

Analyses expérimentales et numériques du comportement des couches de surface des chaussées bitumineuses sous trafic

Marina AlBacha, Pierre Horny, Mai-Lan Nguyen, Olivier Chupin, Juliette Blanc

MAST-LAMES, Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes, F-44344, Bouguenais, France

RESUME

La majorité des études de comportement des chaussées bitumineuses se concentre sur les couches de base, en raison de leur contribution majeure à la résistance à la fatigue. Cependant, peu de travaux se sont intéressés au comportement des couches de surface. Cette étude évalue la réponse des couches de surface avec le trafic, sous différentes conditions de température et différentes configurations d'essieux, en utilisant des approches expérimentales et numériques. Une structure de chaussée en vraie grandeur a été testée. Des jauges de déformation ainsi que des fibres optiques placées à différentes profondeurs, sont utilisées pour analyser les déformations. Les résultats montrent des variations significatives des déformations avec le trafic et la température, notamment à la base de la couche de surface. À haute température, un décollement partiel de l'interface entre la couche de surface et la couche de base a été observé sous l'effet des charges. Ce phénomène a entraîné des déformations en extension à la base de la couche de surface. Les simulations numériques réalisées avec le logiciel Viscoroute©2.0 permettent de prédire les déformations mesurées, en tenant compte d'une interface partiellement décollée, ainsi que l'effet des charges dues aux essieux simples et tridem. L'ensemble de l'étude a permis de mieux comprendre le fonctionnement des couches de surface, sous différentes conditions de sollicitations.

Mots-clés couches de surface, structure en vraie grandeur, collage des interfaces, modélisation des chaussées, essai de fatigue accéléré.

I. INTRODUCTION

L'intégrité et la fonctionnalité des chaussées routières sont essentielles pour garantir des réseaux de transport sûrs et efficaces. Bien que de nombreuses études aient analysé le comportement des couches de base, en raison de leur rôle prépondérant dans la résistance à la fatigue, le comportement des couches de surface reste moins étudié, malgré leur importance pour la durabilité des chaussées. Ces couches de surface sont directement exposées aux charges du trafic et aux conditions climatiques, ce qui influence considérablement le comportement à long terme de la chaussée routière. Les températures élevées jouent un rôle déterminant dans l'augmentation des déformations dans les couches de surface (Bai et al., 2021). Elles favorisent l'apparition des déformations en extension, soit près de la surface sous l'effet des charges (Wang et al., 2003), soit à la base de la couche de surface dans le cas d'un mauvais collage entre les couches (Grellet et al., 2018). Les conditions de collage entre les couches constituent alors un autre facteur important

influençant le comportement des couches de surface. Bien que la méthode de dimensionnement française suppose un collage parfait, en réalité, les interfaces peuvent être décollées ou partiellement décollées. Ceci entraîne une augmentation des déformations dans la couche de surface (Chupin et al., 2010), (Ozer et al., 2012). Ce phénomène est plus prononcé à des températures élevées (Grellet et al., 2018) et peut provoquer des déformations en extension, favorisant ainsi l'apparition de fissures de fatigue dans la couche de surface et réduisant la durée de vie de la chaussée (Yao et al., 2024).

Dans ce contexte, cet article vise à évaluer le comportement des couches de surface des chaussées bitumineuses, sous différentes conditions de température, et configurations d'essieux. Une campagne expérimentale a été réalisée sur une structure de chaussée en vraie grandeur, testée sur le manège de fatigue de l'Université Gustave Eiffel, à Nantes, dans le cadre du projet européen NEMO (Noise and Emissions Monitoring and Radical Mitigation, 2023). La structure de chaussée a été construite spécifiquement pour le projet, en novembre 2022 et l'expérimentation s'est terminée en septembre 2023. La chaussée a été soumise à des charges réalistes de véhicules lourds ainsi qu'aux conditions de température ambiante pendant la durée de l'expérimentation. La structure, instrumentée avec des jauges et des capteurs à fibres optiques, a permis de mesurer les déformations dans les couches de surface et de base. L'essai comprend deux phases de chargement : la 1^{ère}, jusqu'à 500 000 cycles, et la seconde de 500 000 à 1 000 000 de cycles. Un essieu tridem a été mis en place à 500 000 cycles. Les résultats expérimentaux sont comparés à des simulations numériques réalisées avec le logiciel Viscoroute©2.0 (Chabot et al., 2010), pour prédire les déformations et analyser l'impact des conditions d'interface, des températures et des différentes configurations d'essieux.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL DE L'ESSAI EN VRAIE GRANDEUR

La structure de chaussée en vraie grandeur correspond à une structure de chaussée urbaine, de 35 m de long. Le reste de la piste d'essai était constitué de trois autres structures, non présentées dans cet article dont la longueur est limitée. Deux configurations d'essieux ont été appliquées sur la piste d'essai, comme montré dans la figure 1. Les bras 1, 2 et 4 du manège de fatigue portaient un essieu simple équipé de roues jumelées avec une charge totale de 65 kN (32,5 kN par roue). Chaque roue avait une surface de contact rectangulaire de 0,2 m x 0,25 m et une pression de contact verticale de 650 kPa. Le bras 3 était équipé d'un essieu tridem chargé à 135 kN (45 kN par roue), équipé de trois roues larges avec une surface de contact rectangulaire de 0,2 m x 0,3 m et une pression de contact verticale de 750 kPa. Cette configuration reproduit un cas typique d'essieu tridem d'un camion semi-remorque, chargé à sa capacité maximale de 44 tonnes. Les configurations des essieux ont été conçues avec des dimensions standard : un espacement de 0,35 m entre les roues de l'essieu simple dans la direction transversale, et un espacement de 1,4 m entre les roues de l'essieu tridem dans la direction longitudinale. La structure de chaussée a été soumise à 1 000 000 cycles de chargement. L'essieu tridem a été installé à partir de 500 000 cycles et est resté en place jusqu'à la fin de l'essai. La position centrale des roues sur le manège de fatigue correspond à un rayon de 19,5 m.

La figure 2 présente la structure testée avec son instrumentation. La structure est constituée d'une couche de surface en béton bitumineux (BBSG 0/10) de 5 cm d'épaisseur, une couche de base en grave Bitume (GB 0/14) de 10 cm d'épaisseur, reposant sur une couche de fondation granulaire de 30 cm d'épaisseur et du sol support. Lors de la construction, une couche d'accrochage constituée d'une émulsion de bitume a été appliquée entre les couches bitumineuses. Les capteurs de mesures des déformations ont été placés à trois niveaux : en bas de la couche de surface, en haut et en bas de la couche de base. Des sondes de température ont été utilisées pour mesurer la température. Chaque niveau d'instrumentation comprenait : 4 jauges de déformation (2 longitudinales et 2 transversales) et une fibre optique de 10 m de longueur. Dans cet article, l'analyse se concentrera sur les mesures effectuées par les jauges aux trois niveaux de la structure de chaussée.

Les jauges de déformation sont classiquement utilisées dans les essais en vraie grandeur, pour le suivi des déformations dans les couches de surface des chaussées ((Gokhale et al., 2009), (Wang et al., 2020)). Les jauges employées dans cette expérimentation sont des jauges KM-100HAS de la marque japonaise TML, d'une longueur de 100 mm. Ces jauges sont spécialement conçues pour les mesures dans les enrobés, et ont une très bonne résistance aux températures élevées et aux contraintes auxquelles elles sont exposées lors de la construction des chaussées. Des essais en vraie grandeur réalisés à l'Université Gustave Eiffel (Blanc et al, 2016), ont montré qu'elles présentaient les meilleures performances, parmi les différents types de jauges testés, en particulier en raison de leur faible module de raideur apparent (40 MPa). Leur précision de mesure est d'environ 10 %. Une mise en place soignée et un positionnement précis des capteurs sont néanmoins essentiels pour garantir une bonne précision de mesure.

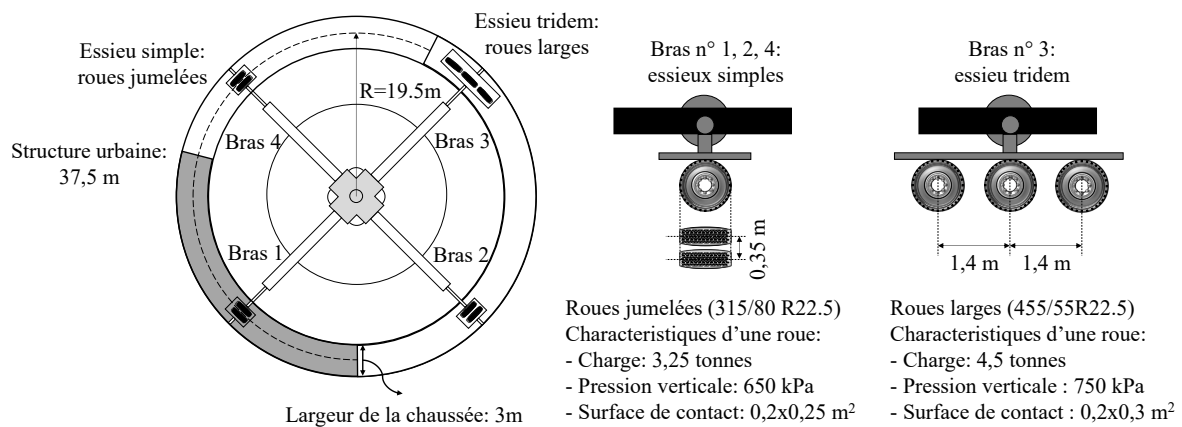


FIGURE 1. Configuration des essieux installés sur le manège de fatigue

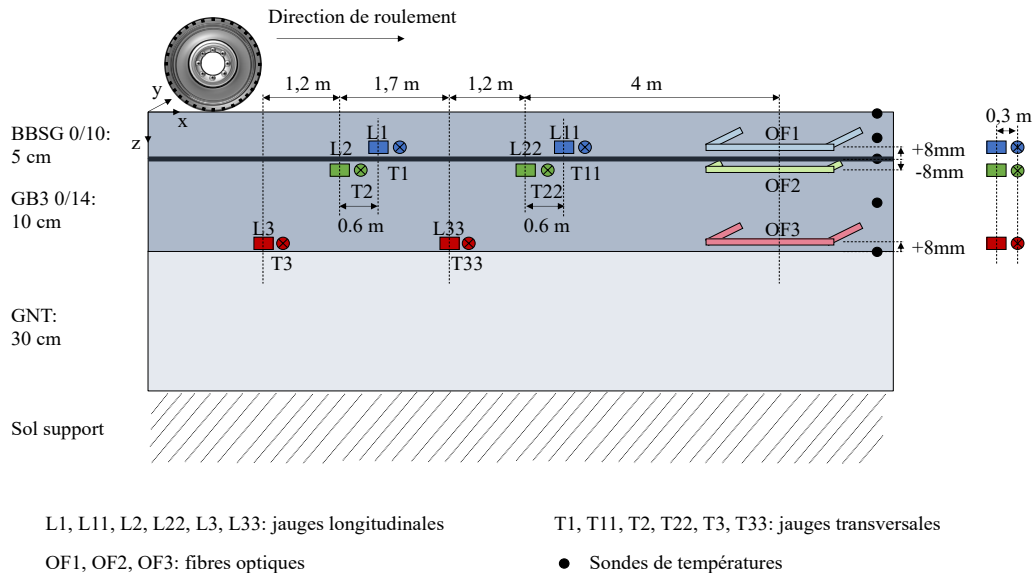


FIGURE 2. Structure de chaussée et instrumentation

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX

A. Evolution des déformations durant la 1^{ère} phase de chargement

La figure 3 présente l'évolution des mesures des déformations longitudinales aux trois niveaux de la chaussée. Les déformations ont été mesurées à l'aide de jauges pendant la 1^{ère} phase de chargement, sous différentes conditions de température. La figure montre qu'à la base de la couche de surface, les déformations sont en compression et augmentent légèrement de 60 000 à 300 000 cycles, lorsque les températures dans la couche de surface sont modérées (entre 15 et 21°C). Après le passage de 500 000 cycles, avec une température dans la couche de surface autour de 26°C, les déformations présentent des pics de déformation en compression plus élevés (-124 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la jauge L1 et -72 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la jauge L11). Après le passage de 510 000 cycles, avec la température augmentant à 39 °C, les deux jauges présentent des signaux très différents : pour la jauge L1, le pic de compression atteint -409 $\mu\text{m}/\text{m}$. La jauge L11 présente un changement de forme du signal avec l'apparition d'un pic en extension de +65 $\mu\text{m}/\text{m}$, qui peut indiquer un début de glissement à l'interface. La figure montre clairement qu'en début d'essai, la structure s'est comportée comme une chaussée neuve, avec des interfaces collées, mais qu'après la période de température élevée, les déformations mesurées dans la couche de surface et les conditions de collage se sont modifiées. Au sommet de la couche de base, les déformations sont en compression et ont des valeurs similaires aux déformations mesurées au bas de la couche de surface, sauf pour N=510 000 et T=39°C, où les déformations au-dessus et au-dessous de l'interface deviennent différentes, ce qui confirme également une perte de collage à l'interface. Au bas de la couche de base, les déformations sont en extension, ce qui correspond à la réponse attendue de la chaussée, et atteignent une valeur maximale de +165 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour N=510 000 et T=33°C.

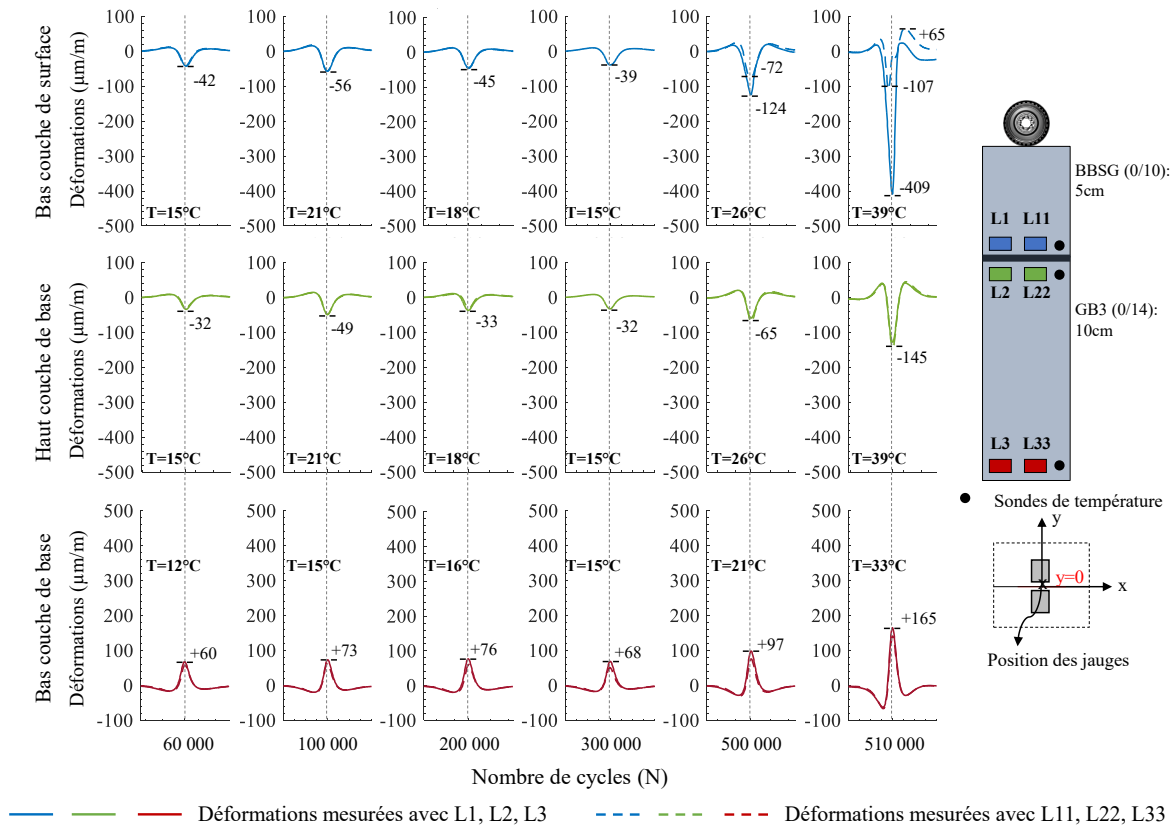


FIGURE 3. Mesures des jauges de déformation dans la direction longitudinale à 3 niveaux, pendant la 1^{ère} phase de chargement, à une vitesse $v = 57$ km/h.

B. Evolution des déformations durant la 2^{ème} phase de chargement

La figure 4 montre les mesures des déformations avec les jauges pendant la 2^{ème} phase de chargement. Les résultats indiquent que la forme du signal à la base de la couche de surface change significativement par rapport à la 1^{ère} phase de chargement, avec le développement de déformations en extension à ce niveau. Au sommet de la couche de base, les déformations restent en compression. Ceci confirme un décollement de l'interface, après la période de températures chaudes (jusqu'à 39°C dans la couche de surface) observée à 510 000 cycles. Les déformations en bas de la couche de surface restent en extension jusqu'à la fin de l'essai, avec un pic variant entre +25 et +63 $\mu\text{m/m}$ en fonction des températures, variant entre 20 et 28°C. Ces déformations augmentent avec la température, atteignant +198 $\mu\text{m/m}$ à 43°C, et ce comportement reste irréversible même après la baisse de la température. En bas de la couche de base, les déformations restent en extension, comme prévu, et présentent un comportement réversible, diminuant lorsque la température baisse. Ce comportement semble peu influencé par le comportement de la couche de surface et les conditions de collage à l'interface.

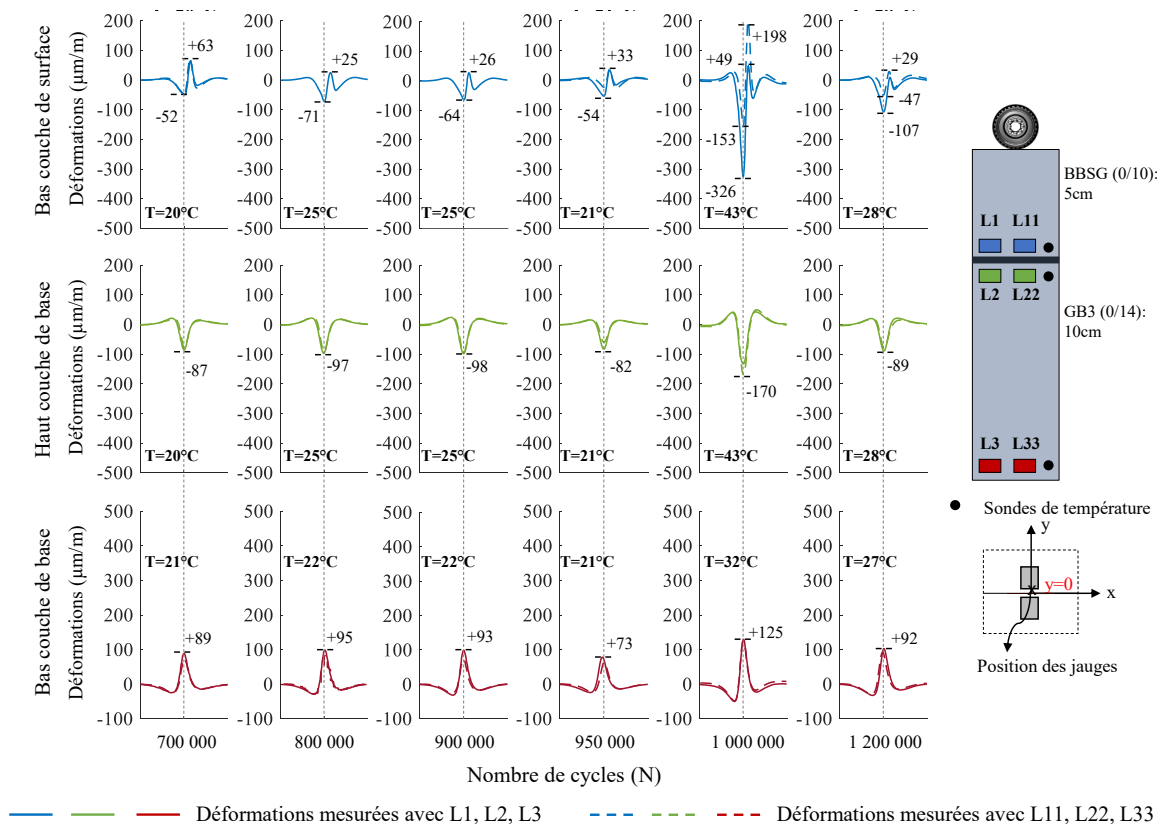


FIGURE 4. Mesures des jauges de déformation dans la direction longitudinale à 3 niveaux, pendant la 2^{ème} phase de chargement, à une vitesse $v = 57$ km/h.

III. CALCUL DES DEFORMATIONS AVEC UN MODELE VISCOELASTIQUE

Afin d'analyser les mesures des déformations dans la structure de chaussée, sous différentes conditions de chargement, la réponse a été modélisée à l'aide du logiciel Viscoroute©2.0 (Chabot et al., 2010). Viscoroute©2.0 repose sur une modélisation semi-analytique de la structure de chaussée, sous charge roulante, et prend en compte le comportement thermo-viscoélastique des matériaux bitumineux. Les paramètres d'entrée incluent les charges appliquées, la vitesse de circulation, les épaisseurs de couche, les températures dans les couches, ainsi que les lois de comportement des matériaux et des interfaces. Les charges des roues sont considérées uniformément réparties sur des surfaces de contact rectangulaires (voir figure 1), se déplaçant à une vitesse de 57 km/h. Le sol et la fondation granulaire sont modélisés en tant que matériaux élastiques avec des modules élastiques de l'ordre de 160 et 125 MPa respectivement. Les couches bitumineuses ont été considérées comme viscoélastiques et décrites par le modèle de Huet-Sayegh (Huet, 1965), (Sayegh, 1965) dont les paramètres, issus d'essais de module complexe en laboratoire, sont présentées dans le tableau 1. Concernant la modélisation de l'interface, plusieurs modèles d'interface ont été considérés (interface collée, décollée, et représentée par une couche mince de faible module), afin d'essayer de simuler le phénomène de décollement observé à l'interface. Les déformations calculées ont ensuite été comparées à trois séries de mesures expérimentales, réalisées à différentes températures, au cours des deux phases de chargement.

TABLEAU 1. Propriétés des matériaux viscoélastiques

Paramètres du modèle de Huet-Sayegh								
Paramètres	δ	k	h	E_{∞} (MPa)	A_0	A_1	A_2	E_0 (MPa)
BBSG	2.3	0.2	0.7	28272	2.8	-0.4	1.5×10^{-3}	24
GB3	1.9	0.2	0.6	27364	4.4	-0.4	1.8×10^{-3}	0

A. Calcul des déformations durant la 1^{ère} phase de chargement

La figure 5 présente les déformations calculées dans la structure de la chaussée et comparées à celles mesurées avec les jauges pendant la 1^{ère} phase de chargement. Pour des températures allant jusqu'à 26°C, les déformations sont bien prédites avec une interface collée, pour les trois niveaux de mesure. À une température plus élevée (à T=39°C dans la couche de surface et à N = 510 000 cycles), les deux jauges (L1 et L11) situées à la base de la couche de surface présentent des réponses différentes. La jauge L1 montre des déformations en compression, ce qui correspond aux calculs avec une interface collée. Par contre, la jauge L11 présente un signal de déformation différent, avec une diminution des déformations de compression, ce qui est probablement dû à un changement des conditions de collage de l'interface à la position de cette jauge.

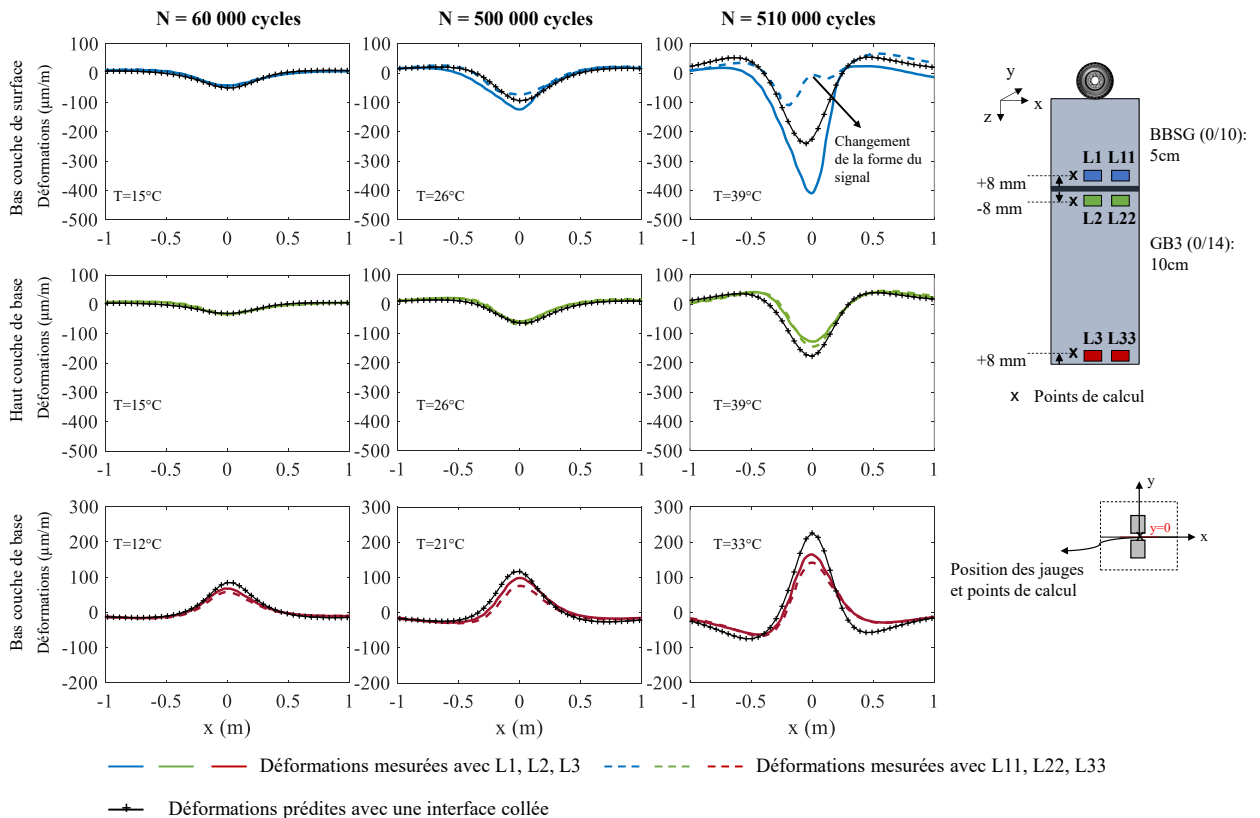


FIGURE 5. Déformations longitudinales mesurées et calculées à 3 niveaux, pendant la 1^{ère} phase de chargement sous le passage de l'essieu simple (6,5 tonnes), vitesse v = 57km/h.

B. Calcul des déformations durant la 2^{ème} phase de chargement

Durant la 2^{ème} phase de chargement, on a étudié et modélisé la réponse de la chaussée sous les essieux simples et tridem. Après le passage de 700 000 cycles (voir figure 6), pour une température de 20°C, les déformations longitudinales en bas de la couche de surface sont en

extension, avec une valeur de déformation maximale d'environ +50 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour l'essieu simple et +100 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour l'essieu tridem. Cela confirme qu'un glissement partiel se produit à l'interface, et également que l'essieu tridem génère des déformations plus grandes dans la couche de surface, et donc qu'il est plus agressif vis-à-vis de la couche de surface que l'essieu simple. Pour modéliser ce glissement partiel, il a été décidé de modéliser l'interface comme une couche fine élastique avec un module d'élasticité faible. Pour cette interface, une épaisseur de 1 mm a été fixée et le module d'élasticité a été ajusté pour correspondre aux mesures de déformation. Cet ajustement a conduit à un module d'interface de 5 MPa. Avec cette hypothèse, une bonne prévision des déformations aux différents niveaux de mesure a pu être obtenue, pour l'essieu simple comme pour le tridem (figure 6).

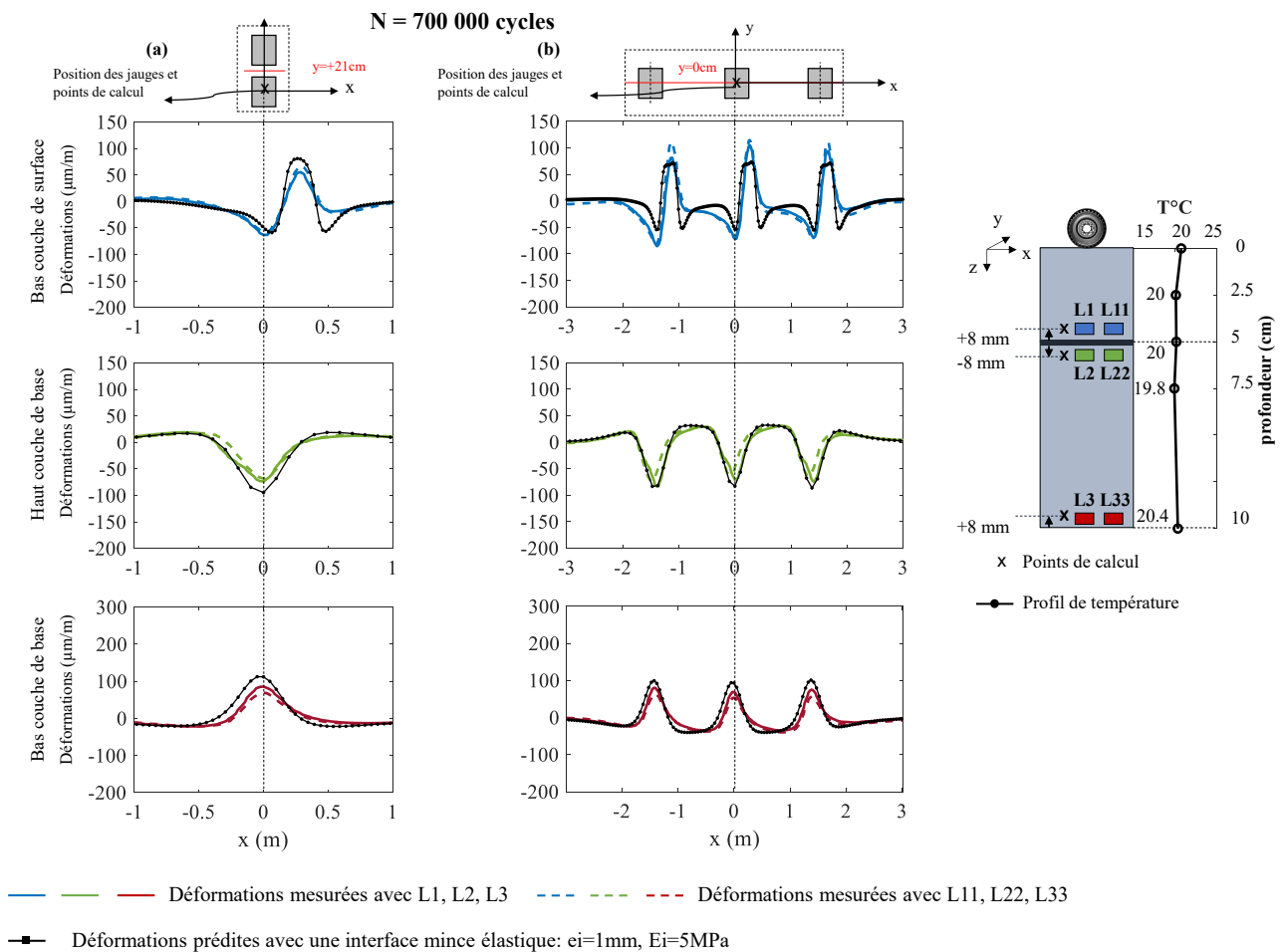


FIGURE 6. Déformations longitudinales mesurées et calculées à 3 niveaux, pendant la 2ème phase de chargement sous le passage de l'essieu simple (6,5 tonnes) (a) et essieu tridem (13.5 tonnes) (b), vitesse $v = 57\text{km}/\text{h}$.

IV. CONCLUSIONS

Cette étude présente les résultats d'un essai en vraie grandeur réalisé sur une structure de chaussée bitumineuse. L'objectif était d'analyser et de modéliser le comportement de la couche de

roulement, sous différentes conditions de trafic et de température. Pour cela, des mesures de déformations ont été réalisées à 3 niveaux dans la structure : de part et d'autre de l'interface entre la couche de roulement et la couche de base, et à la base de la couche de base. Cela a permis de mieux comprendre, et de modéliser l'évolution du comportement de la couche de base sous les charges du trafic. :

- Au cours de de la 1^{ère} phase de chargement, jusqu'à 500 000 cycles, un comportement classique de chaussée neuve, avec un bon collage des couches a été observé à des températures modérées.
- Autour de 510 000 cycles, pendant une période de températures élevées (39 °C dans la couche de surface), une forte augmentation des déformations au bas de la couche de surface a été observée, ainsi que l'apparition de déformations en extension sur l'un des signaux des jauges. Ce phénomène s'explique par une perte de collage à l'interface entre les couches de surface et de base ; il a mis en évidence la grande sensibilité à la température de la couche d'accrochage, qui assure le collage.
- Durant la seconde phase de chargement (jusqu'à 1 000 000 cycles, un changement significatif de la forme des signaux de déformations s'est produit en bas de la couche de surface, où les déformations sont passées de la compression à l'extension. Ce comportement irréversible a persisté malgré les baisses de température, ce qui indique une perte de collage à l'interface.
- Durant cette 2^{ème} phase, des chargements ont également été réalisés avec l'essieu tridem. Ils ont montré une augmentation significative des déformations dans la couche de roulement, par rapport à l'essieu simple à roues jumelées, et donc une agressivité plus grande du tridem vis-à-vis de la couche de surface. L'impact sur les déformations dans la couche de base s'est par contre révélé beaucoup plus limité.
- Finalement, la réponse de la chaussée a été modélisée à l'aide du logiciel Viscoroute©2.0. Le modèle viscoélastique linéaire de Huet-Sayegh a été utilisé pour modéliser les couches bitumineuses, et un modèle élastique linéaire a été employé pour la fondation granulaire et le sol support. L'ensemble des mesures ont pu être modélisées de façon satisfaisante, avec des paramètres matériaux déterminés en laboratoire, pour la 1^{ère} phase d'essai (avec une interface collée) et pour la seconde phase, (avec une interface simulée par une couche mince de faible module),

REFERENCES

- Bai, T., Cheng, Z., Hu, X., Fuentes, L., Walubita, L.F., 2021. Viscoelastic modelling of an asphalt pavement based on actual tire-pavement contact pressure. *Road Materials and Pavement Design* 22, 2458–2477. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1766545>
- Blanc J., Trichet S., Gouy T., Coirier C., Nguyen M.L., Baudru Y. 2016. Instrumentation de chaussées. Les jauges de déformations horizontales, *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, n°940, pp 44-49, Octobre 2016.
- Chabot, A., Chupin, O., Deloffre, L., Duhamel, D., 2010. ViscoRoute 2.0 A Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement. *Road Materials and Pavement Design* 11, 227–250. <https://doi.org/10.3166/rmpd.11.227-250>

- Chupin, O., Chabot, A., Piau, J.-M., Duhamel, D., 2010. Influence of sliding interfaces on the response of a layered viscoelastic medium under a moving load. *International Journal of Solids and Structures* 47, 3435–3446. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.08.020>
- Gokhale, S., Byron, T., Iyer, S., Choubane, B., 2009. Evaluation of Pavement Strain Gauge Repeatability: Results from Accelerated Pavement Testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2094, 30–40. <https://doi.org/10.3141/2094-04>
- Grellet, D., Doré, G., Chupin, O., Piau, J.-M., 2018. Highlighting of the viscoelastic behaviour of interfaces in asphalt pavements – a possible origin to top-down cracking. *Road Materials and Pavement Design* 19, 581–590. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1418721>
- Huet, C., 1965. Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés (Thèse de doctorat).
- Noise and Emissions Monitoring and Radical Mitigation, 2023. URL <https://nemo-cities.eu/> (accessed 1.30.25).
- Ozer, H., Al-Qadi, I.L., Wang, H., Leng, Z., 2012. Characterisation of interface bonding between hot-mix asphalt overlay and concrete pavements: modelling and *in-situ* response to accelerated loading. *International Journal of Pavement Engineering* 13, 181–196. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.596935>
- Sayegh, G., 1965. Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux, in: *Conférence Au Groupe Français de Rhéologie*. pp. 51–74.
- Wang, H.-P., Xiang, P., Jiang, L.-Z., 2020. Optical fiber sensing technology for full-scale condition monitoring of pavement layers. *Road Materials and Pavement Design* 21, 1258–1273. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1547656>
- Wang, L.B., Myers, L.A., Mohammad, L.N., Fu, Y.R., 2003. Micromechanics Study on Top-Down Cracking. *Transportation Research Record* 1853, 121–133. <https://doi.org/10.3141/1853-14>
- Yao, K., Dong, Q., Chen, X., Wang, X., Xie, S., Cheng, Z., 2024. Influence of bonding condition of different interfaces on the mechanical responses and failure mode of asphalt pavement. *Can. J. Civ. Eng.* <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0249>