



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Approche tribologique du contact pneu-chaussée

Ph. REYNAUD, B. PICOUX, E. MANYO, C. PETIT – Laboratoire GC2D

Thème de rattachement : 3

Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées

PR3-3 Cas des couches de roulement

DVDC/R/010

LC/17/DVDC/11

Juin 2018

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 et position du problème	4
2.1 Préambule.....	4
2.2 Le contact pneu-chaussée.	4
2.3 Projet DVDC tranche 1.....	10
3 Modélisation Avancée du Contact (code SAM)	11
3.1 Approche tribologique, code SAM.....	11
3.2 Détermination de la géométrie réelle du pneu par photogrammetrie.....	12
3.3 Détermination du module d'Young équivalent du pneu.....	15
4 Calcul des contraintes générées par le pneu réel e.....	16
4.1. Mesure des aires de contact Erreur ! Signet non défini.....	16
4.2. Calcul des pressions de contact et validation expérimentale Erreur ! Signet non défini.....	18
4.2.1 Cas d'un pneu de structure homogène.....	18
4.2.2 Comparaison entre un pneu homogène et un pneu multicouche.....	20
4.3. Evolution de la contrainte normale à l'intérieur de la couche de surface Erreur ! Signet non défini.....	21
4.4. Calcul des contraintes de cisaillement Erreur ! Signet non défini.....	22
4.5. Critère de Von Mises Erreur ! Signet non défini.....	23
5 Conclusions et perspectives.....	24
5.1. Conclusions tranche 1 Erreur ! Signet non défini.....	24
5.2. Perspectives Erreur ! Signet non défini.....	25
6 DVDC Tranche 2	26
7 Bibliographie.....	27

1 Résumé

Résumé en français

La réalisation et la maintenance du réseau routier entraînent des coûts financiers importants, des pollutions dues à l'utilisation d'une matière première pétrolière et une consommation énergétique élevée lors de son élaboration (160°C). L'enjeu de la construction routière devient donc un compromis entre la qualité mécanique de la chaussée et les coûts. L'apparition de nouveaux matériaux associée à une diminution de l'épaisseur des couches de surface et combinée à une augmentation des chargements des poids lourds et de leur fréquence de passage a entraîné de nouvelles pathologies de dégradation des chaussées. Outre les problèmes d'orniérage bien connus, on trouve désormais l'apparition de fissures descendantes (top down cracking) ainsi que des problèmes de décohésion aux interfaces. Cette étude propose de répondre scientifiquement et concrètement à ces pathologies. Nous avons présenté il y a deux ans, la faisabilité de l'étude du contact pneu-chaussée par un code de calcul semi-analytique (SAM) développé au LAmCos. Nous travaillions alors avec un pneu lisse virtuel ayant la géométrie de l'enveloppe d'un pneu réel.

Aujourd'hui, pour plus de réalisme, nous réalisons les calculs du contact avec la géométrie réelle d'un pneumatique de poids lourd. La géométrie du pneu est introduite dans le code de calcul suite à une numérisation par photogrammétrie. Une modélisation avancée permettant de simuler les contraintes subies par la surface de la chaussée est développée. Nous comparons par la suite le champ de pression calculé par SAM avec des mesures effectuées au laboratoire à l'aide d'un capteur TEKSCAN. Les mesures expérimentales sont effectuées pour plusieurs pressions de gonflage dans des cas de différents chargements.

Abstract

New technologies of materials and heavier vehicles generated today new conditions of bituminous pavements degradation. The surface layers, now thinner and subjected to intense traffic are more often damaged by rutting and cracks (so called "Top – down cracking"). Both degradation types are closely linked to the pressure generated by tire-pavement contact. In this paper, the tire pavement contact problem is placed in the term of contact and not of adhesion gum areas - aggregate. A model is developed to simulate the surface pavement stresses and compared with experimental tests at different inflation pressures and different loads. The model requires exact geometry of tire and equivalent Young's modulus. For this, optical methods based on fringe projection and photogrammetry provide relief displacement field. Estimation of Equivalent Young's Modulus is also proposed as a function of the inflation pressure from press load tests. The problem of road tire contact is placed in the term of contact pressure and the real tyre geometry is used. A semi analytical computation model is developed to simulate the surface pavement stresses and compared with experimental tests at different loads.

Introduction et position du problème

1.1 Préambule

La réalisation et la maintenance du réseau routier entraînent des coûts financiers importants, des pollutions dues à l'utilisation d'une matière première pétrolière et une consommation énergétique élevée lors de son élaboration (160°C). L'enjeu de la construction routière devient donc un compromis entre la qualité mécanique de la chaussée et les coûts. L'apparition de nouveaux matériaux associée à une diminution de l'épaisseur des couches de surface et combinée à une augmentation des chargements des poids lourds et de leur fréquence de passage a entraîné de nouvelles pathologies de dégradation des chaussées. Outre les problèmes d'orniérage bien connus, on trouve désormais l'apparition de fissures descendantes (top down cracking) ainsi que des problèmes de décohésion aux interfaces. Cette étude propose de répondre scientifiquement et concrètement à ces pathologies. Les revêtements doivent aussi être remplacés pour des questions d'adhérence avec l'usure des granulats, cette problématique ne sera pas abordée.

Aujourd'hui, les codes de dimensionnement des chaussées se limitent à une idéalisation du contact par un chargement uniforme. La méthode actuelle qui dimensionne les chaussées de façon "rationnelle" est une méthode semi-empirique pour laquelle le critère principal de dimensionnement est la prise en compte de la fatigue des couches inférieures. La résistance des couches de surface est vérifiée par des essais de laboratoire qui permettent de vérifier la tenue à l'eau et à l'orniérage. Les efforts de cisaillement ne sont pas pris en compte, sauf étude particulière.

Les recherches relatives aux pathologies des dégradations de surfaces sont très récentes. Celles-ci touchent :

- les comportements des matériaux de surface,
- la description des chargements qui provoquent ces dommages.

Pour cette raison, les paragraphes qui suivent montrent successivement le positionnement scientifique consacré exclusivement aux dégradations de la surface (fissuration et orniérage) nécessitant une approche réaliste de la description du chargement.

En effet, les actuelles méthodes rationnelles de conception quantifient la durée de vie totale de la chaussée (20 ou 30 ans) où les pathologies de rupture proviennent à l'inverse des couches profondes des chaussées et remontent vers la surface (remontée de fissuration, fatigue des couches d'assise, orniérage de la plateforme support de chaussée).

Il est clair qu'avec l'augmentation des pathologies par la surface, le besoin d'une nouvelle méthode rationnelle pour la conception des rechargements ou renforcements, s'accroît. Durant la durée de vie totale de la structure, les couches de surface subissent plusieurs cycles de dégradation et donc de réparation (de l'ordre de quelques années). Cette dernière phase est originale et comporte encore peu de travaux de recherche.

Cette étude vise à obtenir une conception rationnelle des couches de surface qui prend en compte les sollicitations réelles modélisées à partir du contact pneumatique-chaussée. Cette amélioration de la conception doit conduire à améliorer la tenue des chaussées dans les zones les plus sollicitées, vis à vis de l'orniérage et de la fissuration avec des matériaux adaptés. Le travail dans cette tranche vise à proposer une modélisation du contact pneu-chaussée par une modélisation semi-analytique du laboratoire LaMCoS en vue d'être capable de décrire correctement les dégradations de surface tels l'orniérage, les fissurations descendantes (Top-down cracking) et les décohésions des couches de surface.

1.2 Le contact pneu-chaussée

En 2015 [1] [2], nous avons étudié la faisabilité de l'étude du contact pneu-chaussée sur un pneu lisse par un code de calcul semi-analytique (SAM) développé au LaMCoS par Nélias et al.[3], Aujourd'hui, pour plus de réalisme, nous réalisons les calculs du contact avec la géométrie réelle d'un pneumatique de poids lourd. La géométrie du pneu est introduite dans le code de calcul suite à une numérisation par photogrammétrie. Nous comparons par la suite le champ de pression calculé par SAM avec des mesures effectuées au laboratoire à l'aide d'un capteur résistif de dernière génération de marque Tekscan.

A l'heure actuelle dans la plupart des études, les chargements dus aux pneumatiques sont simplifiés le plus souvent assimilés à une pression circulaire constante dont les valeurs sont obtenues par des mesures telles que présentées par Blab et Harvey [4], ou par un calcul numérique comme par exemple par Wang et Roque [5]. Certains auteurs comme Wang et Al-Qadi [6] ont présenté un modèle où une charge transitoire est déplacée au-dessus de la surface de la chaussée. Une interaction pneu-chaussée 3D en élément finis statique a été présenté par Wang et Roque [5] ainsi qu'un modèle numérique éléments finis pour le couplage pneu-chaussée en chargement roulant statique présenté par Wollnya et al [7]. Ces modélisations utilisant les éléments finis sont des grands consommateurs de temps de calcul. Pour mieux rendre compte de la réalité du contact, depuis 20 ans, Morris De Beer [8] a réalisé des mesures expérimentales précises sur un contact réel pneu-chaussée. Ces mesures sont largement exploitées par un grand nombre de chercheurs dans des codes à éléments finis afin d'accéder à toutes les contraintes présentes dans les couches de surface des chaussées. Les mesures des contraintes à l'intérieur de la couche de roulement sur manège de fatigue menés par Grellet [9] ont montré aussi la nécessité de travailler en présence d'un contact réel.

Comportement des couches de surface

Deux pathologies reconnues sont à considérer : l'orniérage et la fissuration par fatigue.

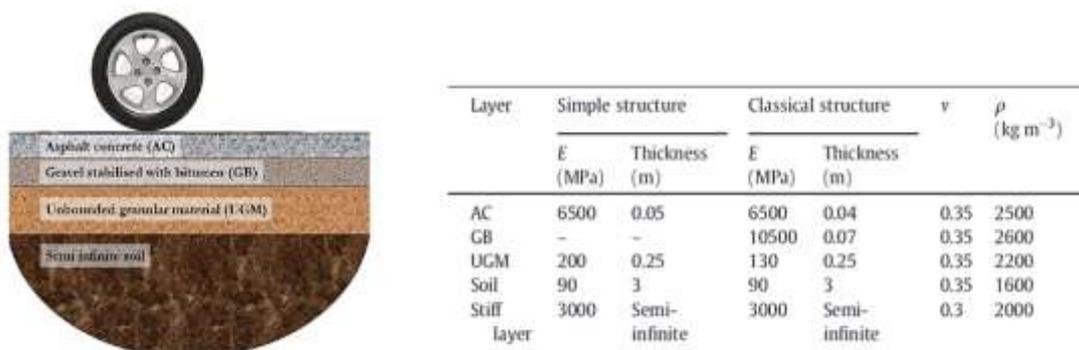


Figure 1 : Structure d'une chaussée souple (issu de [8])

Une chaussée est une structure multicouche composée d'une couche de roulement (AC), d'une couche de forme (GB), d'une couche de base (UGM) et d'une fondation (sol). Les épaisseurs de couches peuvent être variables. Un exemple d'une chaussée souple est donné sur la figure 1. Les données mécaniques (élastique) sont présentées sur cette même figure.

Mécanisme de dégradation sous contact

Une chaussée est soumise à deux types de sollicitation : mécanique et thermique. La compression répétée entraîne une déformation permanente par orniérage et la traction répétée à l'avant et sur les bords du pneumatique des phénomènes de fatigue qui conduisent à la fissuration (cf. Fig 2).

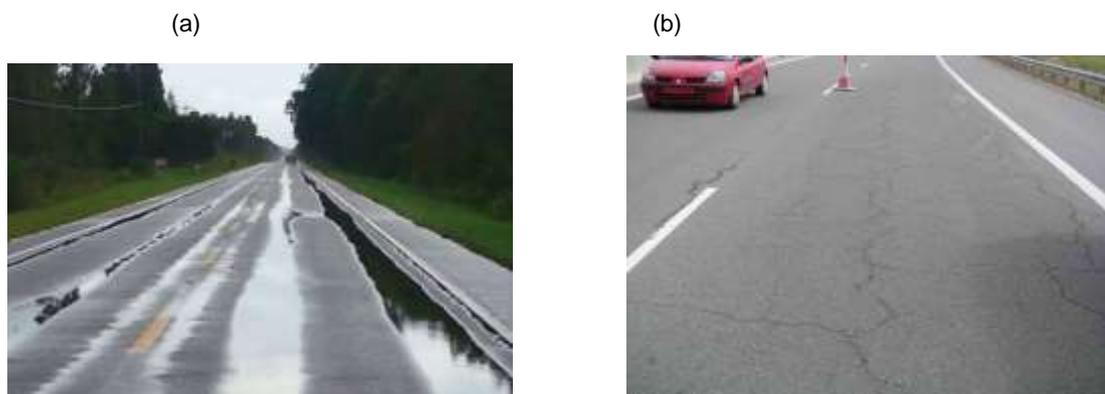


Figure 2 : (a) Orniérage, (b) fissuration

Orniérage

Dans le cas de l'orniérage, Les études bibliographiques ont permis de mettre en évidence des aspects phénoménologiques importants du comportement mécanique directement associés à l'apparition et l'accumulation des déformations permanentes des matériaux bitumineux, origine du phénomène d'orniérage des couches de surfaces :

- les susceptibilités thermiques et cinétiques expriment l'influence de la température et du temps de sollicitation sur le comportement des matériaux bitumineux. L'influence de la température se manifeste à travers des changements des propriétés mécaniques avec la température. Les essais d'orniérage en laboratoire sont réalisés à 60°C (essai normalisé). Pour rappel, au cours des étés caniculaires (1976, 2003...) les températures des couches de surface ont dépassé ces 60°C. L'influence du temps se traduit par l'influence de la durée de sollicitation et de la vitesse (fréquence) de sollicitation.

- les sollicitations cycliques provoquent l'apparition et l'accumulation, avec le nombre de cycles de chargements, des déformations permanentes des matériaux bitumineux.
- l'apparition des déformations permanentes est provoquée par des déformations plastiques du squelette granulaire de type translation/rotation relatives des grains, accompagnées par des déformations visqueuses de type fluage du liant enrobant les particules. Ce mécanisme révèle de nouveau l'influence de la température, l'origine plastique des déformations permanentes et le rôle important des contraintes de cisaillement.

En considérant ces aspects, de nombreux travaux ont montré certaines avancées dans la modélisation des déformations permanentes des matériaux bitumineux et la nécessité d'un

modèle capable de simuler non seulement les chargements monotones (compression uniaxiale et fluage) mais aussi les sollicitations cycliques.

Un modèle qui décrit le comportement cyclique mais avec un temps de calcul réduit serait sans doute un grand pas vers les calculs mécaniques d'orniérage des structures routières. Actuellement, ces calculs se font principalement à travers des relations empiriques ou des modèles élastiques multicouches. L'originalité de l'approche proposée dans ce projet consiste à appliquer la théorie de plasticité, viscoplasticité à la modélisation des matériaux bitumineux sous sollicitations monotones et cycliques permettant ainsi de prendre correctement en compte l'origine physique et mécanique du phénomène d'orniérage des couches de surfaces.

Fissuration

Pour la fissuration par fatigue, les dégradations à partir de la surface sont relativement récentes et pas prises en compte dans les dimensionnements. Les conférences internationales de la RILEM sur le thème « Reflective Cracking in Pavement » ont depuis l'origine en 1989 et tous les 4 ans ensuite montré et discuté des problèmes de remontée de fissuration dans les chaussées. Les premiers auteurs, Leslie Meyer et al. [12] . [13] qui ont commencé à évoquer la fissuration de surface (top-down cracking) n'étaient pas pris au sérieux. Et pourtant, depuis d'autres se sont rajoutés et des observations ont démontré l'existence de ces pathologies.

Enfin, de récents travaux de l'équipe ont démontré que l'origine de dégradations pouvait provenir de faiblesses de l'interface couche de base / couche de surface (Ambassa et al., 2013, Ktari et al., 2016).

L'enjeu est à moyen terme d'intégrer le pneumatique réel et le comportement thermo-visco-élasto-plastique de la couche de surface pour simuler l'orniérage et la fissuration. Aujourd'hui la littérature scientifique dans le domaine du Génie Civil est assez pauvre à ce sujet pour plusieurs raisons : les spécialistes de mécanique des contacts se sont encore assez peu intéressés au contact pneumatique-chaussée préférant les applications aux roulements, engrenages, et contacts roue-rail. Par ailleurs les codes commerciaux, qui sont principalement basés sur la méthode des éléments finis, ne permettent pas actuellement de traiter dans un temps raisonnable et avec une précision numérique acceptable les problèmes de contact roulant/glissant/frottant inélastiques tridimensionnels.

Par ailleurs, la modélisation du contact entre un pneu et la chaussée présente un certain nombre de challenges qui, même pris individuellement, restent à la frontière de nos connaissances :

- effet de la plasticité sur les contraintes résiduelles et les empreintes résiduelles (principalement pour la chaussée),
- effet de la viscosité sur la dissipation pour une charge roulante (principalement pour le pneumatique),
- effet d'un revêtement dans un contact inélastique (bande de roulement, souvent d'épaisseur voisine de la profondeur de Hertz ce qui est une aberration au niveau de la tenue mécanique),
- fissuration (en surface) et délamination à l'interface revêtement/substrat dans un contact inélastique,

- prédiction des zones de glissement et d'adhérence dans un contact inélastique, etc ...

Nous ne pourrions néanmoins pas étudier ici et synthétiser de manière exhaustive ce qu'il se passe lorsque toutes les physiques sont activées en même temps et à toutes les échelles dimensionnelles du contact, mais nous essayerons d'apporter des réponses ciblées dans ce domaine qui commence juste à s'ouvrir.

Plusieurs travaux de l'industrie des pneumatiques ont conduit à des simulations très précises par éléments finis 3D. Ces calculs sont la plupart du temps extrêmement coûteux en temps de calcul pour une application dans l'industrie routière. Ils sont généralement limités aux sollicitations quasi-statiques ou stationnaires. Notre objectif vise donc à conduire à l'utilisation d'un outil simple et rapide utilisant une approche tribologique semi-analytique appliquée au contact pneumatique-chaussée. Des travaux collaboratifs entre le GEMH et le LaMCoS déjà initiés en 2015 ont permis de valider l'utilisation du modèle dans le cas d'une chaussée plane et d'un pneu lisse, (Reynaud, [1]). Nous proposons dans notre étude de déterminer la forme géométrique exacte du pneumatique par projection de franges ou par photogrammétrie pour l'introduire dans le modèle semi-analytique rapide et robuste ISAAC, Manyo, [14]. La vérification des dimensions de l'empreinte réelle du contact sous un chargement donné nous permettra de valider le modèle géométrique du pneu ainsi que ses caractéristiques mécaniques. L'enjeu est à moyen terme d'intégrer le pneumatique réel et le comportement visco-élasto-plastique endommageable de la couche de surface (Chaise, 2011 et Koumi, 2015).

Ce travail présente une comparaison entre les résultats d'un modèle semi-analytique de contact pneu chaussée adapté d'un modèle (appelé SAM) issu d'application en tribologie (contact bille-plan) et des mesures effectuées au laboratoire avec un capteur de pression de surface résistif récent. Dans une première étape, en statique, le contact est considéré comme un contact Hertzien. Nous déterminerons la forme géométrique du pneumatique à introduire dans le modèle par une technique de photogrammétrie. Dans un second temps, nous mesurons le module d'Young équivalent du pneumatique à introduire dans le modèle semi analytique. Dans la modélisation, on considère que la surface de la chaussée est plane et lisse et nous appliquons un chargement analogue au chargement réel sur un pneu de camion. Par la suite nous réalisons les calculs de pression de contact que nous comparons avec les valeurs mesurées par le capteur de pression Tekscan. Les résultats expérimentaux en laboratoire en termes de surface et de forme de contact, de déformation du pneumatique seront confrontés aux résultats de calcul.

La collaboration entre le Laboratoire "GEMH" de l'université de LIMOGES (Génie Civil) et le laboratoire « LaMCoS » de L'INSA de LYON (tribologie) a permis l'adaptation d'un code de calcul semi analytique (SAM), développé pour le calcul des roulements à billes, au problème du contact pneu-chaussée.

1.3 Projet DVDC , Tranche 1

Ce travail présente une première approche du contact pneu-chaussée par un modèle semi-analytique adapté d'un modèle (appelé SAM) issu d'application en tribologie (contact bille-plan) et des mesures effectuées au laboratoire avec un capteur de pression de surface résistif récent. Dans une première étape, le contact est considéré comme un contact Hertzien. Dans la modélisation, on considère que la surface de la chaussée est plane et lisse et nous appliquons un chargement analogue au chargement réel sur un pneu de camion. Nous déterminerons la forme géométrique du pneumatique à introduire dans le modèle par une technique de photogrammétrie. Dans un second temps, nous mesurons le module d'Young équivalent du pneumatique à introduire dans le modèle semi analytique. Par la suite nous réalisons les calculs de pression de contact que nous comparons avec les valeurs mesurées par le capteur de pression Tekscan.

Le programme expérimental et numérique prévoit de faire varier les paramètres d'entrée sensibles :

- type de pneu,
- pression de gonflage,
- charge sur la roue,

La modélisation nécessite d'introduire les propriétés mécaniques des matériaux comme le module d'Young (en première approche le comportement est supposé élastique). Deux hypothèses seront testées pour la modélisation du pneumatique :

- cas 1, matériau homogène qui nécessite l'identification d'un module équivalent.
- cas 2, bi-matériau où la couche de roulement en caoutchouc strié sera collée sur la structure homogène du cas 1.

Dans les deux cas, le module équivalent du cas 1 sera fortement connecté à la pression de gonflage.

- Une fois les paramètres de sortie du logiciel validé, une première analyse de vulnérabilité de la couche de surface pourra être envisagée en fonction des paramètres clés (pression, charge, type pneu,...)

2 Modélisation Avancée du Contact (code SAM)

2.1 Approche Tribologique , code SAM

Le problème du contact élastique entre deux solides de révolution est présenté sur la figure 3. Les deux corps en contact ont des rayons de courbure distincts R_1 et R_2 . Le rayon de courbure équivalent R_{eq} des corps en contact ($1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$) permet l'obtention d'un module d'élasticité équivalent E^* ($1/E^* = 1/E_1 + 1/E_2$) des deux surfaces en contact. Les équations de Hertz utilisées pour les petites déformations restent valables dans le cas du contact pneu-chaussée.

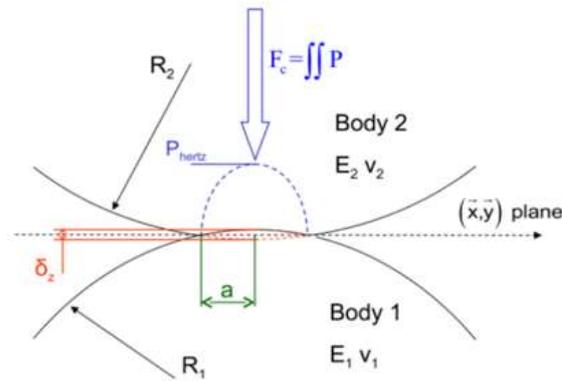


Figure 3 : Représentation schématique du contact hertzien entre des solides de révolution

Compte tenu d'une charge "Fc" (dans la suite on mettra F pour simplification) appliquée aux solides en contact, les paramètres de contact sont déduits. Le rayon de l'aire de contact "a", le déplacement du corps rigide " δ_z " et la pression de contact " P_{Hertz} " sont déduits de la charge appliquée suivant les formulations suivantes :

$$a = \left(\frac{3FR}{4E^*}\right)^{1/2} \quad (1)$$

$$P = P_{Hertz} \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right)^{-1/2} \quad |r| \leq a \quad (2)$$

$$P_{Hertz} = \frac{3F}{2\pi a^2} = \left(\frac{6FE^*2}{\pi^3 R^2}\right)^{1/3} \quad (3)$$

$$\delta_z = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9F^2}{16RE^*2}\right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (5)$$

Le problème tribologique appliqué depuis plusieurs années au contact bille-bague de roulement (cf. Figure 3) peut être transposé à l'échelle d'une roue roulant sur une chaussée. Ce contact peut être assimilé à un ellipsoïde roulant sur un plan. Nous utiliserons une ellipsoïde plutôt qu'un cylindre car un pneumatique possède un rayon de courbure non négligeable dans le sens transversal et de plus les effets de bords sur un cylindre parfait entraînent des pressions infinies sur les bords extérieurs du pneu. Les champs de pression générés entre deux corps en contact et de comportement élastoplastique, dont la charge de contact dépasse la limite élastique, ont été étudiés par Chaise et Nélias [9] et l'étude a été généralisée aux géométries de contact sphériques et elliptiques. Il est maintenant possible d'introduire une géométrie quelconque c'est pourquoi nous avons numérisé la forme du pneu afin de réaliser les calculs de contraintes dans la chaussée les plus réalistes possibles. Les données d'entrée du code de calcul SAM sont alors la géométrie du pneu et sa rigidité. Cette géométrie et cette rigidité sont déterminées dans la suite de l'étude. Notons que dans le contact pneu chaussée le frottement est considéré comme nul.

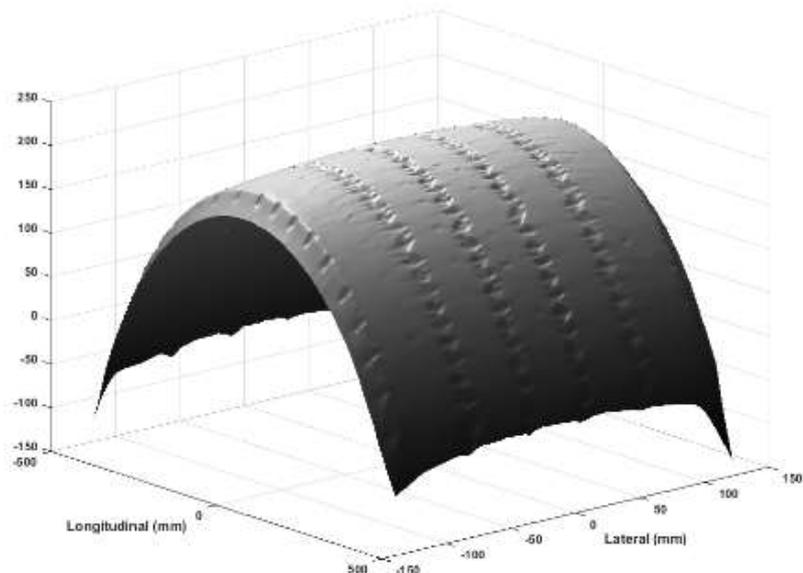
2.2 Détermination de la géométrie réelle du pneumatique par photogrammétrie

Le problème du contact pneu-chaussée provient aussi du fait que les géométries des pneumatiques ont une grande influence sur les pressions de contact, cette géométrie est à aborder à 2 échelles différentes. A l'échelle décimétrique, La forme du pneu est assimilable à un tonneau avec 2 rayons de courbure, ces 2 rayons de courbures dépendent en partie de la pression de gonflage. A l'échelle millimétrique, il est nécessaire de prendre en compte les stries ou sculptures présentes à la surface du pneu, nous montrerons que la forme et la dimension de ces sculptures ont une influence sur la pression de contact.

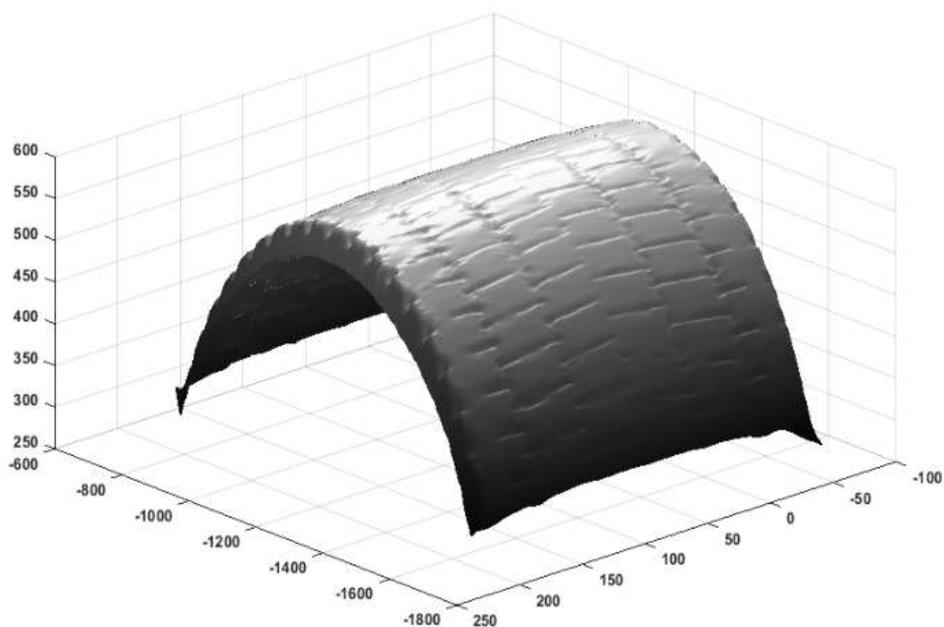
Nous avons besoin d'introduire un fichier de coordonnées de type (x,y,z) pour représenter la géométrie du pneu. La taille de la maille cubique utilisée pour représenter le pneu est de 2 mm. Afin de réaliser la numérisation de la géométrie exacte du pneumatique nous utilisons un appareil photo numérique. Nous effectuons, sur un quart du pneu environ, une prise de plusieurs clichés représentant une zone limitée du pneu avec une zone de recouvrement d'environ 80% pour chaque cliché (réalisation d'environ 50 clichés). Il est important de conserver la même profondeur de champ afin de multiplier les points analogues entre les différents clichés. Ensuite l'utilisation d'un logiciel permet de rechercher ces points analogues et de reconstituer la géométrie complète du pneu. Nous avons besoin de numériser moins d'un quart du pneu afin d'avoir une reconstitution correcte. Nous procédons comme suit :

- Calcul de la position et de l'orientation des prises de vues ;
- Édition du nuage de points lacunaire (uniquement les points analogues) ;
- Saisie d'un masque (isolement de l'objet d'étude) ;
- Génération du nuage de point densifié (récupération de tous les pixels identifiés des photographies) ;
- et enfin une génération du maillage qui va donner une image en 3D d'une fraction du pneumatique.

Ce quart de pneu reconstitué qui a la géométrie extérieure exacte du pneu réel est introduit dans le code de calcul SAM sous forme d'un solide dont les mailles sont des cubes de 2 mm de coté (le choix d'une maille de 2mm est une optimisation entre la précision souhaitée et le temps de calcul) . Ce solide est alors affecté d'une rigidité correspondant à la rigidité équivalente du pneu réel. Nous appliquons ensuite une charge croissante par paliers de 1000 N jusqu'à atteindre la charge finale.



Pneu Michelin



Pneu Bridgestone

Figure 4 : Géométrie de 2 pneus de poids lourds numérisée (Michelin et Bridgestone)

2.3 Détermination du module d'Young équivalent du pneu

Dans une première approche, le pneumatique est considéré comme un matériau homogène et isotrope dont nous mesurons le module d'Young équivalent pour différentes pressions de gonflage. Pour déterminer le module d'Young du pneu des essais de compression sont faits à différentes pressions de gonflage car la rigidité du pneu varie en fonction de la pression de gonflage. Pour choisir une loi linéaire nous assimilons le pneu à un cylindre, nous avons choisi le modèle de force de contact linéique de Lankarani & Nikravesh [10] comme le montre l'équation (5). Dans ce modèle F est l'effort de chargement δ_z la déflexion du pneu.

Nous allons déterminer la valeur k qui s'ajuste avec les valeurs expérimentales et ensuite utiliser la formule de k pour déterminer le module du pneu. La pression de gonflage du pneu est quasi invariante sous chargement, le pneu sera supposé incompressible, coefficient de poisson égal à 0,5. Nous déterminons une relation analytique entre le module et la pression de gonflage du pneu comme la montre la figure 5.

$$F = k\delta_z^{1.11} \quad (6)$$

$$k = \frac{4}{3}E^*R^{1/2} \quad (7)$$

$$E^* = \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right] \quad (8)$$

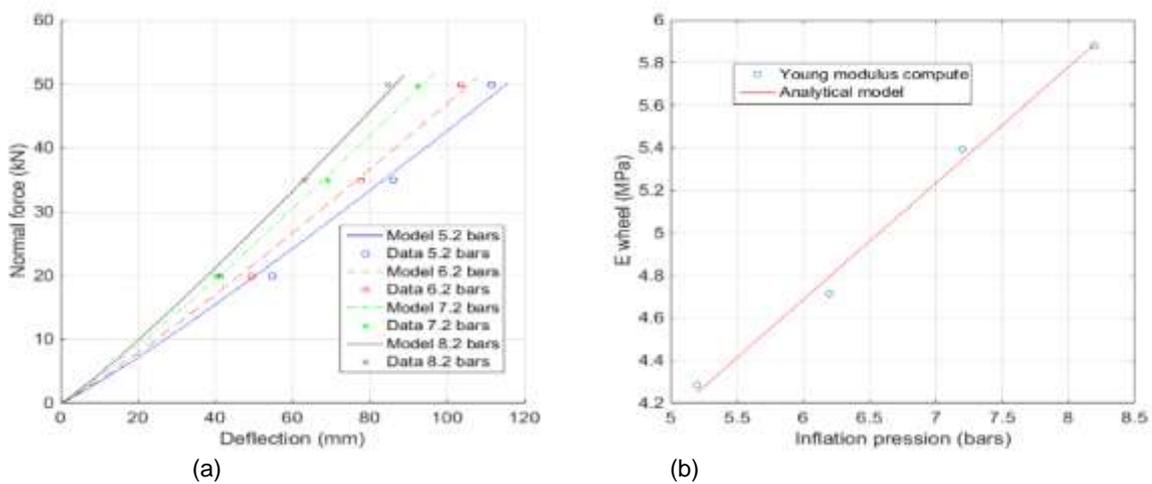


Figure 5 : Courbes expérimentales force/déflexion à différentes pressions de gonflage (a); module d'Young du pneu calculé et modèle analytique

Dans une seconde approche, le pneumatique est considéré comme un matériau homogène et isotrope revêtu d'une couche de caoutchouc (de 10 ou 20 mm) de module différent (50 MPa).

3 CALCUL DES CONTRAINTES GENEREES PAR LE PNEU

3.1 Mesures des aires de contact, empreintes du pneu

A la suite de la détermination des modules d'young équivalents et des géométries réelles des pneumatiques nous avons effectué sur une presse électromécanique Zwick (figure 6) des mesures des empreintes sur une plaque d'acier.

Nous avons enduit le pneu de graphite, appliqué les différentes charges a étudier et mesuré les dimensions de l'empreinte reportées sur un papier (figure 8). Nous comparons ensuite les dimensions mesurées avec les dimensions de l'empreinte calculée par SAM (figure 7).

Dans tous les cas de chargements (2500 kg, 3500 kg et 5000 kg) et de gonflages (6.2 bars, 7.2 bars et 8.2 bars) l'écart entre les mesures et les calculs ne dépassent pas 3.5 % au niveau des dimensions des empreintes (longueurs et largeurs). Ce premier résultat valide l'utilisation du code de Calcul SAM.

Notons que pour un pneu gonflé normalement à 8,2 bars sous une charge de 3500 kg nous obtenons une pression de contact moyenne de 0.66 MPa, pression utilisée dans le logiciel actuel de dimensionnement ALIZE. On peut néanmoins remarquer que dans cette configuration les pressions maximales calculées par SAM atteignent 1.8 MPa.



Figure 6 : Montage du pneu Michelin sur la presse Zwick

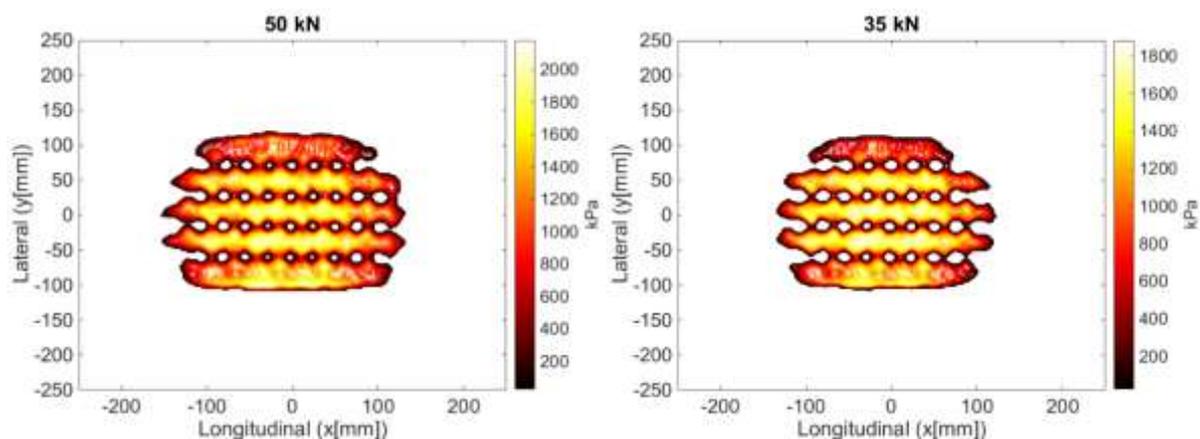


Figure 7 : Empreintes suite à un chargement par SAM



Figure 8 : Empreintes du pneu suite à un chargement sous presse reportées au graphite sur papier (50KN à gauche et 35 KN à droite)

3.2 Calcul des pressions de contact et validation expérimentale

3.2.1 Cas d'un pneu de structure homogène

Dans les calculs que nous effectuons, nous considérons donc la géométrie réelle du pneu pour une pression de gonflage qui sera ici de 8,2 bars et nous adoptons un module d'Young équivalent de 5,88 MPa et un coefficient de Poisson de 0,5. Nous considérons une chaussée parfaitement lisse de module d'Young 5000 MPa et un coefficient de Poisson de 0,35.

Afin de vérifier les résultats des calculs des pressions de contact déterminés par SAM nous effectuons des mesures de ces pressions par un capteur de pression de marque Tekscan (Le système Tirescan 7105 supporte l'affichage temps réel des pressions de contact de pneu et l'enregistrement de clichés et séquences, pouvant être lus et analysés dans le logiciel Tirescan ou exportés. Ce capteur se présente sous la forme d'un film mince de 700 mm par 500 mm sur lequel sont répartis des capteurs élémentaires carrés de 3 mm de côté dont la résistivité varie en fonction de la pression normale appliquée. Nous réalisons ainsi une mesure du champ de pression sur la totalité de l'empreinte du pneumatique lorsque celui-ci est soumis à un chargement statique ou un roulement sans couple moteur ni freinage.

On peut noter sur la figure 9, qui est un cas de surcharge du pneu, une très bonne corrélation entre les valeurs de pression de contact mesurées à gauche par le capteur Tekscan et les pressions de contact calculées par SAM à droite. Le temps de calcul est de 10 secondes dans cette configuration. Les pressions de contact dues à la présence de stries sur le pneu atteignent 1,8 MPa localement alors que la pression moyenne pour un pneu lisse serait de l'ordre de 0,7 MPa. Il est donc important de considérer la géométrie réelle du pneu lors de l'étude des contraintes en surface. Les modèles utilisés actuellement qui considèrent un chargement uniforme et une pression de contact équivalente à la pression de gonflage minimisent la pression de contact réelle au niveau de la surface de la couche d'enrobé.

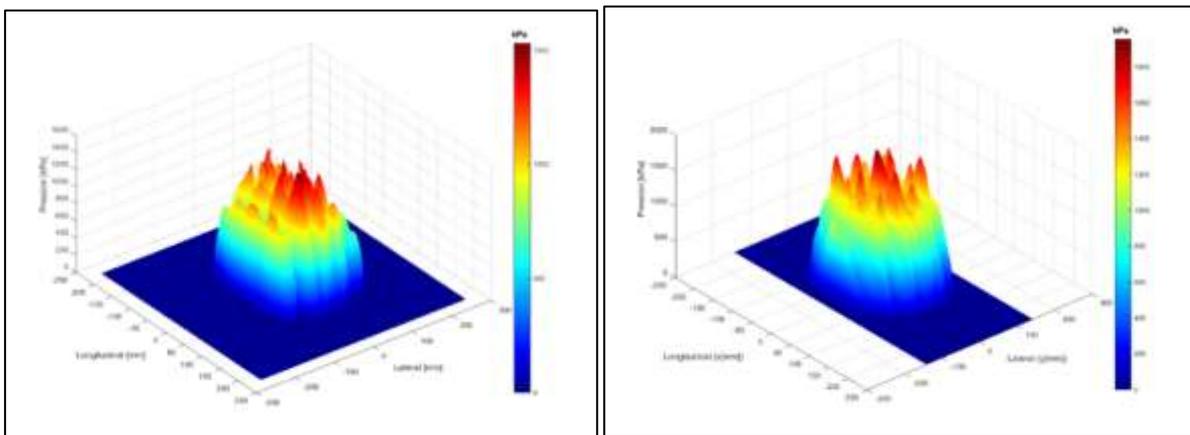


Figure 9 : Répartition des pressions de contact mesurée (à gauche Tekscan) et calculé par SAM (à droite) pour un même pneumatique et une même charge (8,2 bars, 50 kN)

Sur la figure 10, pour des chargements plus faibles, on note aussi des valeurs de surpression importantes qui imposent de tenir compte de la présence des stries lors de l'étude du contact pneu-chaussée. Les pressions de contact maximales dépassent 1.5 MPa ce qui correspond à plus du double des pressions de contact utilisées dans les codes de conception actuels. La bonne corrélation entre les calculs effectués par SAM et les mesures fournies par le capteur Tekscan nous permettent de valider l'utilisation du code SAM dans la détermination des contraintes normales présentes au sein d'un contact pneu-chaussée. Il est important de noter

que la vitesse de calcul du code SAM (environ 20 secondes pour un maillage cubique de 2 mm de coté) permet de réaliser rapidement des études paramétriques pour ce type de contact.

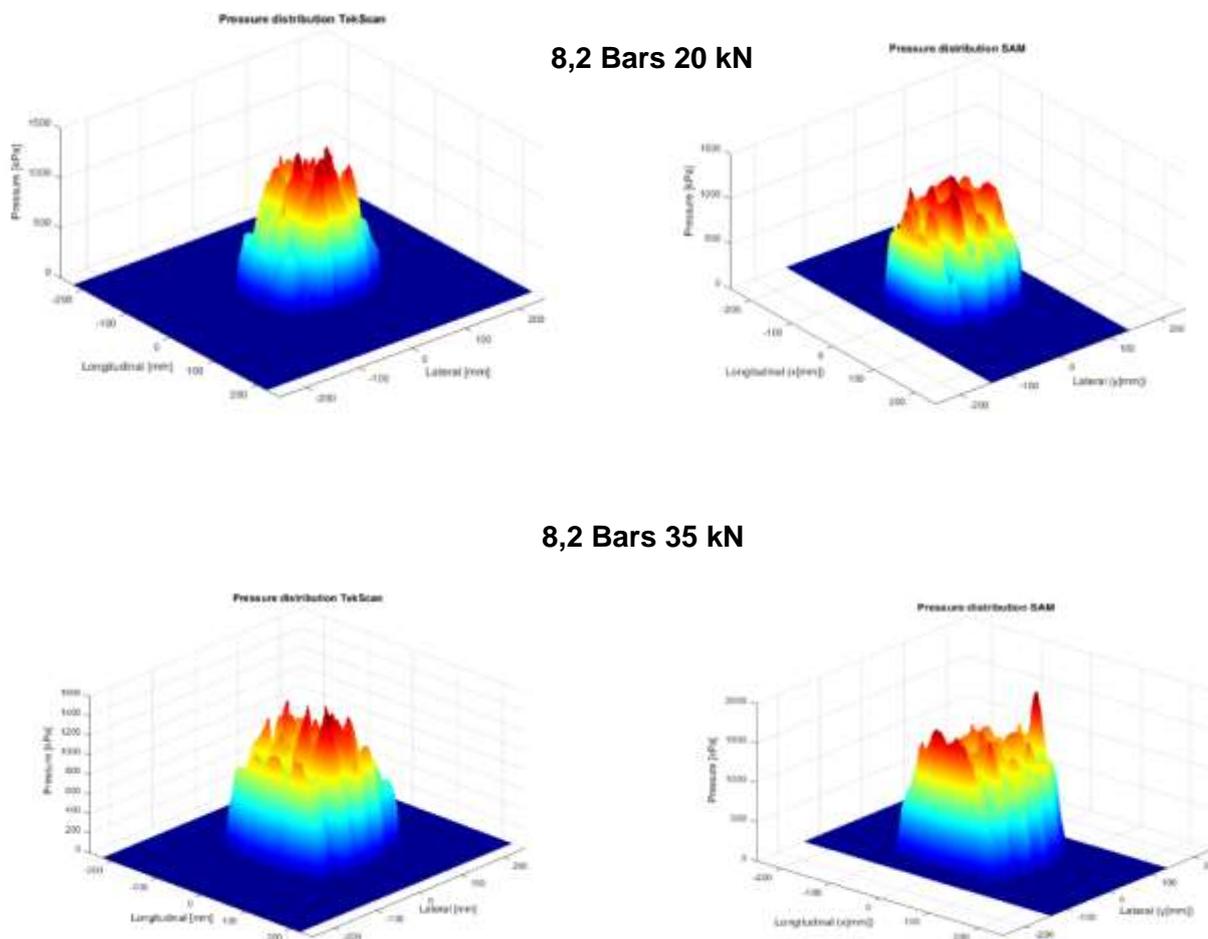


Figure 10 : Comparaison entre les mesures TekScan et les calculs effectués par SAM
Pour 20 kN (60% de la charge admissible) pour 35 kN (dépassement de 5 % de la charge admissible)

3.2.2 Comparaison entre un pneu homogène et un pneu multicouche

Afin de lever le doute sur notre approche qui consiste à négliger la bande de roulement en terme de rigidité, nous avons effectué des calculs de pression de contact en considérant un pneu multicouche. La couche extérieure du pneu aura une rigidité équivalente à celle du caoutchouc (environ 50 MPa) et fera soit 10 soit 20 mm d'épaisseur.

On peut remarquer sur la figure 10, suite aux calculs effectués par SAM que le fait de préciser l'existence d'une couche plus raide à la surface du pneu n'avait aucune influence en terme de pression de contact.

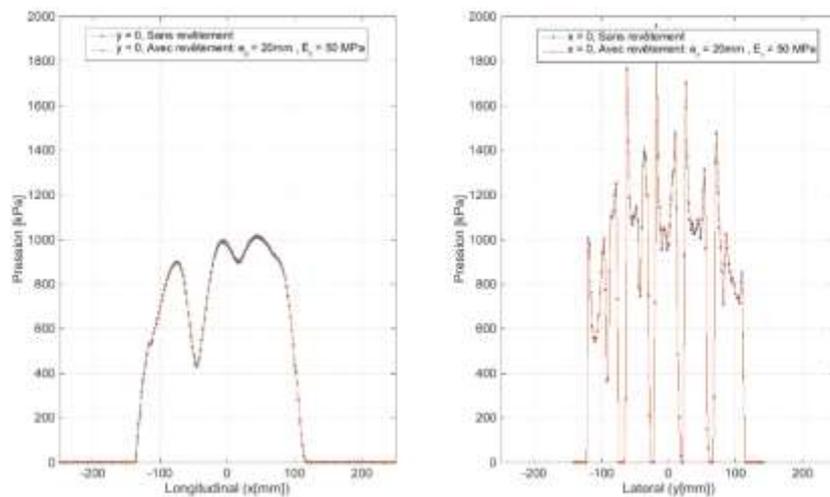


Figure 10 : Comparaison entre des pressions de contact générées par un pneu homogène (en bleu) et un pneu multicouche avec 20 mm de caoutchouc (en rouge)

Suite à ces calculs, dans tous les cas, nous continuerons donc à modéliser le pneu comme étant un matériau homogène et isotrope ayant pour rigidité le module d'Young équivalent déterminé sous presse par essai de compression.

3.3 Evolution de la contrainte normale à l'intérieur de la couche de surface

SAM nous permet aussi de faire une analyse de la répartition de la pression de contact à l'intérieur même de la couche de surface (figure 11). Nous pouvons voir ici que l'effet des stries du pneu s'estompe totalement à une profondeur de 5 cm. Pour des études en sous couche au-delà de cette profondeur et dans les mêmes conditions de chargement que le cas présent, il n'est pas nécessaire de prendre en considération la géométrie exacte du pneu, on peut utiliser plus simplement un pneu lisse. En revanche, en surface, il est important de tenir compte de l'effet des stries car celles-ci entraînent des pics de pression qui peuvent être responsables de dégradations donc on peut donc s'attendre à ce que la dégradation des couches de surfaces dépende fortement des sculptures du pneu.

Nous n'avons réalisé des calculs et des mesures de pression de contact que sur une chaussée lisse et l'introduction de la géométrie réelle de la chaussée sur le même mode que la géométrie du pneu (photogrammétrie) est en cours de mise au point. Tout laisse à penser que les pressions de contact locales seront encore plus importantes que celles calculées et mesurées qu'en présence d'une surface de chaussée lisse.

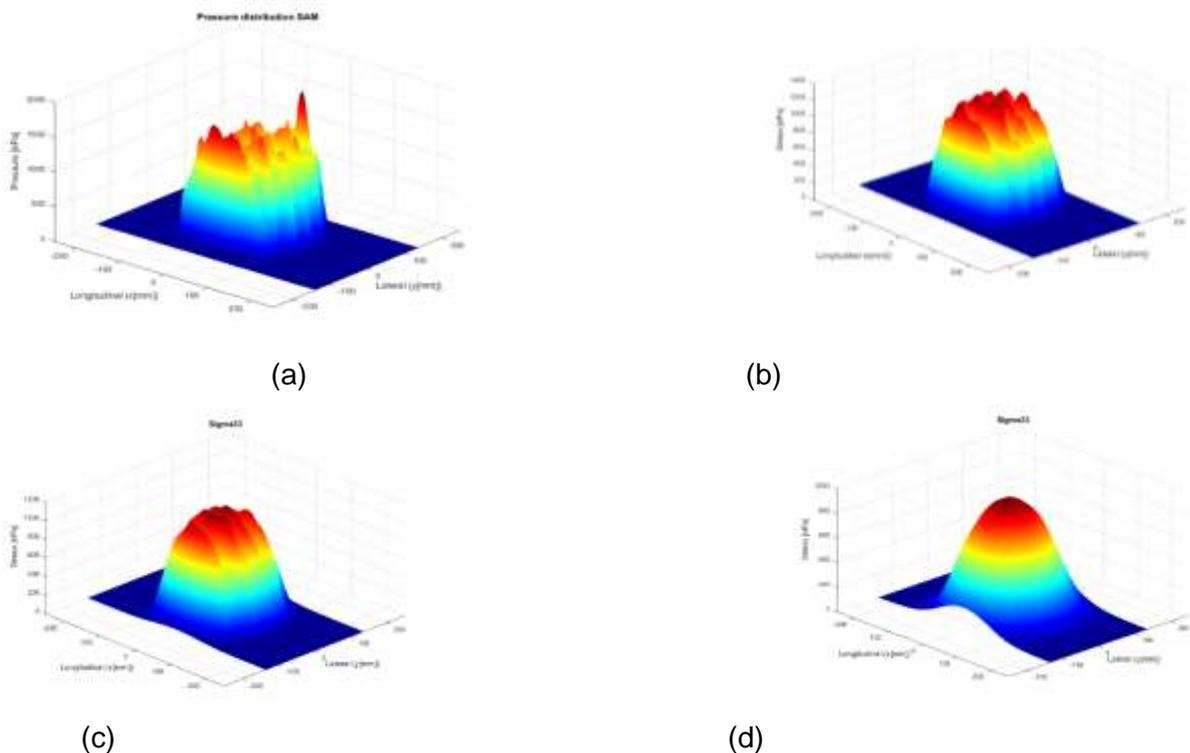


Figure 11 : Contraintes normales à différentes profondeurs pour un chargement de 35 kN :
(a) en Surface, (b) à 1 cm (c) à 2 cm (d) à 5 cm

3.4 Calcul des contraintes de cisaillement

Nous avons calculé en surface le cisaillement latéral maximal au droit des flancs du pneu et responsable des fissures dans le sens du déplacement du pneu, ces contraintes atteignent près de 0.4 MPa en statique, voir figure 12.

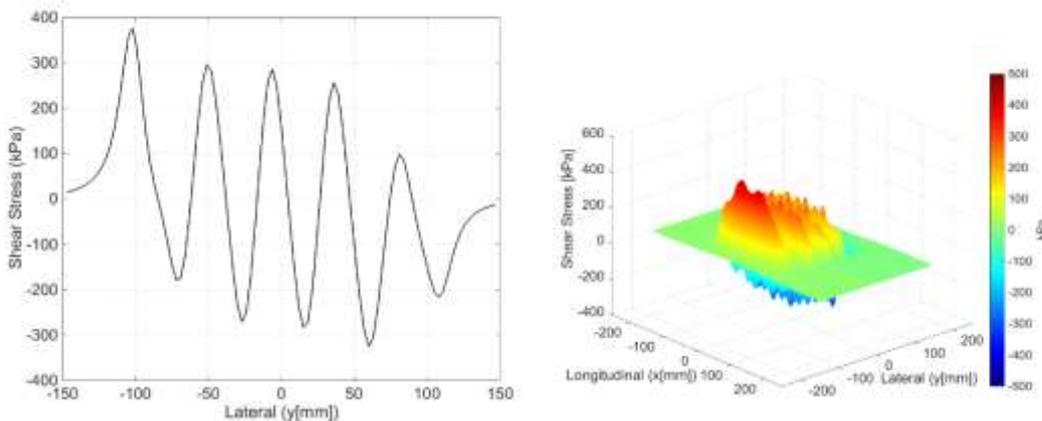


Figure 12 : cisaillement latéral en 2D et 3D a l'arrêt

Nous avons aussi effectué le calcul du cisaillement longitudinal qui reste inférieur à 0.25 MPa voir figure 13.

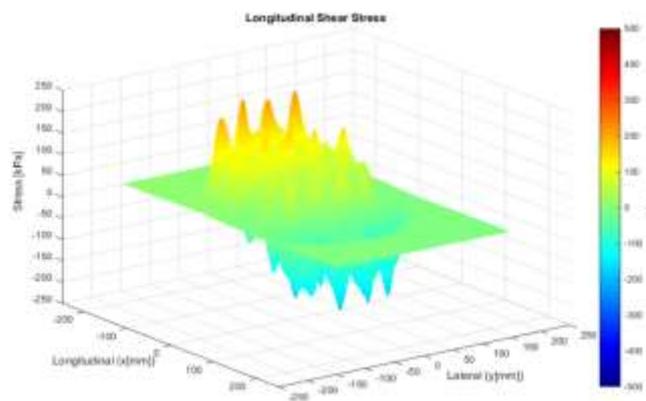


Figure 13 : cisaillement longitudinal en 3D a l'arrêt

Dans la tranche 2 en roulement, les calculs des cisaillements et des efforts de traction en surface et à l'intérieur de la couche de roulement pourront nous donner des informations sur les risques de fissurations longitudinales et transversales du haut vers le bas.

3.5 Critère de Von Mises (comparaison ALIZE / SAM)

Nous avons comparé les états de contraintes suivant le critère de Von Mises pour les deux cas de chargement, le chargement effectué par Alizé (chargement uniforme circulaire pression de contact moyenne de 0.667 MPa, Figure 14) et le chargement d'un pneu réel sur une chaussée lisse par SAM (Figure 15).

On peut constater que l'on a **une sous-estimation des contraintes maximales d'environ 30 %** en utilisant Alizé.

D'autre part on remarque que les zones de contraintes élevées proches de la surface (dans les 20 premiers millimètres de la couche n'apparaissent pas en utilisant Alizé. Ces contraintes élevées en surface peuvent être à l'origine du phénomène de création des fissures descendantes.

On remarque aussi que le maximum des contraintes se situe entre 50 et 80 millimètres donc souvent dans l'interface entre la GB et la couche de roulement, ce qui pourrait expliquer les phénomènes de délamination.

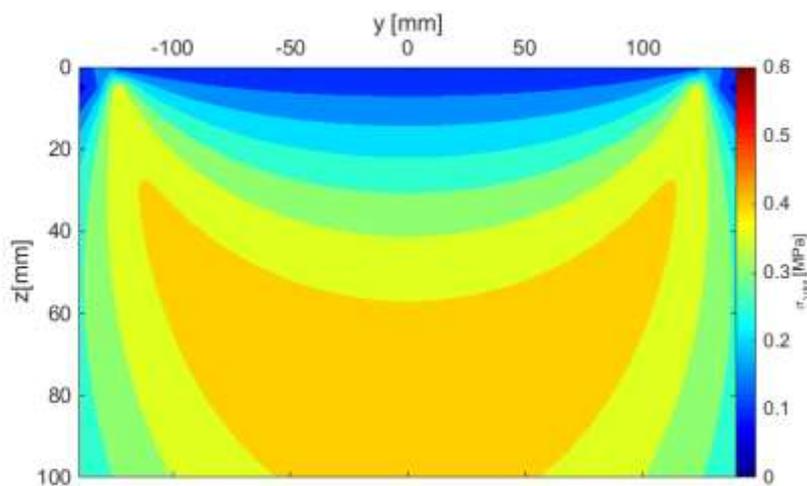


Figure 14 : critère de Von Mises, chargement selon Alizé

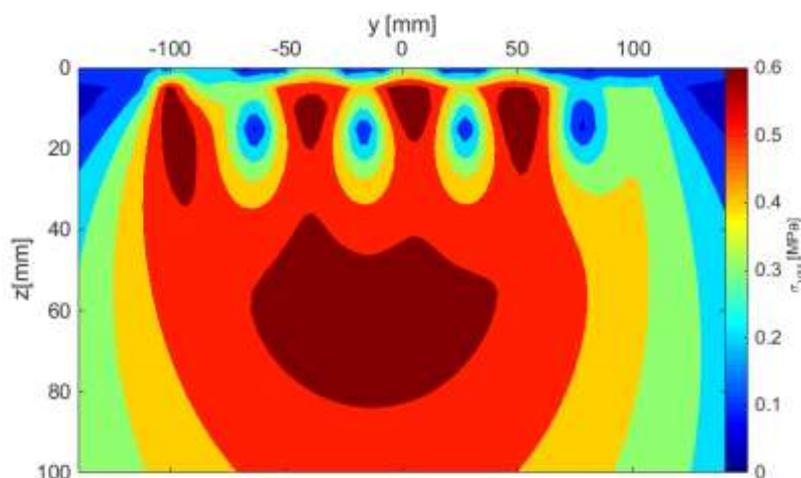


Figure 15 : Critère de Von Mises, chargement selon SAM

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1 Conclusions tranche 1

Les travaux prévus lors de cette tranche 1 ont été réalisés, ils nous ont permis d effectuer :

- La validation de SAM pour l'étude du contact pneu-chaussée par la mise en évidence de corrélation entre mesure et simulation (avec Tekscan) ;
- L'intégration des formes et les rigidités réelles des pneumatiques ;
- L'utilisation de SAM , un code de calcul plus précis plus réaliste et plus rapide que ceux utilisés à l'heure actuelle => effet de la structure du pneu en profondeur
- Les calculs des valeurs des contraintes de cisaillement maximales ;
- Les calculs des pressions de contact et de montrer que ces valeurs **sont minimisées** en surface dans les codes de dimensionnement actuels ;
- Les calculs de pneus bicouches qui se sont avérés inutiles à notre de mesures l'effet de la couche de caoutchouc est négligeable sur la distribution des pressions de contact.

Cette approche a permis la validation de SAM pour **l'analyse du contact pneu-chaussée**, plus **précis** et plus **réaliste** (intégration des formes et des rigidités réelles des pneumatiques) et surtout plus **rapide** que ceux utilisés à l'heure actuelle (un calcul de contraintes pour un pneu et un chargement donné dure moins de 30 secondes). Il permet d'avoir accès aux pressions de contact réelles qui étaient minimisées jusqu'alors. Le modèle associé au code de calcul semi analytique SAM permet aussi d'avoir une connaissance rapide des profondeurs et des valeurs de **toutes les contraintes présentes dans les couches de surface** ; ceci doit permettre au concepteur de chaussées d'évaluer les problèmes de fissurations, d'orniérage et de décohésions des couches de roulement.

4.2 Perspectives

Par la suite, en condition de roulement, nous intégrerons aussi les efforts longitudinaux et transversaux présents dans un contact réel pneu-chaussée (phases de virage, freinage et accélération). Enfin, dans de futurs développements, nous aborderons l'aspect visco élastoplastique du revêtement et les problèmes énergétiques du roulement tant d'un point de vue pneumatique que d'un point de vue chaussée.

Ce projet de recherche en collaboration avec le LaMCoS a été présenté à l'ANR en juin et a été retenu, il est présenté sous l'acronyme MACADAM (Modélisation Avancée des Chaussées : Applications aux Dégradations et à l'Amélioration de la Maintenance)

Dans les 4 années qui viennent, 2 thèses vont être soutenues et un simulateur original va être conçu au laboratoire d'Egletons sur une fosse reproduisant une chaussée grandeur nature en température contrôlée. Le budget alloué au laboratoire d'Egletons est de 380 000 Euros, il est essentiellement investi en équipement.

5 DVDC TRANCHE 2

Notre objectif est de pouvoir utiliser le code de calcul SAM en toute confiance pour l'étude et la prédiction du comportement des chaussées sous l'effet du trafic. Nous avons en partie validé l'utilisation de SAM par des mesures de pression de contact en surface dans des phases de chargement statique avec l'utilisation du capteur de surface Tekscan.

Dans le but de valider les calculs de SAM pour les calculs de contraintes en profondeur un nouveau dispositif de mesure de contraintes a été essayé au laboratoire et a donné entière satisfaction. L'acquisition de ce matériel de mesure nous permettrait d'avancer dans la validation complète de l'utilisation du code SAM ;

Pour la tranche 2 nous proposons les actions suivantes, avec un terme en decembre 2018:

- Etudes des pneus surgonflés et des profils agressifs (mesures de validation avec capteur Tekscan)
- Calculs et mesures des contraintes ,normales et tangentielles avec chargement en virage (mesures de validation avec capteur Tekscan)
- Validation des calculs des contraintes dans la couche de surface en phase statique (mesures de validation avec capteur à fibres optiques)
- Calculs des contraintes normales et tangentielles en roulement (mesures de validation avec capteur Tekscan et avec capteur à fibres optiques)

6 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Reynaud, P., Nasr, S.B., Allou, F., Chaise, T., Nélias, D., Petit, C., 3D modelling of tyre-pavement contact pressure, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016 DOI: 10.1080/19648189.2016.1150894.
- [2] Reynaud, P., B. Picoux, D. Nelias, and C. Petit (2015, May). Approche tribologique du contact pneu-chaussée. In 27ème Journées Internationales Francophones de Tribologie.
- [3] Nélias D., Antacula E., Boucly V., « Rolling of an Elastic Ellipsoid Upon an Elastic-Plastic Flat», *ASME Journal of Tribology*, vol 129 (4) (2007) 791–800.
- [4] Blab, R., & Harvey, J. T. (2002). Modeling measured 3D tire contact stresses in a viscoelastic FE pavement model. *International Journal of Geomechanics*, 2, 271–290.
- [5] Wang, H., & Roque, R. (2011). Impact of wide-based tires on the near-surface pavement stress states based on three-dimensional tire-pavement interaction model. *Road Materials and Pavement Design*, 12, 639–662.
- [6] Wang, H., & Al-Qadi, I. L. (2011). Impact quantification of wide-base tire loading on secondary road flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 137, 630–639.
- [7] Wollnya I., Behnkea R., Villareta K. & Kaliskea M., Numerical modelling of tyre-pavement interaction phenomena: coupled structural investigations, *Road Materials and Pavement Design*, vol 16 (1) (2015).
- [8] De Beer M., Fisher C., Stress-In-Motion (SIM) system for capturing tri-axial tyre-road interaction in the contact patch, *Measurement*, vol 46 (7) (2013) 2155–2173.
- [9] Grellet D, Dore G, Kerzreho JP, Piau JM, Chabot A, et al.. Experimental and theoretical investigation of three dimensional strain occurring near the surface in asphalt concrete layers. *7th Rilem International Conference on Cracking in Pavements*, Jun 2012, France. SPRINGER, p.1017-1027, ill., bibliogr., 2012, RILEM Bookseries.
- [10] Chaise T, Nélias D. Contact pressure and residual strain in 3D elasto-plastic rolling contact for a circular or elliptical point contact. *Journal of Tribology*, vol 133 (4)(2011) 1– 9.
- [11] Lankarani, H. M. and P. E. Nikraves (1990). A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems. *Journal of Mechanical Design* 112, 369–376.
- [12] Myers, LA & Roque, R 2001, 'Evaluation of top-down cracking in thick asphalt pavements and the implications for pavement design', in *Perpetual Bituminous Pavements*, Transportation Research Circular 503, Transportation Research Board, December, pp. 79-87.
- [13] Myers, LA & Roque, R 2002, 'Top-down crack propagation in bituminous pavements and implications for pavement management', *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 71, pp. 651-670.
- [14] Manyo, E. Y. Leandry, I. Picoux, B. Reynaud, P. Allou, F. Petit, C. (2017, June). 3D modeling and measuring of tire-pavement contact pressure. *The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. Athens, Greece.
- [15] Koumi, K. E. (2015). *Modélisation du contact entre matériaux hétérogènes : Application au contact Aube/Disque* (Doctoral dissertation). INSA Lyon, France.
-

