension par effet Poisson. Le BBAO+ étant déjà comprimé dans cette zone, cette traction est bloquée et engendre ce saut de déformation. L'amplitude des sauts est fonction de l'intensité de la contrainte longitudinale par rapport aux contraintes transversales et donc, du coefficient de Poisson.

Hormis la dissymétrie du signal due à l'effet visqueux, les résultats issus de la modélisation SAM correspondent mieux aux mesures que ceux issus de Viscoroute. En surface, la modélisation semi analytique est donc plus représentative de la réalité du contact.

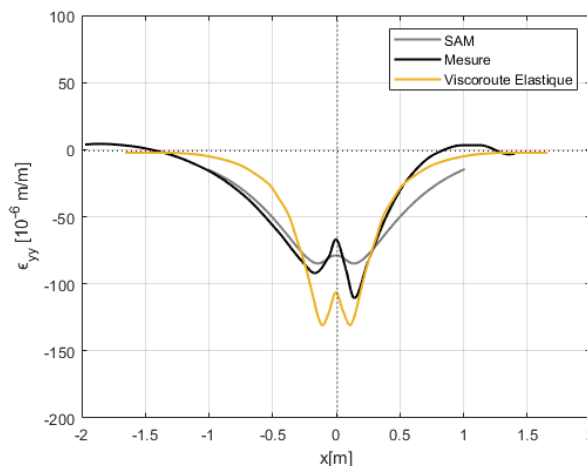


Figure 19 : Signaux de déformations transversales pour le BBAO+ à 20 °C, après 10.000 Cycles (à $h = 0$; $y = 0$).

4.2 Réponse mécanique à l'interface

La Figure 20 illustre la position de la jauge transversale et sa déformation au passage d'un cycle de chargement MLS10 à 15°C. La forme du signal de la déformation transversale est différente de la déformation longitudinale (voir figure 22). Il n'y a pas cette fois de dissymétrie constatée. On remarque, que pour la même température et le même nombre de cycles (environ 10.000 cycles), la déformation maximale transversale est moins importante que la déformation longitudinale. Cette tendance dépend des conditions de température et de la vitesse de chargement.

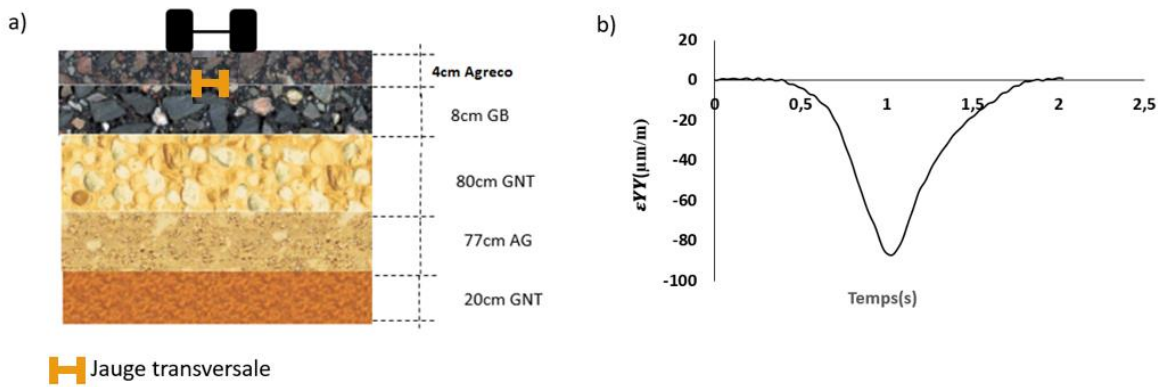


Figure 20 : a) Emplacement du point de mesure, b) Déformation transversale mesurée à l'interface (à $h = 4\text{cm}$ et $y = 0$) au passage d'un essieu pneus jumelés (15°C , après 10.000 cycles)

Les résultats présentés sur la Figure 21 mettent en évidence l'effet de la température. Lorsque la température passe de 13 à 31°C , l'amplitude de la déformation maximale augmente de 60%. Les déformations transversales maximales ont été ramenées à une température de référence de 15°C . La déformation maximale est quasi-constante (Figure 21b) en fonction du nombre de cycles, ce qui signifie que l'Agreco n'est pas encore fatigué. Son module reste donc constant après 250.000 cycles.

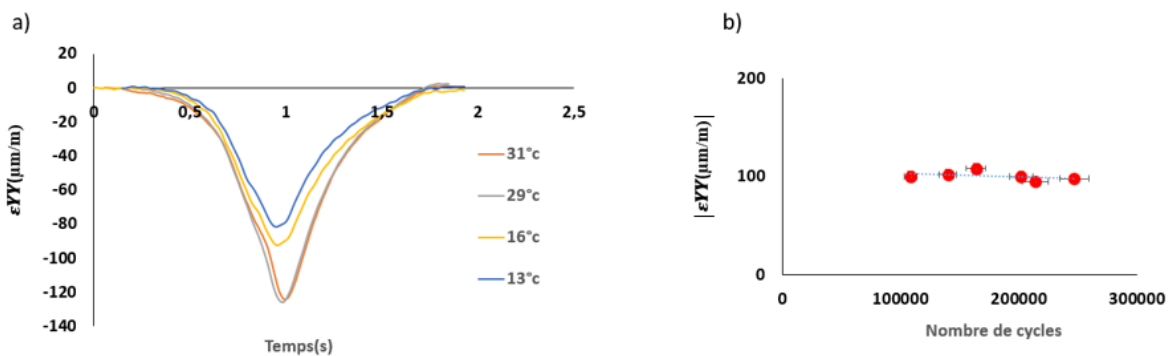


Figure 21 : a) Evolution de la déformation transversale en fonction de la température, b) Evolution de la déformation transversale maximale en fonction du nombre de cycles

Ces résultats expérimentaux sont comparés aux modélisations SAM et ViscoRoute. Comme déjà évoqué précédemment, la forme du signal de la déformation dépend de l'orientation de la jauge (transversale ou longitudinale). Les calculs (viscoélastique pour ViscoRoute et élastique pour SAM) sont réalisés via le choix de modules équivalents pour une température de 15°C et une fréquence de 1 Hz . Les modules ont été calculés sur la base d'un calage avec des essais FWD. Des corrections sur les modules sont ensuite apportées pour tenir compte de la fréquence de chargement des essais MLS10 (1 Hz contre 10 Hz pour le FWD) et de la température. Le module utilisé pour les calculs est alors de 3500 MPa pour l'Agreco et 11960 MPa pour la GB. La forme des signaux de déformations transversales modélisés et mesurés

est quasi-identique à cette profondeur de 4 cm (Figure 22). La déformation maximale est correctement estimée par les calculs SAM et ViscoRoute.

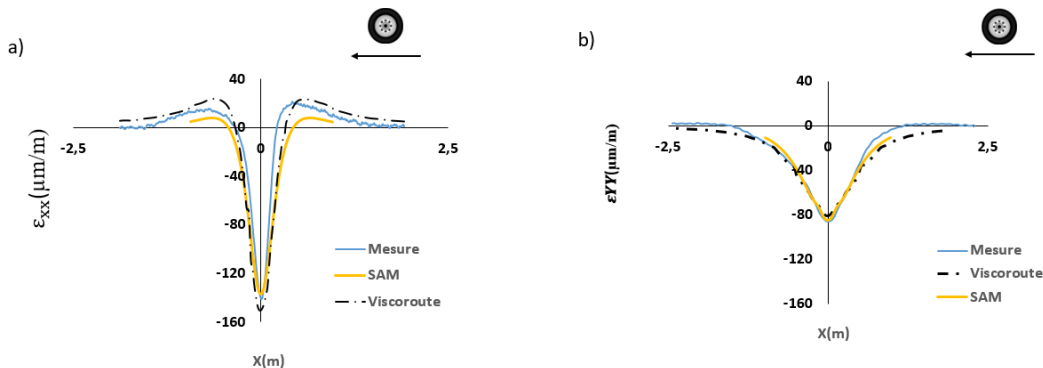


Figure 22 : Comparaison modèles/mesures à l'interface Agreco/GB : a) déformations longitudinales ; b) déformations transversales

L'erreur entre la mesure et le calcul est inférieure à 5 %. Par ailleurs, notre modèle élastique ne montre aucune dissymétrie avant et après le passage de la charge. Les comparaisons montrent cependant une légère différence sur les déformations longitudinales. ViscoRoute restent ici le meilleur modèle pour obtenir les valeurs correctes de déformation en profondeur. L'erreur entre la contraction maximale calculée par SAM et la mesure est de 2%.

4.3 Etude de l'orniérage

L'objectif principal de cette partie est de suivre l'évolution de l'ornière à l'aide d'essais en vraie grandeur. Notre stratégie d'évaluation consiste à tester la performance à l'orniérage des quatre couches de surface utilisées.

Les mesures d'ornières sur la couche de BBSG ont constitué une base de référence pour l'analyse de la performance des bétons Anti-Orniérants (BBAO et BBAO+). Ces essais ont été fait avec des conditions de température et de chargement identique alors que les essais sur l'enrobé à froid (Agreco) ont été réalisés dans des conditions différentes.

Le profil d'ornière, les caractéristiques de déformation, l'effet de la température et la résistance au cisaillement ont été analysés. Le profil transversal de l'ornière a été mesuré à l'aide d'un profilomètre. Ce résultat a été comparé à deux techniques de traitement d'images : la photogrammétrie et le scanner. Trois campagnes de mesures ont été réalisées pour le suivi de l'orniérage. La première campagne de mesures concerne la couche de BBSG considérée comme couche de référence. Les mesures ont été réalisées en juin 2019 pendant 15 jours en ambiance thermique naturelle. Durant cette période, le matériau a été soumis à 100.000 cycles de chargement jusqu'à atteindre 1 cm d'ornière, critère choisi pour l'arrêt de l'essai.

4.3.1 Profils transversaux

La Figure 23 présente les profils transversaux des trois matériaux mesurés par un profilomètre à la même position (0,5 m de l'axe central transversal) après 100.000 cycles de chargement. Une dépression longitudinale se développe progressivement avec l'augmentation des cycles de chargement.

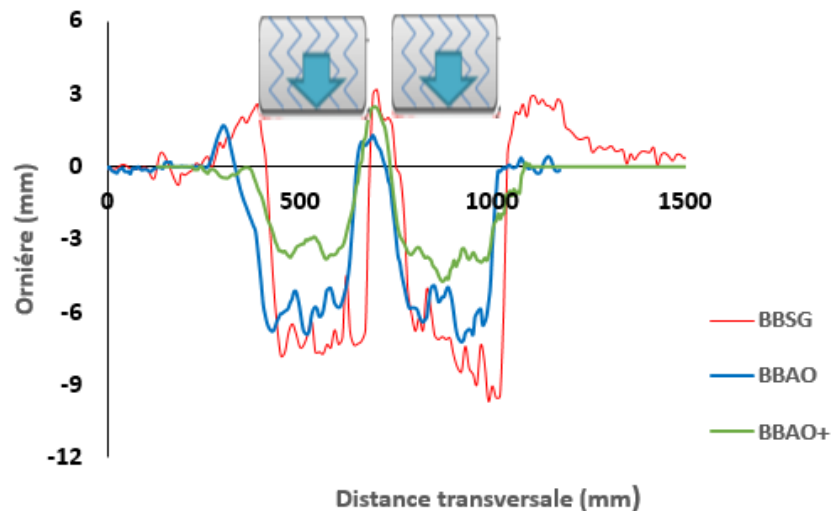


Figure 23 : Profils transversaux relevés après 100.000 Cycles

Les profils transversaux présentent une déformation en forme de W. Une dépression se situe sous les pneumatiques tandis qu'un soulèvement se situe entre les deux pneumatiques et sur les bords extérieurs de la zone de contact. La déformation par soulèvement perceptible au niveau de la ligne médiane indique qu'un écoulement se produit dans les enrobés bitumineux pendant les essais MLS10. La déformation de soulèvement dans la couche de BBSG est plus importante que dans les deux autres matériaux. Les deux BBAO ont donc une capacité de résistance à l'écoulement différente. La déformation par soulèvement remarquée dans la couche de BBSG sur les deux côtés de la zone de chargement est moins visible dans les couches BBAO et le BBAO+.

La photogrammétrie et le scanner ont été également utilisés pour relever le profil transversal de l'ornièrre. La reconstruction 3D par la technique de photogrammétrie est réalisée à partir de plusieurs photographies prises sous différents angles et distances.

Ces photographies sont traitées par la suite à l'aide d'un outil numérique (Agisoft Metashape®), qui détecte les points communs entre chaque photographie puis crée le modèle 3D. Le scanner utilisé est un scanner 3D Artec Eva dont les données sont traitées à l'aide du logiciel Artec Studio 13 Professional®. Cet outil fonctionne sur le principe de la lumière structurée. Une séquence de motifs est projetée sur l'objet étudié et enregistrée par une caméra. La déformation de ces motifs est analysée par le relief (distances des points

composant le motif). La Figure 24 présente les profils transversaux en analyse 3D des trois techniques de mesure après 100.000 cycles de chargement pour la couche de BBSG. Les profils sont assez similaires mais la méthode de photogrammétrie semble moins performante en termes de résolution.

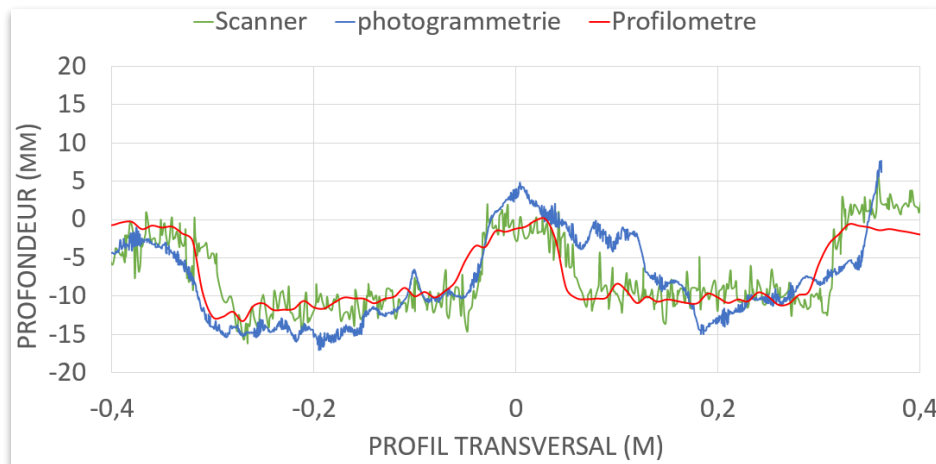


Figure 24 : Profils transversaux pour le BBSG issus des trois techniques

L'utilisation des trois méthodes a montré que :

- les profils de l'ornière sont assez similaires,
- le profilomètre permet des mesures instantanées sans post – traitement,
- la technique du scanner est plus précise mais nécessite un post – traitement complexe,
- la photogrammétrie impose un déplacement de la machine pour chaque mesure avec un post-traitement moins complexe.

En conséquence, pour nos analyses de profil suivantes, nous avons préféré l'utilisation du profilomètre grâce à précision et sa facilité d'exécution.

4.3.2 Profondeur d'orniérage

Les mécanismes impliqués dans le développement de la profondeur de l'ornière peuvent être évalués à l'aide d'observations sur le terrain et via la connaissance de ces mécanismes. La différence constatée entre la profondeur maximale mesurée et la ligne de référence (déterminée sur la base de mesures de profondeur de profil prises avant l'application du chargement, c'est-à-dire à 0 cycle de chargement) est définie comme la profondeur maximale mesurée de l'ornière après un certain nombre de cycles. La comparaison des profondeurs d'orniérage nous a permis d'évaluer les performances d'orniérage des trois matériaux testés.

Les essais sur les trois matériaux ont été réalisés dans des conditions de température quasi identique jusqu'à 100.000 cycles. L'évolution de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles et de la température est présentée sur la Figure 25. Les 10000 premiers cycles

réalisés à 20°C correspondent à une phase de post-compactage. L'augmentation de l'ornièrè est faible (2 mm). Comme le montre la figure, lors des 50.000 cycles réalisés à 30°C, l'ornièrè évolue de façon linéaire. On constate sur la même figure que l'ornièrè augmente avec l'augmentation des cycles pour les trois matériaux. En revanche, la tendance d'évolution est différente pour les trois matériaux. On peut observer que, jusqu'à 100.000 cycles et pour les mêmes conditions de température, la couche de BBSG présente une évolution de la profondeur d'ornièrè deux fois supérieure à la profondeur d'ornièrè de la couche de BBAO, et près de trois fois supérieure à celle de la couche de BBAO+. A titre d'exemple, à 100.000 cycles et pour les mêmes conditions de températures, l'enrobé de référence présente une profondeur d'ornièrè maximale d'environ 12 mm alors que la profondeur d'ornièrè maximale est d'environ 5 mm pour le BBAO et de 3 mm pour le BBAO+. Les analyses indiquent que le BBAO+ présente une meilleure résistance à l'ornièrage et que l'enrobé de référence (BBSG) est le plus défavorable quelles que soient les conditions de chargement.

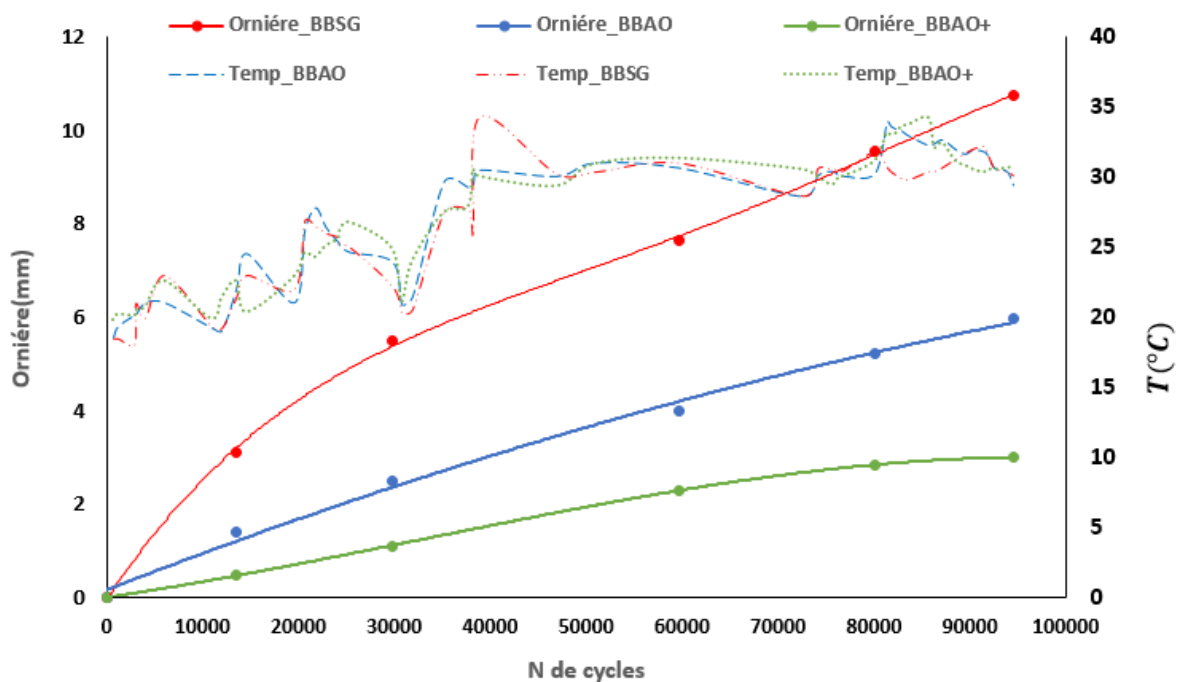


Figure 25 : Courbes d'ornièrage jusqu'à 100.000 cycles

Pour la couche de BBSG, l'ornièrè s'est développée rapidement (vers les 30.000 cycles), puis a augmenté régulièrement et linéairement jusqu'à la fin de l'essai (100.000 cycles). La forme des courbes de l'évolution des ornièrès pour les trois matériaux est différente. La courbe du BBSG présente une forme indiquant une sensibilité précoce à l'ornièrage. La courbe du BBAO est quasi linéaire jusqu'à 100.000 cycles. La vitesse d'ornièrage pour le BBAO+ diminue à partir de 80.000 cycles montrant que ce dernier est moins sensible à un ornièrage précoce.

4.3.3 Modèles prédictifs

Pour caractériser la sensibilité de l’ornière vis-à-vis du nombre de cycles de chargement et de la température, nous avons effectué une étude statistique sur les mesures d’ornière pour les quatre matériaux. L’analyse statistique est basée sur une étude de la régression linéaire des variables suivants : Rd (profondeur de l’ornière), T (température) et N (nombre de cycles). En utilisant les résultats des relevés de la profondeur de l’ornière, nous avons effectué une analyse de régression en utilisant les conditions de température (15, 20 et 30°C), le nombre de cycles et la profondeur d’ornière comme paramètres. Sur la base de notre analyse, nous avons généré un modèle de prédiction de l’orniérage exprimé dans l’équation suivante :

$$Rd = \alpha * T^\beta * N^\delta$$

Avec Rd la profondeur de l’ornière, T la température et N le nombre de cycles.

La Figure 26 montre une comparaison des valeurs prédites et mesurées. Les modèles proposés pour estimer la profondeur de l’orniérage ont montré une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

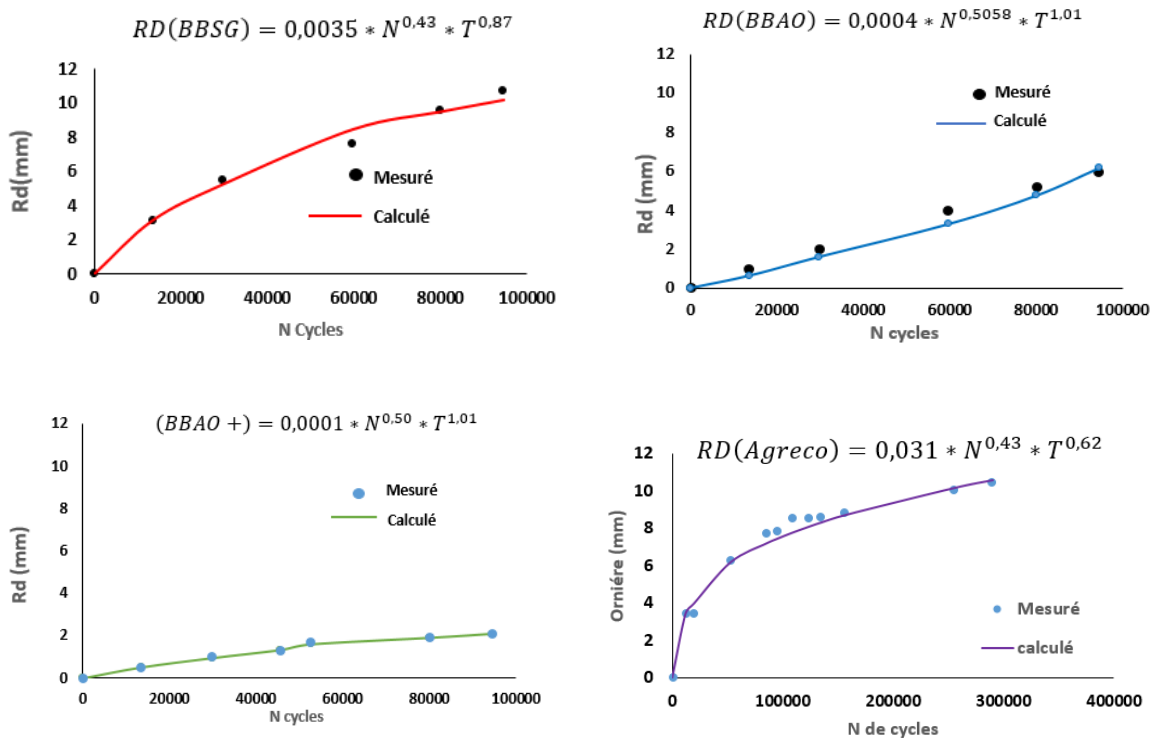


Figure 26 : Comparaison entre l’orniérage calculé et mesuré pour les quatre matériaux

L’analyse des équations montre une évolution quasi-linéaire de l’ornière en fonction de la température pour les enrobés à chaud et une évolution en « racine-carré » en fonction du nombre de cycle de chargement. Ces courbes montrent également que les produits à froid

(Agreco) semblent s'approcher d'une évolution en racine carrée de la température plutôt que linéaire. L'orniérage initial est matérialisé par le coefficient α . Au vu des valeurs de ce coefficient, le matériau BBAO+ est ainsi très peu orniérant contrairement au matériau BBSG et Agreco.

5 Conclusion

Dans l'objectif de proposer une future méthode rationnelle de dimensionnement de la couche de surface, cette troisième tranche du projet a présenté l'analyse du comportement mécanique de la couche de surface à l'aide d'essais en vraies grandeurs et d'un modèle numérique semi-analytique.

Quatre matériaux de surface ont été soumis au simulateur de trafic MLS10 en roulement pur et en ambiance thermique contrôlée (par la température de surface) sur une période de deux ans. Plusieurs techniques de mesures ont été développées tant pour la validation des champs de déformations que pour le suivi de l'orniérage. Les mesures ont été comparés aux résultats du modèle SAM et du logiciel ViscoRoute. Les différentes analyses en surface montrent alors que les déformations dépendent fortement de la position des points de mesure par rapport au contact. Nous avons démontré que les modélisations numériques réalisées sur SAM et ViscoRoute ont permis de prédire raisonnablement et de manière équivalente les déformations réelles en dehors de la zone de roulement (en dehors du contact).

Ensuite, les mécanismes de l'orniérage pour les quatre matériaux de surface ont été étudiés. L'analyse de la forme du profil d'ornière a démontré que le béton bitumineux Anti- Orniérant modifié + (BBAO+) présente une meilleure résistance au cisaillement que les BBAO et BBSG. L'analyse de l'évolution de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles a confirmé que le BBAO+ était beaucoup plus performant vis-à-vis de l'orniérage. L'étude de la zone de déformation a suggéré également que la déformation permanente la plus importante s'est produite principalement en début d'essais dans l'enrobé à froid Agreco.

Le suivi de l'ornière à l'aide des essais en vraies grandeurs à des températures contrôlées a contribué au développement de modèles empiriques de prédiction de l'orniérage. Ces modèles intègrent le nombre de cycles et la température. Par une analyse paramétrique, nous avons démontré que l'orniérage est plus sensible à la température.

Bien que les travaux présentés dans ce document aient montré l'efficacité des modélisations et l'intérêt de l'utilisation d'un simulateur de trafic (MLS10) pour leur validation, nous devons poursuivre par des analyses plus approfondies du comportement de la couche de surface en vue du développement d'un outil de calcul de dimensionnement.

Une confrontation à des essais à petite échelle pourrait être entreprise. Une étude plus approfondie des caractéristiques en fatigue des matériaux s'appuyant sur les essais en laboratoire s'avère nécessaire. Elle permettrait de conforter les résultats de la durée de vie de la couche de surface vis-à-vis des fissurations descendantes et de l'ornièrage.

La poursuite du développement du code de calcul Semi-Analytique entrepris par Manyo [3], utilisant les résultats présentés dans cette thèse devra être faite. Cet outil numérique a été validé par des essais en vraies grandeurs et a permis d'introduire une loi viscoplastique [6]. En effet, les modèles de prédictions de l'ornièrage et les analyses de suivi de l'ornière pour les matériaux étudiés devront présenter des paramètres d'entrées pour une modélisation viscoplastique dans le code de calcul SAM.

La prise compte du comportement de la couche de surface en points singuliers est nécessaire car les dégradations y sont plus marquées et nécessitent plus d'entretien. Pour cela, un projet nommé « ChauSur » a débuté (janvier 2022). Son objectif est d'étudier l'agressivité du contact sur les couches de surface en des points singuliers à l'aide d'un nouveau simulateur de trafic (dont le nom est MACADAM) conçu spécialement pour solliciter une chaussée en virages, zones de freinage et d'accélération en environnement contrôlé (entre -5 à 40°C).

6 Références

- [1] Reynaud P., Picoux B., Petit C., Etude du contact pneu-chaussée par approche tribologique, Les Journées Techniques Route, Nantes, May 2022.
- [2] Oubahdou, Y., Reynaud, P., Petit, C., Millien, A., Dopeux, J., Metrope, M., Picoux, B., Gerbaud, C., Tautou, R., "Full scale testing with the mobile load simulator: Advanced measurements related to pavement behavior and surface layer damage", Lecture Notes in Civil Engineering, (96), LNCE, Pages 467-475, 2020.
- [3] Manyo, E. Y., Reynaud, P., Picoux, B., Tautou, R., Nelias, D., Allou, F., & Petit, C. Towards fast modelling of the tire-pavement contact. European Journal of Environmental and Civil Engineering, pp. 1-17, 2019.
- [4] Reynaud P., Picoux B., Manyo. E.Y., Petit C., Approche tribologique du comportement en surface de chaussée, Rapport projet DVDC Tranche 2, DVDC/R/037, 2020.
- [5] Grellet D., Doré G., Chupin O., Piau J.M., Highlighting of the viscoelastic behaviour of interfaces in asphalt pavements—a possible origin to top-down cracking, Road Materials and Pavement Design 19 (3), pp. 581-590, 2018.
- [6] Wallace E.R., On the rolling contact between multi-layered bodies, application to tire-pavement modelling, Thèse, INSA Lyon, 4 mars 2022.