

Evaluation de la réponse mécanique des couches de surface de chaussées bitumineuses pour différentes conditions d'interface

Marina Al Bacha¹, Pierre Hornych¹, Mai-Lan Nguyen¹, Olivier Chupin¹, Ferhat Hammoum²

¹ MAST-LAMES, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France

² MIT-LAMES, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France

RESUME

Les couches de surface d'une chaussée routière sont soumises à l'action de plusieurs mécanismes d'endommagement, causés par le passage des véhicules lourds, car elles sont en contact direct avec les pneumatiques. Elles peuvent donc présenter différents types d'endommagement : fissuration par le haut, orniérage, arrachement des granulats. Le but de cet article est d'analyser la distribution des déformations au-dessus de l'interface entre deux couches de chaussée et d'étudier l'effet de sa condition de collage sur les contraintes et déformations dans ces couches, afin de comprendre leurs mécanismes d'endommagement. La réponse de la chaussée est évaluée par un essai de fatigue accéléré sur des structures en vraie grandeur avec différentes conditions d'interface. Elle est également modélisée à l'aide du logiciel Viscoroute© 2.0, prenant en compte un comportement viscoélastique pour les couches bitumineuses avec une interface collée ou viscoélastique. Les mesures expérimentales et les résultats numériques indiquent que la condition de collage de l'interface a une forte influence sur le comportement mécanique des couches de surface et sur leurs mécanismes d'endommagement.

Mots-clés

Couches de surface, modélisation de la chaussée, mécanismes de rupture, viscoélasticité, interface.

I. INTRODUCTION

Les chaussées souples sont soumises à l'action de plusieurs mécanismes d'endommagement, causés par le passage des véhicules lourds, sous différentes conditions climatiques. Il existe deux types de fissuration, caractérisés par leur mécanisme d'initiation et de propagation. La fissuration par fatigue (fissuration du bas vers le haut) est générée par la flexion des couches bitumineuses sous la répétition des charges de trafic qui impose une contrainte de traction et une déformation en extension à la base de ces couches. Cette fissuration se propage vers le haut, jusqu'à ce qu'elle atteigne la surface. L'autre type de fissuration, appelé la fissuration par le haut (TDC : top down cracking), s'initie près de la surface de la chaussée. Selon Grellet et al. (2018), les contraintes et les déformations d'extension se produisant près de la surface de la chaussée et à l'interface entre deux

couches d'enrobé, peuvent causer la TDC (dans ce cas la fissure s'initie à l'interface et remonte dans la couche de surface). L'état de ces contraintes et déformations, dépend des conditions de température et des conditions de collage de l'interface, comme indiqué dans Wang et Al-Qadi (2010).

Dans le cadre du projet Binary financé par l'Agence Nationale de Recherche, la quantification des contraintes et des déformations dans les couches bitumineuses de surface est réalisée à travers un essai de fatigue accéléré sur 5 structures de chaussée différentes en vraie grandeur. Par ailleurs, des simulations numériques à l'aide du logiciel de modélisation de chaussées Viscoroute© 2.0 sont réalisées et comparées avec les résultats expérimentaux. Différents types de capteurs sont utilisés pour suivre le comportement des chaussées expérimentales. Des fibres optiques, installées dans les couches bitumineuses permettent de mesurer les déformations de part et d'autre de l'interface. Des jauges longitudinales et transversales et des géophones permettent de mesurer les déformations à la base de la couche de roulement et les déflexions en surface. De plus, la distribution de la contrainte de contact pneu-chaussée sera mesurée à l'aide de l'appareil de mesure Tekscan. Des sondes de températures mesurent également les températures dans les différentes couches de chaussée.

Cet article présente les premiers résultats des mesures des jauges de déformation au-dessus de l'interface entre deux couches d'enrobé, obtenues sous le passage des pneus, sur deux structures de référence. Ces résultats sont ensuite comparés aux simulations avec le logiciel Viscoroute, intégrant le modèle viscoélastique de Huet-Sayegh pour les matériaux bitumineux.

II. STRUCTURES DE CHAUSSEES ET MATERIAUX TESTES

Les deux structures de chaussée sélectionnées pour la présente étude sont composées de 60 mm de béton bitumineux semi grenu (BBSG), reposant sur 40 mm après le rabotage d'une couche de grave bitume (GB) existante et soumise au trafic lors d'un essai précédent (Blanc et al., 2019). Elle comprend aussi une fondation granulaire de 750 mm d'épaisseur s'appuyant sur du sol naturel sableux. Lors de la construction, la couche de roulement a été posée sans couche d'accrochage entre le BBSG et la GB existante pour la première section. Pour la deuxième section, une couche d'accrochage constituée d'émulsion de bitume cationique à prise rapide (EN 13808), a été appliquée (avec un taux de 300 g/m² de bitume résiduel) avant la mise en place de la couche de roulement.

III. CAMPAGNE EXPERIMENTALE

L'essai de chaussée en vraie grandeur est réalisé sur le manège de fatigue de l'Université Gustave Eiffel (Nantes, France), qui permet de tester les chaussées en vraie grandeur sous des chargements de poids lourds. Il comprend une piste circulaire de 40 m de diamètre et 4 bras portant les roues. Pour cet essai, la piste est divisée en cinq sections, dont deux sont analysées dans cet article.

Les structures des deux sections de la chaussée sont montrées sur la Figure 1. Les deux structures sont constituées de la même couche de surface bitumineuse (BBSG), mais avec des conditions d'interface différentes. Ces sections sont instrumentées par des jauges de déformations, mesurant les déformations longitudinales et transversales à la base de la couche de surface, des fibres optiques mesurant également les déformations, et des sondes de température. Plusieurs essais de chargement ont été effectués sur le manège de fatigue, en utilisant un jumelage, circulant à

différentes vitesses et différents niveaux de charges. Deux conditions expérimentales sont détaillées dans cet article, correspondant à :

- Une charge de 4.5 tonnes, et une température au milieu de la couche de surface de 7.8°C.
- Une charge de 5.5 tonnes avec une température de 12°C.

Dans tous les cas, différentes vitesses de chargement ont été appliquées avec les roues en position centrale (sans balayage latéral). Dans cet article, les déformations mesurées en bas de la couche de surface (dans deux directions : longitudinale ϵ_{xx} et transversale ϵ_{yy}) sont analysées.

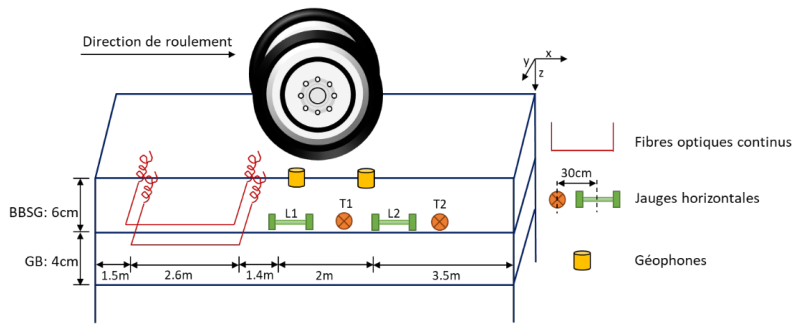
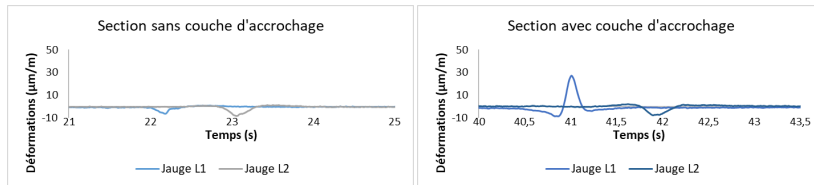


FIGURE 1. Instrumentation d’une structure (les dimensions ne sont pas à l’échelle)

IV. MESURES EXPERIMENTALES DES DEFORMATIONS AU DESSUS DE L’INTERFACE

Les déformations longitudinales et transversales sont mesurées à une profondeur $z=45$ mm, à l’aide des jauges placées à la base de la couche de surface. La Figure 2 représente les déformations longitudinales mesurées sous le passage du jumelage en position centrale du manège ($y=0$), pour les deux conditions expérimentales choisies et pour les deux sections. Pour la section sans couche d’accrochage, les déformations sont négatives (en contraction). Pour la section avec couche d’accrochage, les deux jauges donnent des signaux différents. Une première jauge donne un signal avec un pic négatif (en contraction), tandis que l’autre jauge donne un pic positif (en extension).

Condition expérimentale No.1 (4.5 tonnes à 7.8°C et $v=7$ km/h)



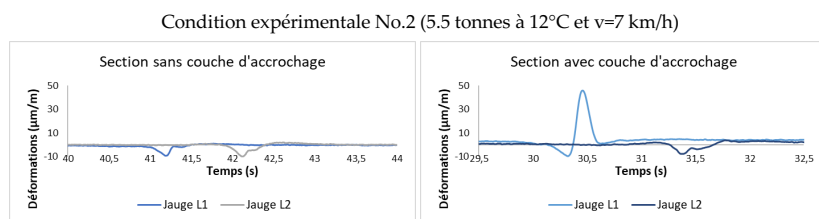


FIGURE 2. Signaux de déformations longitudinales à la base de la couche de surface (ϵ_{xx} en $z=45$ mm)

La Figure 3 représente les signaux de déformations transversales obtenus pour les 2 conditions expérimentales. Pour les deux conditions de collage, les déformations sont négatives et l’amplitude du signal augmente avec la charge et la température.

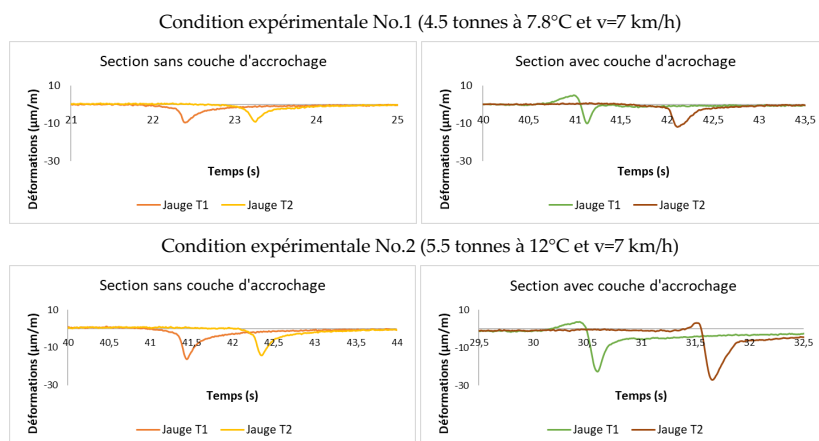


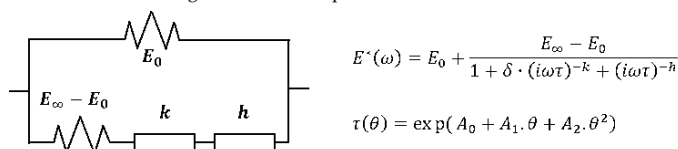
FIGURE 3. Signaux de déformations transversales à la base de la couche de surface (ϵ_{yy} en $z=45$ mm)

V. MODELISATION DE LA CHAUSSEE

La modélisation de la réponse de la chaussée a été réalisée en utilisant le logiciel ViscoRoute© 2.0 (Chabot et al. 2010). Viscoroute© 2.0 est un outil de calcul semi-analytique qui permet de calculer la réponse mécanique d’une chaussée multicouche composée de matériaux élastiques ou viscoélastiques décrits par le modèle de Huet-Sayegh (1965). Différentes formes d’empreinte de charge (rectangulaire, elliptique) peuvent être considérées.

Le modèle rhéologique de Huet-Sayegh montré sur la Figure 4 permet de bien représenter le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux sur une large gamme de fréquences et de températures. Le modèle est constitué de deux ressorts élastiques de modules E_0 et E_∞ (module statique et instantané) et deux amortisseurs non linéaires d’exposants k et h . L’équation du module complexe correspondant à cette représentation est donné dans la Figure 4 où :

ω : période (rad/s)
 τ : temps de relaxation (s)
 δ : constante positive sans dimension
 θ : température (°C)
 A_0, A_1 et A_2 : coefficients de régression intrinsèques au matériau étudié



$$E'(\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta \cdot (i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$$

$$\tau(\theta) = \exp(A_0 + A_1 \cdot \theta + A_2 \cdot \theta^2)$$

FIGURE 4. Modèle de Huet-Sayegh

Dans cette étude, le sol et la fondation granulaire sont modélisés en tant que matériaux élastiques. Le module élastique du sol a été obtenu par calage inverse à partir d’essais au déflectomètre à masse tombante (FWD). Les couches bitumineuses sont considérées comme viscoélastiques avec des propriétés caractérisées à partir d’essais de module complexe réalisés en laboratoire.

Pour la modélisation de l’interface entre les deux couches bitumineuses, deux hypothèses ont été prises en compte dans cet article. La première consiste à considérer une interface parfaitement collée, conduisant à une continuité des déplacements et des contraintes verticales entre les deux couches. Cette hypothèse est habituellement utilisée dans la méthode de dimensionnement des chaussées. Selon Grellet et al. (2018), cette condition de collage reste valide pour des températures comprises entre 10 et 25°C, pour lesquelles le bitume et l’enrobé ne sont pas trop rigides ni trop visqueux. Pour des températures au-delà de 25°C, la condition de collage parfait n’est plus valide. Dans ce cas, l’interface peut être modélisée comme une couche fine avec un comportement viscoélastique. Le comportement viscoélastique de la couche d’interface et des couches bitumineuses est représenté par le modèle de Huet-Sayegh. Selon Grellet et al. (2018), les meilleures prédictions du comportement de l’interface sont obtenues en considérant une épaisseur de l’interface de 0.5 mm, et des propriétés viscoélastiques correspondant à celles d’un liant bitumineux (voir tableau 1). Dans cet article, différentes épaisseurs d’interface sont testées. Dans la suite, une empreinte rectangulaire de pneus (20x25cm) est considérée pour la modélisation (Figure 5).

TABLEAU 1. Propriétés des couches de la chaussée expérimentale

Matériaux viscoélastiques								
Coefficients	δ	k	h	E_∞ (MPa)	A_0	A_1	A_2	E_0 (MPa)
BBSG	2.59	0.22	0.66	33142	4.37	-0.39	1.31×10^{-3}	2.94×10^{-9}
Interface	3.79	0.25	0.78	1625	-2.79	-0.38	2.31×10^{-3}	-
GB	1.37	0.21	0.69	36069	2.88	-0.39	1.97×10^{-3}	48.22
Matériaux élastiques								
Coefficients				E (MPa)	Epaisseurs (mm)			
Base granulaire				160	750			
Sol				95	∞			

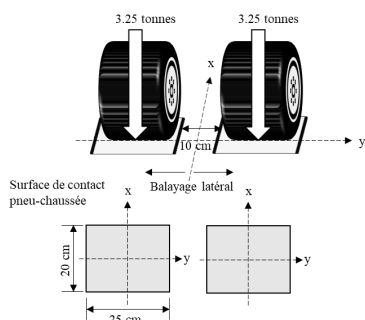


FIGURE 5. Dimensions des empreintes des pneus

VI. COMPARAISON ENTRE LES DEFORMATIONS MESUREES ET LES SIMULATIONS NUMERIQUES

Les déformations longitudinales et transversales obtenues expérimentalement avec les jauges (Condition expérimentale No.2, voir Figure 2) sont comparées aux résultats des simulations numériques, en utilisant les modèles viscoélastiques pour les couches bitumineuses avec une interface collée ou viscoélastique. Les Figures 6 et 7 représentent respectivement les déformations longitudinales et transversales calculées au centre du capteur correspondant à $z=45$ mm pour les sections.

Pour la section sans couche d'accrochage (jauges L1 et T1), la contraction observée au-dessus de l'interface correspond bien à une simulation viscoélastique linéaire avec une interface collée (LVE avec interface collée). Cela tend à indiquer une bonne liaison entre les deux couches d'enrobé. Pour la section avec couche d'accrochage (jauges L1 et T1), l'utilisation d'une couche d'interface viscoélastique fine permet de mieux prédire les déformations en extension observées à la base de la première couche. Cela tend à indiquer qu'il y a un glissement entre les couches de BBSG et de GB sur cette section. Les valeurs de déformations simulées dépendent de l'épaisseur de l'interface retenue dans le calcul. Le meilleur accord avec les mesures de jauges est obtenu pour une épaisseur de 1.5 mm. Contrairement à ce qui était attendu, la section sans couche d'accrochage présente un meilleur collage entre les deux couches d'enrobé.

Pour revenir aux résultats expérimentaux à la base de la section avec couche d'accrochage (Figure 2), deux signaux différents sont observés pour les 2 jauges bien que celles-ci soient situées à la même cote. Elles sont néanmoins espacées dans la direction de roulement. Pour la première jauge L1, une extension est observée à la base de la première couche indiquant un certain glissement à l'interface entre BBSG et GB. La deuxième jauge L2, subit une contraction indiquant plutôt un comportement d'interface collée entre BBSG et GB. On peut donc supposer que différentes conditions de collage prévalent dans cette structure en fonction de la position suivant la direction longitudinale de cette section.

Les mesures de déformation comparées avec les résultats de la modélisation indiquent qu'une même section de chaussée peut présenter différentes conditions de collage et qu'aux points où la

liaison n'est pas suffisante (Figure 6b et Figure 7b) des déformations longitudinales en extension relativement élevées peuvent se développer à la base de la couche de roulement. Dans ces conditions, on peut donc penser que la couche de surface soit sujette à de la fissuration par fatigue sous chargement répété. Ce type de dégradation est assez souvent observé sur chaussée, mais son origine n'est pas bien comprise. Les mesures réalisées ici sur le manège de fatigue suggèrent qu'il s'agit d'un problème de collage d'interface.

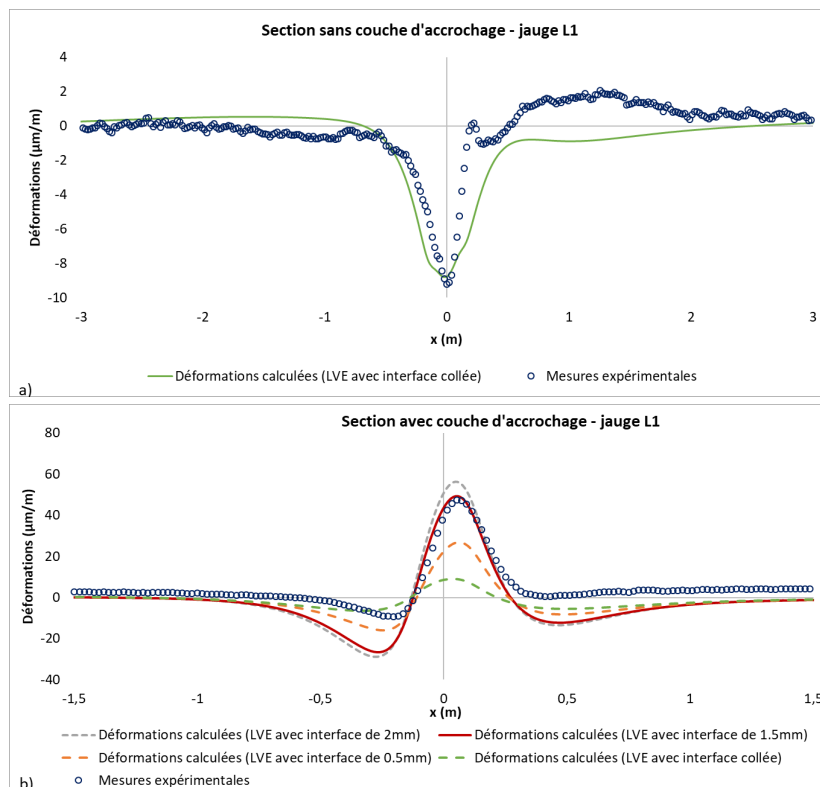


FIGURE 6. Comparaison entre les déformations longitudinales calculées et mesurées : a) dans la section sans couche d'accrochage à l'interface des deux couches bitumineuses) ; b) dans la section avec couche d'accrochage

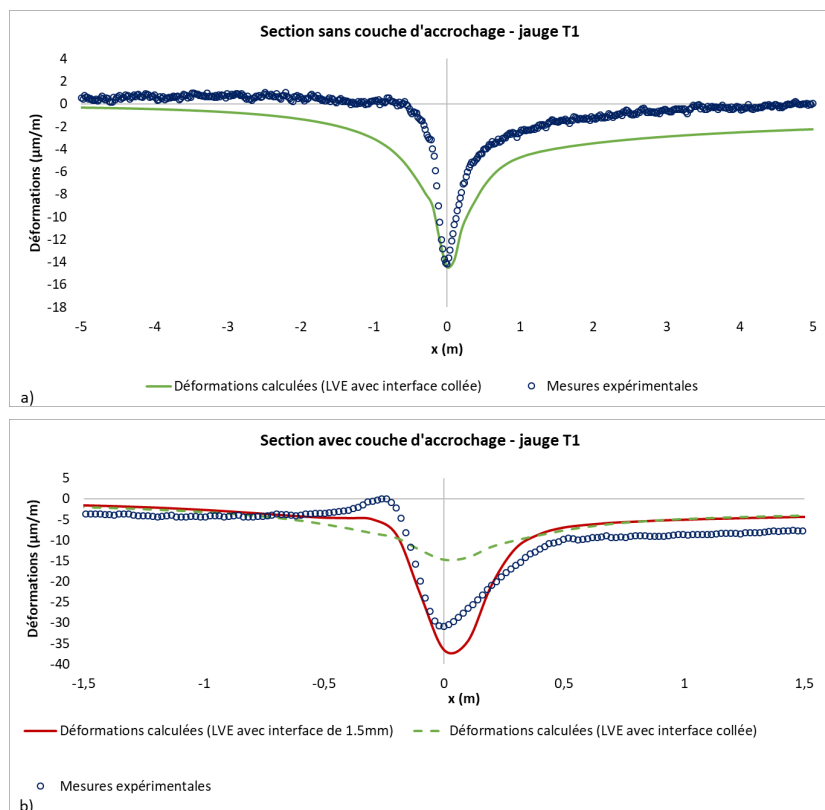


FIGURE 7. Comparaison entre les déformations transversales calculées et mesurées : a) dans la section sans couche d'accrochage à l'interface des deux couches bitumineuses ; b) dans la section avec couche d'accrochage

VII. CONCLUSION

Cet article présente des mesures de déformation à la base des couches de surface de deux sections de chaussée expérimentales testées sur le manège de fatigue des structures routières de l'université Gustave Eiffel. La comparaison entre ces mesures et des simulations de la réponse mécanique de la structure sous charge roulante indique que différentes conditions de collage entre les couches d'enrobé en surface de chaussée prévalent sur les deux sections. Pour la section sans couche d'accrochage, les déformations mesurées étaient toutes en contraction, ce qui indique une liaison satisfaisante entre les couches bitumineuses. Cependant, pour la section avec couche d'accrochage, des conditions de contact différentes ont été observées, avec notamment une jauge donnant des

déformations d'extension relativement élevées, ce qui pourrait traduire un certain glissement à l'interface, dû à la présence de l'émulsion.

Le comportement des interfaces a été expliqué par la modélisation des deux sections avec le logiciel Viscoroute© 2.0. Pour la section sans couche d'accrochage, les déformations en contraction ont pu être obtenues avec une interface collée. Pour la section avec couche d'accrochage, les déformations en extension ont été prédites en considérant l'interface comme étant une couche fine viscoélastique de faible rigidité. Le meilleur ajustement avec les résultats expérimentaux a été obtenu pour une interface de 1.5 mm d'épaisseur.

Finalement, les résultats obtenus dans ce travail montrent clairement que la condition de collage à l'interface entre couches bitumineuses a une grande influence sur le comportement mécanique des couches de surface et qu'une liaison insuffisante peut générer des déformations d'extension importantes à la base de celles-ci. Cela pourrait être à l'origine de l'un des mécanismes d'endommagement des couches de surface observé sur certaines chaussées.

La suite de ce travail consistera à simuler les mesures de déformation obtenues à différentes températures et également à suivre l'évolution des déformations et du comportement de l'interface en fonction du trafic. L'objectif final du projet est d'améliorer la méthode de dimensionnement de ce type de chaussée en prenant notamment mieux en compte le comportement des interfaces, aujourd'hui toujours considérées comme collées.

REFERENCES

Al-Qadi, I., Wang, H., 2009. Evaluation of pavement damage due to new tire designs. *Illinois center for Transportation*.

Autret, P., De-boissoudy, A.B., Gramsammer, J.C., 1987. The circular test track of the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. *Proceeding of 6th International Conference on Structure Design of Asphalt Pavements*, 1, pp. 550-561.

Juliette Blanc, Emmanuel Chailleux, Pierre Hornych, R. Christopher Williams, Davide Lo Presti, Ana Jimenez Del Barco Carrion, Laurent Porot, Jean-Pascal Planche & Simon

Pouget (2019). Bio materials with reclaimed asphalt: from lab mixes properties to non-damaged full scale monitoring and mechanical simulation, *Road Materials and Pavement Design*, 20:sup1, S95-S111, <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1589557>

Chabot, A., Chupin, O., Deloffre, L., Duhamel, D., 2010. A Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 11, pp. 227-250. [10.1080/14680629.2010.9690274](https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690274).

De Beer, M., Maina, J.W., van Rensburg, Y., Greben, J., 2011. Toward Using Tire-Road Contact Stresses in Pavement Design and Analysis.

Duong, Ngoc Son., Blanc, J., Hornych, P., Bouveret, B., Carroget, J., & Lefeuvre, Y., 2019. Continuous strain monitoring of an instrumented pavement section. *International Journal of Pavement Engineering*, 20:12, pp. 1435-1450, DOI:10.1080/10298436.2018.1432859.

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, pp. 581-590. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1418721>

Hornych, P., Kerzreho, J. P., Chabot, A., Bodin, D., Balay, J. M., Deloffre L., 2008. In Pavement Cracking - Al-Qadi, Scarpas & Loizos (eds). The LCPC's ALT facility contribution to pavement cracking knowledge. <https://doi.org/10.13140/2.1.2361.9529>

a mis en forme : Anglais (E.U.)

a mis en forme : Anglais (E.U.)

a mis en forme : Anglais (E.U.)

Huet, C., 1963. Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastiques des matériaux hydrocarbonnés (PhD thesis). Université de Paris.

Nguyen, M. L., Chupin, O., Blanc, J., Piau, J.-M., Hornych, P., Lefeuvre, Y., 2020b. Investigation of Crack Propagation in Asphalt Pavement Based on APT Result and LEM Analysis. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(1), 20180933. <https://doi.org/10.1520/JTE20180933>

Sayegh, G., 1965. Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux, Thèse de Doctorat d'Ingénieur. Faculté des Sciences de l'université de Paris.

Wang, H., Al-Qadi, I., 2010. Evaluation of Surface-Related Pavement Damage due to Tire Braking, *Road Materials and Pavement Design*, 11:1, 101-121, DOI: 10.1080/14680629.2010.9690262