
Vers une modélisation avancée du contact pneu-chaussée en vue de l'amélioration du calcul de durée de vie

E.Y. MANYO, B. PICOUX, P. REYNAUD, F. ALLOU, C. PETIT

Laboratoire GC2D, Université de Limoges, Boulevard J. Derche, 19300 EGLETONS.

edem-yawo.manyo@unilim.fr, benoit.picoux@unilim.fr, philippe.reynaud@unilim.fr, fatima.allou@unilim.fr, christophe.petit@unilim.fr

RÉSUMÉ. L'apparition de nouveaux matériaux dans les structures de chaussée avec la diminution de l'épaisseur des couches de surface, de l'augmentation des chargements et de passage répété des poids lourds a entraîné de nouvelles pathologies de dégradation. Outre les problèmes d'orniérage, on trouve actuellement l'apparition de fissures descendantes (top down cracking) ainsi que la décohésion aux interfaces de la structure. Ces dernières ne permettent pas d'estimer convenablement les durées de vie de la chaussée, avec les méthodes de dimensionnement existantes. Cet article propose une nouvelle approche du contact pneu-chaussée permettant de mieux appréhender les contraintes dans une structure de chaussée bitumineuse à l'aide d'un outil rapide de calcul semi-analytique (SAM). Le résultat montre une répartition non homogène des contraintes dans la structure et principalement dans les premiers centimètres sous la surface avec des niveaux plus importants que peuvent le prédire les modèles existants. Les résultats de SAM ont été comparés à ceux d'Alizé-LCPC dans le cas d'une couche infinie. Une fois validés, ces résultats permettront d'estimer plus fidèlement la durée de vie résiduelle de même que la compréhension des mécanismes de dégradation proche de la surface.

ABSTRACT. The emergence of new materials in pavement structures with a decreasing of the thickness of the surface layers, of truck loads increasing and their repeated passage frequency has led to new pathologies of pavement degradation. In addition to well-known rutting problems, there is now the appearance of top down cracking as well as decohesion problems at the interfaces of this multilayer structure. In the current design methods, these new impairments do not make it possible to estimate the durability of the roadway and are often overestimated. This paper proposes an innovative approach of the tire-road contact making it possible to better understand the stresses in a bituminous pavement structure. With the help of a fast semi-analytical (SAM) calculation tool. The result shows a non-homogeneous distribution of stresses in the structure and mainly in the first centimeters below the surface with much higher levels than can be predicted by current models. The results of SAMRoute were compared to those of Alizé-LCPC in the case of an infinite layer. Once validated, these results will make it possible to more accurately estimate the residual lifespan, but also to understand and avoid the mechanisms of degradation close to the surface.

MOTS-CLÉS : Chaussées souples, contact pneu-chaussée, méthode semi analytique, dégradation.

KEY WORDS: Flexible pavement, tyre-road contact, Semi analytical model, degradation.

1. Introduction

Avec l'augmentation constante du trafic et la multiplication de zones singulières tels que les giratoires par exemple, les chaussées bitumineuses sont de plus en plus sollicitées. Outre les problèmes bien connus d'orniérage, de décollement de couche et de fissuration remontante, il apparait de nouvelles pathologies telles que la fissuration par le haut et l'arrachement des couches de surface. Ces nouvelles dégradations prennent naissance et se propagent à la surface de la structure. Pour les comprendre et les intégrer dans un calcul de durée de vie fiable, il est nécessaire de prendre en compte une modélisation beaucoup plus avancée des champs mécaniques causés par l'impact du chargement et l'interaction du contact pneumatique - chaussée.

2. Modélisation du contact pneu chaussée

De nos jours, le champ de pression pneumatique à la surface de la chaussée est toujours idéalisé par une distribution uniforme dans les logiciels de dimensionnement de chaussée. Alizé-LCPC [IFS 16], l'outil le plus utilisé en France pour le dimensionnement rationnel des chaussées, utilise un calcul analytique et permet de prendre en compte plusieurs couches de matériaux (collées ou glissantes), un chargement de type essieu unique ou multiple mais une surface de contact idéalisée. Viscoroute [DUH 05], développé sur la même base propose une modélisation semi analytique viscoélastique des chaussées bitumineuses. Il repose sur un modèle de structure multicouche semi-infinie prenant en compte la loi de comportement thermo-viscoélastique de Huet-Sayegh, mais, en considérant toujours un chargement idéalisé modélisé par une surface rectangulaire ou elliptique. Ces outils permettent d'avoir les déformations, les contraintes et les déplacements en différents points de la chaussée et d'estimer les valeurs admissibles. La représentation du profil de distribution réel du contact a été mise en œuvre par De Beer et Fisher [DEB 13] par des mesures avec le système nommé SIM (Stress In Motion). L'auteur de SIM a prouvé que la pression de contact Pneu-Chaussée est loin d'être idéalisée par une distribution uniforme. Ces mesures ont été aussi utilisées pour des calculs éléments finis sur des structures de chaussées pour étudier la fissuration par fatigue et l'orniérage. Pour la même problématique, une étude de l'interaction entre le pneu et la chaussée par la méthode des éléments finis (FEM) a été effectuée par Wang et al [WANG 12] pour déterminer les contraintes surfaciques en régime statique et en roulement. Les résultats ont permis de montrer la distribution non uniforme, mais s'agissant de FEM, la modélisation de la texture du pneu ainsi que les temps de calcul restent longs et fastidieux. Pour remédier à ces inconvénients, nous allons présenter dans cet article une modélisation par la méthode numérique dite semi-analytique (SAM). Cette méthode a été utilisée depuis de nombreuses années pour traiter des problèmes simple (comme un contact élastique en statique) entre des massifs à géométries complexe. Cette méthode nécessite la connaissance ou la détermination de nouvelles solutions analytiques. Elle était utilisée avec des algorithmes de Newton Raphson et de Gauss-Seidel pour résoudre des problèmes de contact sous un chargement statique [BEN 67]. Au fil du temps, SAM a évolué en passant par la méthode multi grille et la transformé de Fourier rapide (FFT). Cette dernière technique était retenue la mieux adaptée pour la résolution de problème de contacts complexes (Matériaux inélastique, prise en compte des hétérogénéités et du revêtement...). La FFT permet un gain de temps mais par contre elle impose une extension de la taille de la zone de calcul par un facteur de 8 dans toutes les directions. La DC-FFT est alors utilisée pour divisée cette facteur par 2. La méthode Semi-Analytique est le plus souvent appliquée aux massifs semi-infinis d'où l'utilisation du théorème des espaces semi-infinis. Le modèle utilisé dans cet article a été développé et validé sur des applications aux problèmes de fretting, d'hétérogénéité, de plasticité [CHA 11] et de contact pneu/chaussée avec un pneu de profil lisse [REY 16]. Le problème de contact est étudié ici en utilisant SAM et appliqué au contact Pneu/Chaussée pour une comparaison avec un calcul standard d'Alizé-LCPC.

2.1. Formulation

Le problème est ici limité à un problème purement élastique pour une analyse des champs mécaniques en surface et à quelques centimètres de la surface. En supposant un chargement unitaire en surface d'un massif semi-infini, le déplacement normal élastique sous cette charge élémentaire est donné par la formule de Love [LOV 57]. Etant donné que le principe de résolution du problème de contact par la méthode semi-analytique est basé sur une sommation des solutions analytiques, un principe de superposition appliqué à cette solution unitaire sur une surface discrétisée, donne :

$$u_{zij} = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} K_{i-k,j-l} * p_{kl}$$

où p_{kl} est la distribution de la pression de contact, (*) un produit de convolution, $K_{i-k,j-l}$ sont des coefficients d'influence obtenus par solutions analytique et u_{zij} sont les déplacements élastiques normaux de la surface.

Une FFT est appliquée à ce produit de convolution afin d'obtenir une multiplication :

$$\hat{u}_{ij} = \hat{K}_{ij} \times \hat{p}_{ij}$$

Cette dernière équation peut être résolue alors par la méthode du gradient conjugué (CGM) pour la détermination de la pression de contact et le déplacement élastique en prenant en compte les propriétés élastiques des matériaux en contact. Les réponses en sous couche sont déterminées par les équations de Love ou de Cerruti.

2.2. Structure du pneu

Afin d'intégrer le profil réel de distribution de la pression de contact, nous avons besoin d'une représentation fidèle de la géométrie du pneumatique. Pour cela, nous devons numériser le profil du pneu en coordonnées cartésiennes. Deux méthodes ont été développées au laboratoire GC2D, une méthode optique [MAN 17] qui utilise une technique de projection de franges et plus récemment une méthode de photogrammétrie qui nécessite un simple appareil photographique. Plusieurs clichés du pneumatique sont effectués au préalable (avec une zone de recouvrement d'environ 80% par cliché avec une même profondeur de prise de vue). Le traitement de ces clichés est effectué par un logiciel afin d'avoir un profil précis du pneumatique (figure 1).

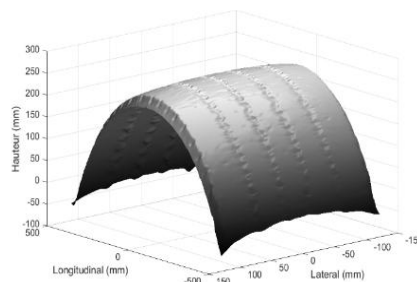


Figure 1 : Géométrie numérisée d'un pneumatique de poids lourds

3. Résultats : cas d'une chaussée standard simplifiée en une couche semi-infinie

Nous réalisons au préalable et sur une structure simplifiée de chaussée (couche infinie de matériau bitumineux : $E = 5400$ MPa, $\nu = 0,35$) une étude comparative entre un calcul Alizé et une simulation dans les mêmes conditions de contact idéalisé effectuée avec SAM. Ensuite, une comparaison entre les résultats Alizé et les résultats de calcul SAM avec un pneumatique réel est effectuée. La charge de référence sur roue isolée est de 32,5 kN. La figure 2 montre ainsi le profil de pression de contact standard issu du calcul Alize et celui calculé avec SAM pour cette charge standard sur roue isolée.

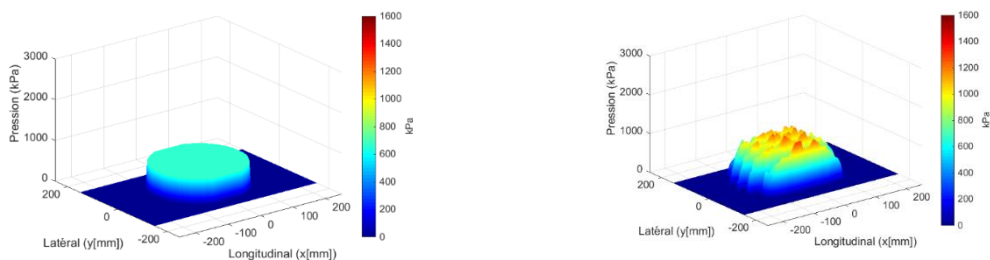


Figure 2 : Distribution de la pression de contact selon ALIZE (à gauche) et selon SAM (à droite)

La figure 3 présente les résultats de comparaison sur les contraintes et déformations principales entre SAM et Alizé pour un calcul avec le chargement idéalisé qui assure la bonne correspondance entre les deux logiciels pour un calcul identique de chargement idéalisé. La figure 4 présente enfin les résultats de comparaison sur les contraintes principales entre SAM et Alizé en intégrant le chargement réel dans SAM et l'augmentation des déformations principales sous la surface passant de 50 μ def pour le calcul Alizé à environ 100 μ def. L'effet de la structure du pneumatique sur les déformations admissibles et responsable de la fissuration est alors démontré.

4. Conclusion

Dans cet article une méthode de calcul semi analytique des champs de contraintes et de déformations dans une structure de chaussée, provoqué par un contact pneumatique-chaussée très proche de la réalité. Il a permis de montrer l'importance de la prise en compte de la géométrie du pneumatique dans la compréhension des phénomènes de dégradation dans la couche de roulement (notamment sur les mécanismes de fissuration nommée top down cracking) et l'apport dans le dimensionnement d'une structure routière.

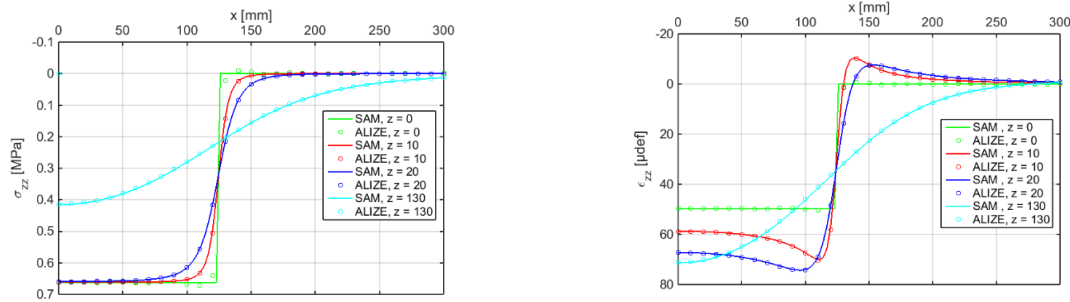


Figure 3 : Comparaison entre un calcul Alize et une simulation de type Alize avec SAM : contraintes verticales (à gauche) et déformations verticales (à droite)



Figure 4 : Comparaison Alizé / SAM - pneu réel : Contrainte verticale (à gauche), Déformations verticales au centre du contact (à droite)

5. Bibliographie

- [BEN 67] BENTALL R.H., JOHNSON K.L., « Slip in the Rolling Contact of Two Dissimilar Elastic Rollers », *International Journal of Mechanical Science*, vol. 9, n°6, 1967, 389-404.
- [CHA 11] CHAISE T., NELIAS D., « Contact Pressure and Residual Strain in 3D Elasto-Plastic Rolling Contact for a Circular or Elliptical Point Contact », *Journal of Tribology*, vol. 133 n° 4, 2011, pp.041402.
- [DEB 13] DE BEER M., FISHER C., « Stress-in-motion (sim) system for capturing tri-axial tyre-road interaction in the contact patch », *Measurement*, vol. 46, n° 7, 2013, p 2155-2173.
- [DUH 05] DUHAMEL D., CHABOT A., TAMAGNY P., HARFOUCHE L., « ViscoRoute Logiciel de modélisation viscoélastique des chaussées bitumineuses », *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 258-259, 2005, p. 89-103.
- [IFS 16] IFSTTAR, *Alizé-LCPC, Manuel Version 1.5*. 2016, 115 pages.
- [LOV 52] LOVE A. E. H. *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Cambridge University Press, London, 4 edition, 1952.
- [MAN 17] MANYO E. Y., LEANDRY I., PICOUX B., REYNAUD P., ALLOU F., PETIT C., « 3D modeling and measuring of tire-pavement contact pressure » *The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields BCRRA*, Athens, 28-30 June 2017, CRC Press.
- [REY 16] REYNAUD P., NASR S. B., CHAISE T., NELIAS D., PETIT C., ALLOU F., « 3d modelling of tire-pavement contact pressure », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. Vol. 21, n° 6, 2016, p. 112-127.

[WAN 12] WANG H., AL-QADI I. L., STANCIULESCU I., « Simulation of tyre–pavement interaction for predicting contact stresses at static and various rolling conditions », *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 13, n° 4, 2012, p 310-321.