

Perspectives d'utilisation des capteurs à fibres optiques continues pour l'instrumentation des chaussées

Paulina LEIVA-PADILLA¹, Xavier CHAPELEAU², Mai-Lan NGUYEN¹, Samir ALLAM³, Emmanuel LOISON³, Juliette BLANC¹, Pierre HORNYCH¹

¹ Département MAST - Université Gustave Eiffel, Campus Nantes, F-44344 Bouguenais, France

² Département COSYS - Université Gustave Eiffel, équipe I4S (Inria), Campus Nantes, 44344 Bouguenais, France

³ Groupe COLAS – CORE Center, 4 rue Jean Mermoz, 78714 Magny-les-Hameaux, France

RESUME L'instrumentation des chaussées sur site représente un moyen pour mieux suivre le comportement des structures de chaussées en temps réel, prévenir leurs dégradations et améliorer leur gestion. Cela nécessite de développer des méthodes d'instrumentation présentant des caractéristiques adaptées aux structures de chaussées : bonne précision, compatibilité avec l'hétérogénéité et la rigidité des matériaux de chaussées, faible encombrement, résistance durant la construction et la phase de service. Les capteurs à fibres optiques, caractérisés par leurs faibles dimensions, leur insensibilité aux interférences électromagnétiques et à la corrosion et leur capacité à mesurer à la fois les déformations et les températures, constituent une solution prometteuse pour répondre à ces nouveaux besoins. Ce projet présente des premiers résultats de mesures réalisées au moyen de capteurs à fibres optiques continues, dans des structures de chaussées bitumineuses, testées sur le manège de fatigue de l'Université Gustave Eiffel. La technologie utilisée (basée sur la rétrodiffusion Rayleigh) permet de mesurer les déformations de manière continue, sur une longueur de fibre de 10 m, avec une résolution de l'ordre de 10^{-6} m/m, à plusieurs niveaux dans la chaussée. Cela permet de caractériser de façon beaucoup plus précise les champs de déformations longitudinales ou transversales sous passage des charges roulantes, que les capteurs traditionnels, tels que les jauges de déformation, qui ne permettent que des mesures ponctuelles.

Mots-clefs fibres optiques, essais accélérés sur chaussées, instrumentation des chaussées, surveillance des chaussées.

I. INTRODUCTION

La qualité du réseau routier, et sa maintenance sont d'une grande importance pour le développement économique d'un pays. Les méthodologies traditionnelles d'auscultation des réseaux routiers reposent sur l'utilisation de véhicules d'inspection. Ces méthodes sont coûteuses, relativement lentes et pas toujours automatisées, ce qui rend les résultats obtenus très dépendants de l'opérateur. Dans ce contexte, la surveillance continue et automatique (en temps réel) de l'état structurel des chaussées, au moyen de capteurs installés dans les chaussées est un sujet qui suscite de plus en plus d'intérêt.

La méthode classiquement employée pour mesurer les déformations dans les couches d'assise des chaussées consiste à utiliser des jauges électriques de déformations. Malgré l'intérêt de cette méthode, elle présente également des limitations, dues au fait que les mesures sont très ponctuelles, et que les jauges présentent des dimensions relativement importantes, en comparaison avec les faibles épaisseurs de certaines couches bitumineuses. En comparaison, les fibres optiques sont une technique de mesure qui présente des caractéristiques intéressantes pour l'instrumentation des chaussées: petites dimensions (diamètre de quelques millimètres), immunité aux interférences électromagnétiques, résistance à la corrosion, possibilité de réaliser des mesures réparties sur toute la longueur de la fibre, durabilité, sensibilité élevée (Chapeleau & Bassil, 2021; Liu et al., 2022; Sourisseau et al., 2022b, 2022a; Wijaya et al., 2021). De plus, les progrès récents des systèmes d'acquisition permettent de réaliser aujourd'hui des mesures à des fréquences relativement élevées (de l'ordre de 100 Hz), ce qui permet de réaliser des mesures sous charges roulantes.

Si les fibres optiques sont déjà largement utilisées pour l'instrumentation des structures en béton, il y a encore peu d'études sur leur utilisation dans les matériaux et structures de chaussées, en laboratoire (Mustafa et al., 2022) comme sur site (Braunfelds et al., 2021; Hubbard et al., 2022).

Ce document présente les premiers résultats de mesures réalisées au moyen de fibres optiques réparties, utilisant la technologie OFDR-Rayleigh (« Optical Frequency Domain Reflectometry »), dans des structures de chaussées bitumineuses, testées sur le manège de fatigue, grand équipement d'essais accélérés sur chaussées situé sur le Campus Nantes de l'Université Gustave Eiffel.

II. PROGRAMME D'ESSAIS

A. Structures de chaussées et instrumentation

L'objectif de l'essai était de tester, à l'échelle réelle, l'utilisation de capteurs à fibres optiques continues pour la mesure des déformations dans les couches de chaussées bitumineuses, sous le passage de charges roulantes. Pour cet objectif, la moitié de la piste circulaire du manège de fatigue de l'Université Gustave Eiffel (voir FIGURE 1 a) a été reconstruite et instrumentée.

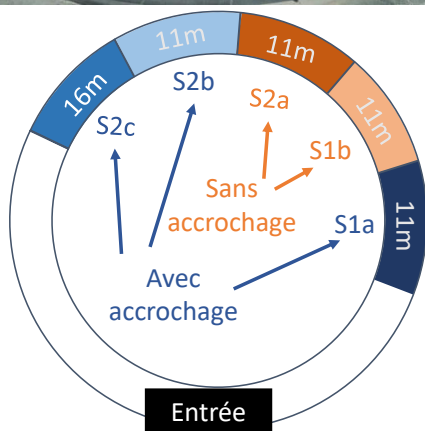
Les travaux ont consisté à fraiser en partie l'ancienne structure, en laissant en place une partie de l'ancienne couche de grave bitume (GB), et à mettre en place de nouvelles couches de roulement. Cinq sections ont ainsi été réalisées (voir FIGURE 1b), deux sections comportant une couche de roulement de 5 cm d'épaisseur en béton bitumineux mince (BBM), l'une avec une couche d'accrochage à l'interface (S1a) et l'autre sans couche d'accrochage (S1b), et trois sections comportant une couche de roulement de 6 cm en béton bitumineux semi grenu (BBSG), l'une sans couche d'accrochage (S2a), et les deux autres avec couche d'accrochage (S2b et S2c).

Comme illustré sur la FIGURE 1b, les sections S2a et S2b ont été instrumentées à l'aide de deux jauges de déformations longitudinales et deux jauges de déformations transversales, placées à la base de la nouvelle couche de BBSG. Deux profils de thermocouples ont aussi été mis en place sur la section S1b et sur la section S2a, afin de mesurer les températures en surface, à la base de la

nouvelle couche de roulement (BBSG), à la base de l'ancienne GB, et à mi-profondeur dans la GNT.

Chaque section de chaussée a également été instrumentée au moyen de capteurs à fibres optiques continus, placés à la base de la nouvelle couche de roulement (en BBSG ou en BBM) et en haut de l'ancienne GB. Pour cette expérimentation, des câbles optiques de 10 m de long et comportant six fibres optiques monomodes entourées d'un revêtement en hytrel® (diamètre extérieur : 2,8mm) ont été utilisés comme capteurs. A noter que seuls les résultats obtenus pour la Section 2b sont présentés dans cet article.

La FIGURE 2a montre la disposition des capteurs à fibres optiques dans la section 2b. Il est important de souligner qu'une attention particulière a été apportée au positionnement des fibres optiques en bas de la couche BBSG et en haut de la couche GB pour faire en sorte qu'elles soient bien superposées. En outre, compte-tenu de leur disposition dans la chaussée, elles permettent de mesurer à la fois les déformations transversales et longitudinales au passage des charges roulantes. La FIGURE 2b précise également les points de repère (abscisses le long de la fibre) utilisés pour la présentation des résultats de mesure de cette expérimentation.



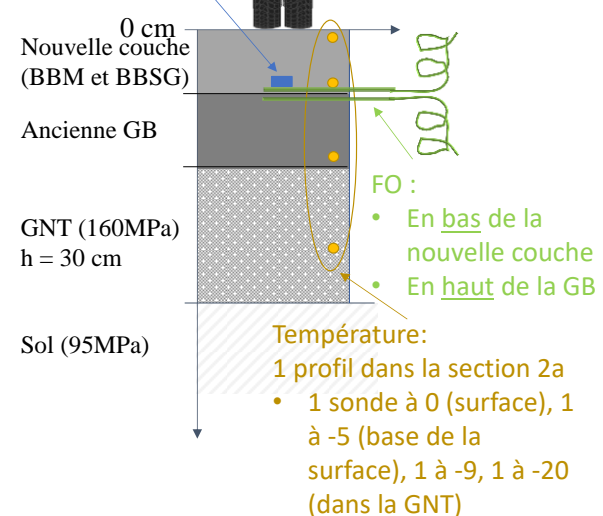
(a) Vue de dessus – Toutes les sections

Jauges de déformation

(En bas de la nouvelle couche) :

2 longitudinales

2 transversales



(b) Structure et instrumentation

S1a et S1b : 5 cm de BBM

S2a, S2b et S2c : 6 cm de BBSG

FIGURE 1. Disposition des sections d'essai et vue en coupe de leur instrumentation (BBSG : béton bitumineux semi grenu, GB : grave-bitume, GNT : grave non-traitée).

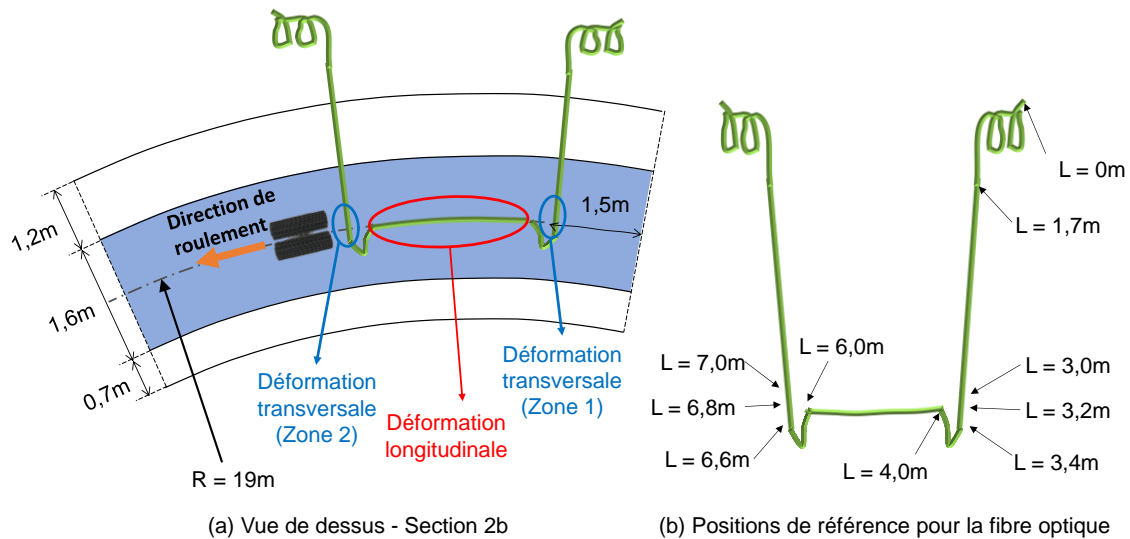


FIGURE 2. Disposition des capteurs à fibres optiques continues dans les couches de BBSG et GB dans la Section 2b (L : longueur).

B. Configuration d'essai

L'essai a consisté à mesurer les déformations produites par le passage des charges du manège de fatigue sur les fibres optiques et les capteurs installés sur chacune des sections. Les mesures présentées dans cet article ont été réalisées pour les conditions suivantes :

- Après l'application de 40 000 cycles de chargement.
- Vitesse de chargement : 1 tour/min (7,2 km/h).
- Charges : demi-essieux à roues jumelées, chargés à 55 kN.
- 4 répétitions des mesures.
- Températures d'essai (mesurées par le thermocouple à la base de la couche de roulement) : entre 10,9°C et 12,5°C.
- Configuration du système d'acquisition de l'interrogateur optique : fréquence de mesure 100 Hz, longueur de jauge (longueur de fibre optique permettant d'obtenir un point de mesure) 5,2 mm et espacement entre les jauges (pas d'échantillonnage) 2,6 mm

III. RESULTATS

A. Déformations transversales

Les résultats présentés ici concernent uniquement la section 2b, et visent principalement à illustrer les différentes mesures qui peuvent être obtenues, pour les déformations longitudinales et transversales et à deux niveaux différents dans la structure (compte tenu de la disposition des fibres, décrite dans la section précédente).

La FIGURE 3 (a et b) montre les valeurs de déformations transversales obtenues lors des premières mesures sur la Section 2b, pour chaque position spatiale de la fibre, sur la zone 1 (entre 3,0 m et 3,4 m) et sur la zone 2 (entre 6,6 m et 7,0m), en bas du BBSG et en haut de la GB. Chaque figure représente en 3D l'ensemble des signaux temporels obtenus sur chaque zone, avec un pas

d'échantillonnage de 2,6 mm. La FIGURE 3 (c.1 et c.2) présente les signaux correspondant aux valeurs maximales de déformations obtenues sur chaque zone. L'analyse des résultats indique que :

- Tout d'abord, on peut voir que la fibre optique, grâce aux mesures réparties, permet de déterminer avec une bonne résolution la distribution des déformations transversales dans toute la zone circulée par la roue du manège. Les mesures obtenues sont beaucoup plus détaillées que celles obtenues avec une jauge classique de déformation, qui permet de mesurer seulement la déformation en un point.
- Dans la zone 1, la fibre optique placée en bas du BBSG donne des valeurs de déformations positives (en extension), alors que la fibre placée en haut de la GB donne des déformations négatives (en contraction). Cela signifie que dans cette zone, il n'y a pas de continuité des déformations transversales entre le BBSG et la GB. Ce changement de comportement indique un décollement (partiel ou total) de l'interface entre les deux couches dans cette zone. Ce décollement est observé malgré l'application d'une couche d'accrochage sur la section 2b
- Dans la zone 2, les valeurs de déformations en bas du BBSG et en haut de la GB sont toutes positives (en contraction), mais les déformations sont plus élevées à la base du BBSG. Cela indique donc également un transfert partiel des déformations entre les deux couches, donc possiblement un certain glissement à l'interface entre les deux couches.
- Par contre, la figure 3 c1 et c2 indique une très bonne répétabilité des mesures de déformations pour toutes les fibres optiques. Pour les déformations maximales, les écarts types obtenus pour les 4 répétitions des mesures sont de 3,7 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la zone 1 et 4,48 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la zone 2.

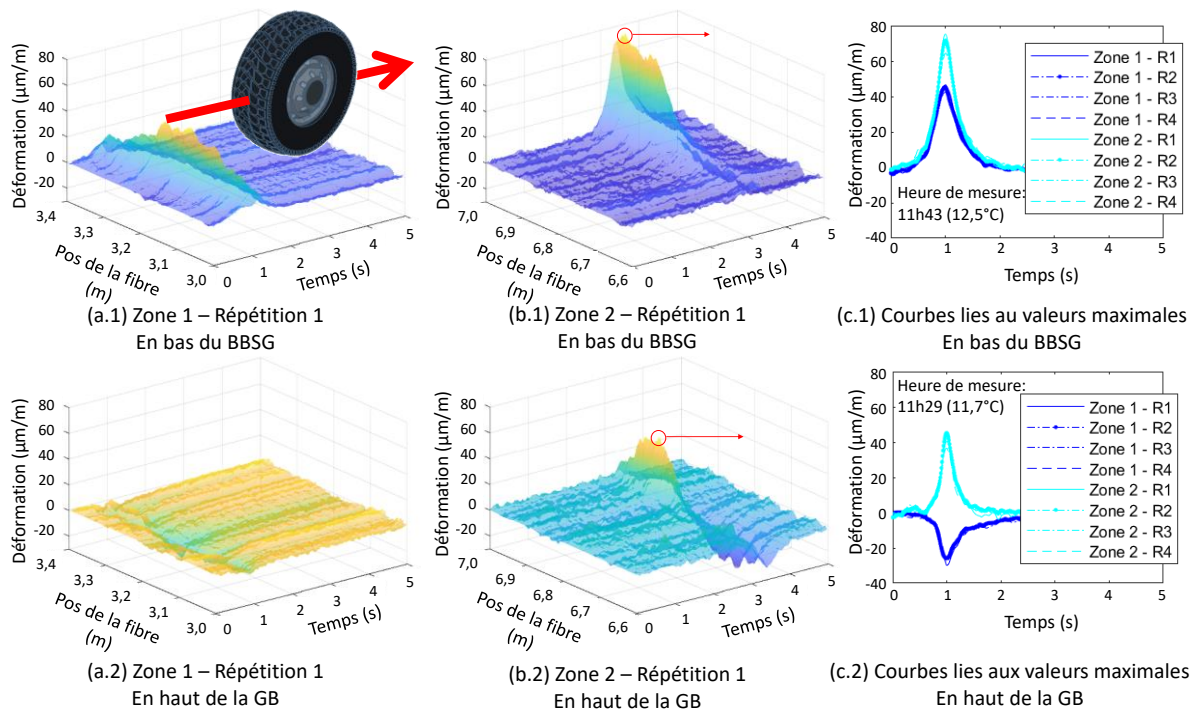


FIGURE 3. Déformations transversales mesurées sur la section 2b (R : répétition)

La FIGURE 4 montre que la répartition transversale des déformations à la base du BBSG est sensible à la répartition des pressions sous le pneumatique. Cette figure a été obtenue par la comparaison des projections orthogonales de la répartition transversale des déformations de la FIGURE 3a. Les zones où les déformations sont les plus élevées (au-dessus de 40 $\mu\text{m}/\text{m}$ et 42 $\mu\text{m}/\text{m}$) correspondent à la forme des sculptures du pneumatique utilisé pour les essais. La répartition transversale des déformations permet également de définir la position exacte de la jauge de déformation transversale placée dans le BBSG, par rapport à la zone de mesure de la fibre optique. La FIGURE 5a et b présente les signaux de déformations de la fibre correspondant à la position de la jauge de déformation, ainsi que quatre signaux situés dans un intervalle de $\pm 5\text{cm}$ par rapport à cette position. Ces signaux permettent de comparer la mesure de la jauge (d'une longueur de 10 cm) avec les signaux de la fibre optique. La FIGURE 5c montre les signaux de déformation des jauges T1 et T2 placées sur la Section 2b. Finalement, la FIGURE 5d compare les valeurs maximales de déformations transversales obtenues avec les différentes méthodes (fibres et jauges) pour les différentes répétitions, et en prenant en compte les mesures de la fibre situées à $\pm 5\text{cm}$ autour de la position de la jauge. Ces différents résultats montrent que :

- La longueur (ou la durée) des signaux de déformation est plus importante pour les mesures réalisées avec la fibre optique, et ces signaux ne présentent pas de valeurs en contraction, à la différence des signaux des jauges. Cette différence est peut-être due à la longueur de la jauge (10 cm), qui a pour effet de donner une mesure moyenne sur une certaine largeur, alors que les mesures de la fibre optique sont beaucoup plus locales.
- Par contre, la comparaison des intervalles de variation des valeurs maximales pour les positions proches de la jauge (à $\pm 5\text{ cm}$) et pour les 4 répétitions de mesure montre des valeurs similaires (avec quelques valeurs aberrantes pour la limite supérieure pour la zone 1). La comparaison statistique des valeurs moyennes permet de conclure que les mesures obtenues avec la fibre optique pour les deux zones sont statistiquement identiques aux mesures obtenues avec la jauge de déformation, pour un niveau de confiance de 95 %.

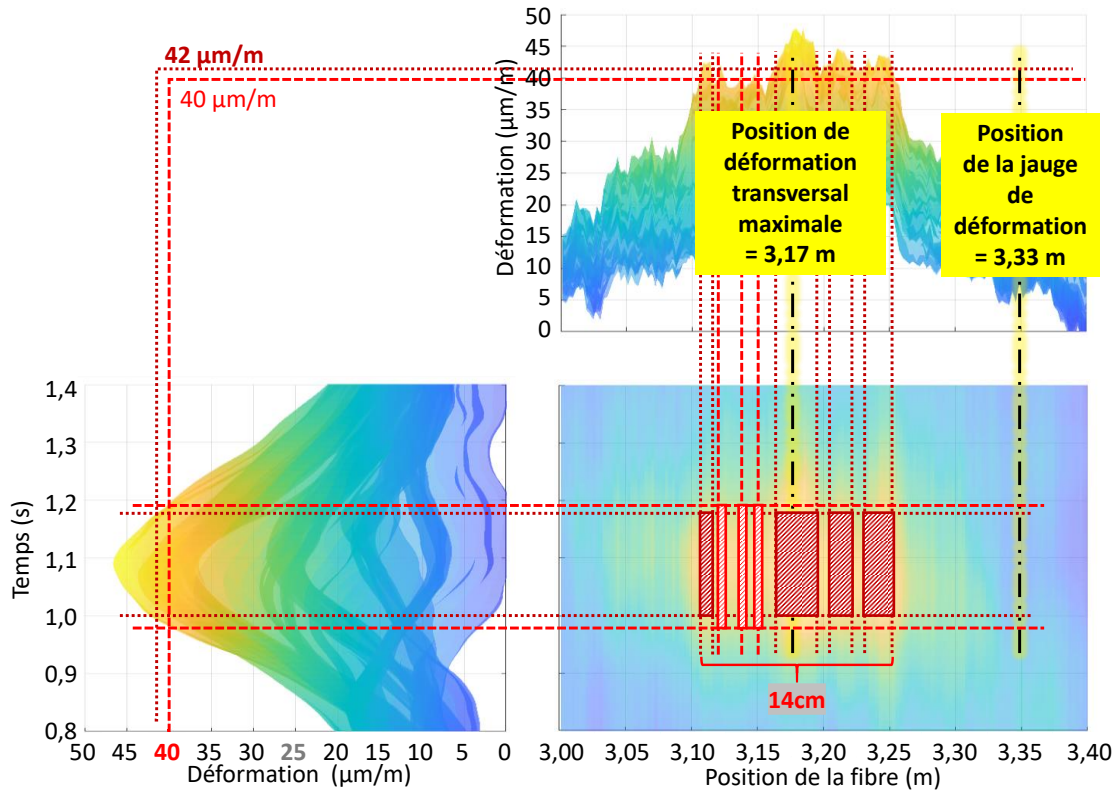


FIGURE 4. Projections orthogonales de la répartition des déformations transversales en bas du BBSG sur la S2b Zone 1 – Répétition 1.

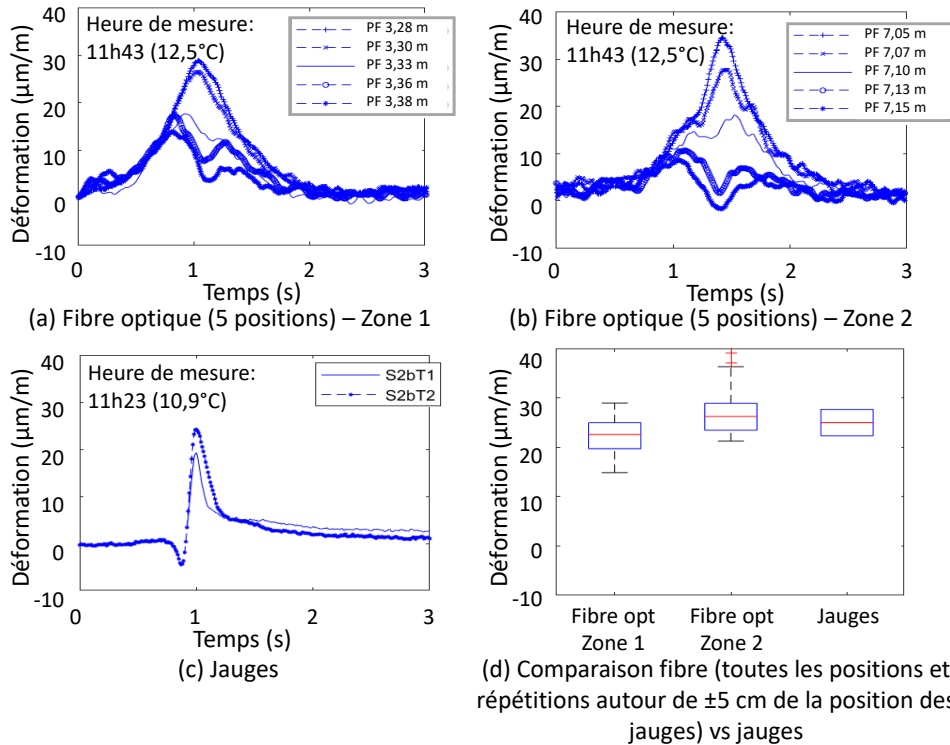


FIGURE 5. Signaux de déformations transversales Section 2b – Répétition 1, en bas du BBSG

B. Déformations longitudinales

La FIGURE 6a présente la distribution des valeurs maximales de déformations longitudinales mesurées par les deux fibres optiques (placées en bas du BBSG et en haut de la GB), avec un pas d'échantillonnage de 2,6 mm. La FIGURE 6b montre les intervalles de variation des valeurs maximales. Ces figures mettent en évidence que :

- Comme pour les déformations transversales, les déformations longitudinales en bas du BBSG présentent des valeurs plus élevées (50% des valeurs sont comprises entre 45 $\mu\text{m/m}$ et 82 $\mu\text{m/m}$) que les déformations en haut de l'ancienne GB (50% des valeurs sont comprises entre 10 $\mu\text{m/m}$ et 38 $\mu\text{m/m}$). A nouveau, il y a donc une discontinuité entre les déformations longitudinales à la base de la couche de BBSG et celles en haut de la GB. Cela semble à nouveau indiquer une perte partielle d'accrochage entre les deux couches.
- Les distributions des valeurs maximales sont asymétriques, avec un plus grand nombre de valeurs faibles, et quelques pics de déformations avec des valeurs élevées. L'écart type des valeurs est élevé pour les deux couches ($\sigma = 29 \mu\text{m/m}$ en bas du BBSG ; $\sigma = 16 \mu\text{m/m}$ en haut de la GB). Cette variabilité peut être due à plusieurs facteurs : le caractère hétérogène des enrobés bitumineux constitués de granulats et de liant, les variations d'épaisseur des couches, une plus ou moins bonne adhérence entre la fibre et les enrobés bitumineux, mais aussi l'endommagement initial de l'ancienne couche de GB (qui a déjà subi le trafic lors d'un essai précédent) ainsi que la géométrie de la fibre, qui n'est pas parfaitement rectiligne, car elle doit suivre le contour des granulats de l'enrobé.
- Toutefois, les profils de déformations obtenus pour les 4 répétitions des mesures donnent des valeurs très proches, ce qui indique une très bonne répétabilité des mesures des fibres optiques. La dispersion des mesures semble donc plus liée au caractère hétérogène des enrobés bitumineux, et à leur endommagement initial qu'aux caractéristiques de la fibre elle-même.

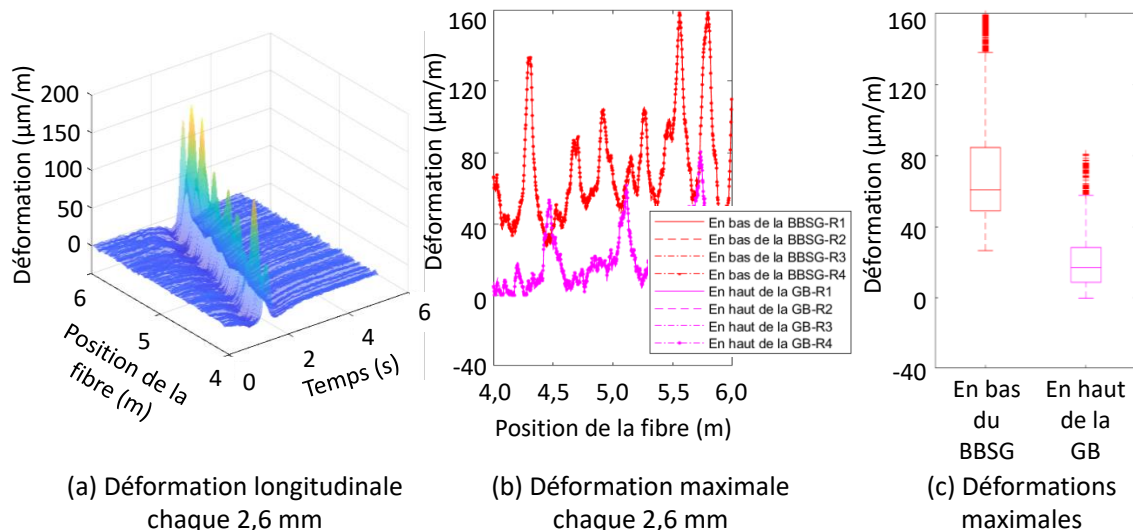


FIGURE 6. Déformations longitudinales sur la section 2b (R : répétition)

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article présente des premiers résultats de mesures réparties de déformations sous charges roulantes au moyen de fibres optiques, réalisées sur le manège de fatigue de l'Université Gustave Eiffel. L'étude permet de conclure que :

- La méthode de mesure par capteurs à fibres optiques continus (basée sur la technologie OFDR-Rayleigh) conduit à des résultats prometteurs dans les structures de chaussées : Les signaux de mesure obtenus présentent une très bonne résolution, un faible bruit et une très bonne répétabilité.
- Les mesures réparties, avec un pas d'échantillonnage de seulement 2,6 mm permettent de caractériser de manière détaillée les champs de déformations produits par les charges des pneumatiques, et ainsi de mieux caractériser les sollicitations dans les couches de roulement, et de mieux comprendre leurs modes d'endommagement.
- Des différences importantes ont été obtenues entre les déformations à la base de la nouvelle couche de BBSG et la partie supérieure de l'ancienne couche de GB, ce qui a permis de mettre en évidence que ces couches ne sont pas parfaitement collées, même sur la section avec une couche d'accrochage.
- Les fibres optiques ont également mis en évidence une grande variabilité des déformations longitudinales suivant le profil en long de la chaussée. Ces variations peuvent être dues à plusieurs facteurs : les variations d'épaisseur des couches de chaussée, les variations d'adhérence entre couches, l'endommagement de l'ancienne couche de GB et l'hétérogénéité des matériaux bitumineux. Afin de mieux comprendre le fonctionnement des fibres optiques dans les couches bitumineuses, et l'origine de ces variations, il est prévu, dans les perspectives de ce travail, de réaliser des essais en laboratoire, sur éprouvettes instrumentées par fibres optiques, sous des niveaux de déformations imposés, monotones ou cycliques, pour différents types de matériaux, et conditions de mise en place. Ces essais en conditions contrôlées permettront de mieux évaluer la précision des mesures et les facteurs qui les influencent.
- En conclusion, ces résultats montrent le fort potentiel des capteurs à fibres optiques continus pour la mesure des déformations dans les couches de chaussées, en comparaison avec les méthodes de mesures classiques par jauges.

V. REMERCIEMENTS

La chaussée expérimentale de ce projet a été financée dans le cadre du projet de recherche ANR-19-CE22-0001-02 BINARY : Pour une meilleure prise en compte de l'agressivité des chargements. Ce projet est mené aussi dans le cadre du programme de recherche public-privé « France Relance » lancé par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) et le plan NextGenerationEU de l'Union Européenne.

REFERENCES

- Braunfelds, J., Senkans, U., Skels, P., Janeliukstis, R., Salgals, T., Redka, D., Lyashuk, I., Porins, J., Spolitis, S., Haritonovs, V., & Bobrovs, V. (2021). FBG-Based Sensing for Structural Health Monitoring of Road Infrastructure. *Journal of Sensors*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8850368>
- Chapeleau, X., & Bassil, A. (2021). A general solution to determine strain profile in the core of distributed fiber optic sensors under any arbitrary strain fields. *Sensors*, 21(16). <https://doi.org/10.3390/s21165423>
- Hubbard, P. G., Ou, R., Xu, T., Luo, L., Nonaka, H., Karrenbach, M., & Soga, K. (2022). Road deformation monitoring and event detection using asphalt-embedded distributed acoustic sensing (DAS). *Structural Control and Health Monitoring*, 29(11). <https://doi.org/10.1002/stc.3067>
- Liu, Y., Xie, J., Liu, S., Zhao, Y., Zhu, Y., & Qi, G. (2022). Research on the methodology of development and calibration of flexible encapsulated fiber Bragg grating sensors. *Measurement*, 201, 111730. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.111730>
- Mustafa, S., Sekiya, H., Morichika, S., Maeda, I., Takaba, S., & Hamajima, A. (2022). Monitoring internal strains in asphalt pavements under static loads using embedded distributed optical fibers. *Optical Fiber Technology*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102829>
- Sourisseau, Q., Lepretre, E., Chataigner, S., Chapeleau, X., Mouton, L., & Paboef, S. (2022a). Use of Distributed Optical Fibre to Monitor the Crack Propagation of an Adhesively Bonded Joint During an ENF Test. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 198 LNCE. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88166-5_21
- Sourisseau, Q., Lepretre, E., Chataigner, S., Chapeleau, X., Mouton, L., & Paboef, S. (2022b). Use of high spatial resolution distributed optical fiber to monitor the crack propagation of an adhesively bonded joint during ENF and DCB tests. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103124>
- Wijaya, H., Rajeev, P., & Gad, E. (2021). Distributed optical fibre sensor for infrastructure monitoring: Field applications. *Optical Fiber Technology*, 64, 102577. <https://doi.org/10.1016/J.YOFTE.2021.102577>