



MODELISATION THERMO-MECANIQUE DES CHAUSSEES SOUPLES APPLICATION A LA PREVISION DE L'ORNIERAGE DE L'ASSISE TRAITEE AVEC LES LIANTS VEGETAUX LOCAUX

MODELIZATION THERMO-MECANICAL BEHAVIOR OF SOFT PAVEMENT APPLIED TO THE PREDICTION OF ORNIERING OF THE BASE TREATED WITH LOCAL VEGETABLE BINDERS

| Ratsifaherandahy Flemond Dolin ^{1*} | Mamiharijaona Ramaroson ¹ | Rajaonah Rabevala ¹ | Rasolomampionona Zarasoa Arnolev ¹ | et | Randriamalala Tiana Richard ² |

¹. Université d'Antsiranana | Ecole Supérieure Polytechnique | Laboratoire de Métallurgie et Chimie | B.P: O, 201, Antsiranana | Madagascar |

². Chef de Département de Recherche, Développement et Matériaux au LNTPB | Madagascar |

| Received April 26, 2020 |

| Accepted April 29, 2021 |

| Published May 02, 2021 |

| ID Article | Dolin-Ref3-ajira260421 |

RESUME

Contexte : Cette communication concerne l'étude du mécanisme d'orniérage des chaussées souples à l'aide d'une modélisation par éléments finis. La couche de surface est modélisée en utilisant un modèle élasto-plastique associé à une loi de fluage en puissance. Les couches d'assises sont décrites à l'aide d'un modèle élasto-plastique. **Objectif :** Des recommandations sont proposées pour réduire le risque de formation de l'orniérage de chaussée à assise en matériaux latéritique traité par les liants végétaux locaux. **Méthode :** Après une analyse du mécanisme de formation de l'orniérage, on présente une étude de l'influence des principaux paramètres sur ce mécanisme, notamment les propriétés des matériaux constitutifs, la température et la pression de gonflage. **Résultat :** Nous avons obtenus en augmentant la température de 15 à 35 °C, E décroît de 70%, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'orniérage (Figure 7). On constate que l'enrobé bitumineux avec des valeurs élevées de E présente une bonne résistance à l'orniérage. L'augmentation de la charge de 8 à 13 tonnes avec pression de gonflage de 800 kPa fait augmenter l'orniérage de 45%, l'augmentation de la pression de gonflage de 600 à 900 kPa avec une charge par essieu de 12 tonnes ne la fait augmenter que de 12% pour CBR3C PLUS. **Conclusion :** on a constaté qu'on peut faire une étude numérique du mécanisme d'orniérage dans les chaussées souples. Les résultats obtenus montrent qu'une modélisation élasto-viscoplastique pour les couches de surface et élastoplastique pour les couches inférieures reproduit bien ce phénomène. Les enrobés à haut module de déformation présentent une meilleure résistance à la température, réduisent le risque d'orniérage. L'intensité de la charge par essieu a une influence plus significative sur l'orniérage que la pression de gonflage.

Mots clefs : Chaussée, Orniérage, Eléments finis, Viscoplasticité, sols, liant végétal.

ABSTRACT

Context: This communication concerns the study of the rutting mechanism of flexible pavements using finite element modeling. The surface layer is modeled using an elastoplastic model associated with a power creep law. The base layers are described using an elastic-plastic model. **Objective:** Recommendations are proposed to reduce the risk of formation of rutting on pavements with lateritic materials treated with local plant binders. **Method:** After an analysis of the mechanism of rutting formation, we present a study of the influence of the main parameters on this mechanism, in particular the properties of the constituent materials, the temperature and the inflation pressure. **Result:** We obtained by increasing the temperature from 15 to 35 °C, E decreases by 70%, which has the consequence of increasing the rutting (Figure 7). It is found that the asphalt mix with high values of E exhibits good resistance to rutting. The increase of the load from 8 to 13 tons with an Inflation pressure of 800 kPa increases rutting by 45%, increasing inflation pressure from 600 to 900 kPa with an axle load of 12 tons only increases it by 12% for CBR3C PLUS. **Conclusion:** it was found that there is a numerical study of the rutting mechanism in flexible pavements. The results obtained show that an elasto-viscoplastic modeling for the surface layers and elastoplastic for the lower layers reproduces this phenomenon well. Asphalt mixes with a high deformation modulus have better temperature resistance and reduce the risk of rutting. The intensity of the axle load has a more significant influence on the rutting than the tire pressure.

Keywords: Pavement, Rutting, Finished elements, Viscoplasticity, soils, plant binder.

1. INTRODUCTION

Les chaussées souples sont composées de trois couches : une couche de surface en enrobé bitumineux, la couche d'assises en graves latériques et la couche de support. Ce type de structures conduit à un comportement complexe, car les différentes couches peuvent présenter un comportement dépendant ou indépendant du temps, réversible ou irréversible et dépendant ou indépendant de la température. Une étude fine de ce comportement nécessite l'élaboration d'un modèle numérique qui peut reproduire la structure de la chaussée et le comportement de ses différents matériaux. Ce modèle permet de mieux comprendre le mécanisme de formation de l'orniérage et d'analyser le rôle de différents facteurs dans l'apparition de cette pathologie. Dans cette communication, on propose d'étudier ce phénomène à l'aide d'une modélisation non linéaire par éléments finis de l'ensemble des couches de la chaussée. Après une description du mécanisme d'orniérage, nous présentons le modèle utilisé et l'analyse de l'influence sur

l'orniérage de principaux paramètres, à savoir la température, la pression des pneus et la charge par essieu. Des études antérieures faites par quelques chercheurs ont permis de démontrer que le développement du trafic et des charges transportées peut conduire à des dégradations importantes des chaussées, en particulier l'orniérage qui constitue la principale pathologie des chaussées souples [1]. Ce phénomène peut résulter des déformations dans la couche de surface ou des déformations dans les autres couches de la chaussée [2]. Le comportement mécanique des chaussées souples, application à la prévision de l'orniérage fait partie des investigations [12]. Notre travail comporte une étude par éléments finis du comportement mécanique des chaussées dans les buts de mieux comprendre les mécanismes d'initiation, le développement de l'orniérage dans les chaussées souples et la détermination de la stratégie pour leur réparation [12]. Plusieurs modèles ont été proposés pour étudier le phénomène d'orniérage dans l'enrobé bitumineux [3, 4, 5].

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Matériels

Les matériels utilisés sont : Machine de résistance à l'orniérage, Compacteur de plaques, Malaxeur, ordinateur, et autres.



Figure 1 : Figure montre la mise en œuvre de la couche de roulement sur la route d'Ambilobe Madagascar.

2.2 Méthode

Nous avons fait l'étude du mécanisme d'orniérage des chaussées souples à l'aide d'une modélisation par éléments finis. La couche de surface est modélisée en utilisant un modèle élasto-plastique associé à une loi de fluage en puissance. Les couches d'assises sont décrites à l'aide d'un modèle élasto-plastique

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Analyse de l'orniérage

L'orniérage est une déformation permanente située dans l'axe du passage des roues. Elle est attribuée à une augmentation de la pression des pneus [1] et au développement du trafic et de la charge par essieu [3]. Les ornières sont classées en trois catégories : petites (6 à 12,5mm), moyennes (12,5 à 25mm) et grandes (>25mm) [6]. Toutefois, on signale l'existence de trois types d'orniérage dans les chaussées de béton bitumineux :

- **Les ornières d'usure :** elles sont dues à la perte progressive des particules de granulats de la couche de surface. Ce type d'orniérage est causé par la combinaison de l'environnement et du trafic.
- **Les ornières structurales :** elles résultent de la déformation verticale permanente dans la structure de la chaussée sous les chargements du trafic répétés.
- **Les ornières d'instabilité :** elles sont dues au déplacement latéral des matériaux dans la couche de la chaussée et sont d'autant plus importantes pour des chaussées avec des matériaux dont les propriétés structurales sont mauvaises.

Plusieurs mécanismes peuvent être à la base du phénomène d'orniérage [7]. Les ornières dans l'enrobé bitumineux sont dues à la densification et l'augmentation du cisaillement. L'orniérage initial est causé par la densification de la chaussée sous le passage des pneus. L'évolution de l'orniérage est liée au cisaillement qui conduit à la formation de bourrelet aux abords du passage des roues. Toutefois, pour les chaussées bien compactées, la contrainte de cisaillement dans la couche du béton bitumineux est le mécanisme principal d'orniérage. L'orniérage de la chaussée est provoqué par les mécanismes suivants [8] :

- La déformation plastique verticale dans la couche de l'enrobé bitumineux.
- Le fluage latéral dans la couche de l'enrobé bitumineux (on peut définir la résistance à ce mécanisme par la capacité d'un enrobé bitumineux à maintenir intact son squelette minéral).
- La déformation des couches inférieures.

Plusieurs facteurs peuvent influencer ce mécanisme comme la construction de la chaussée, les facteurs liés au trafic (type de pneus, charge par essieu, vitesse de déplacement, pression de gonflage) et les facteurs environnementaux.

3.2 Modélisation de la chaussée

a) Modélisation des couches de surface

L'étude est réalisée à l'aide d'un modèle rhéologique combinant un modèle élastoplastique isotrope et une loi de fluage en puissance. La déformation viscoplastique en fonction de la température et du temps est donnée par [9] :

$$\varepsilon^{vp}(T) = A_T(\sigma)^n (t)^{m+1} \quad (1)$$

Où n et m sont des paramètres du modèle. A_T est défini par

$$A_T = A' / ((a_T)_{vp})^{m+1} \quad (2)$$

Avec A' une constante

$$\text{et } (a_T)_{vp} = t / \xi \quad (3)$$

Le facteur de changement de température (ξ) est le temps réduit).

La surface d'écoulement est de type Drucker-Prager modifié :

$$F = f - p \tan \phi - c \quad (4)$$

$$\text{Avec : } f = \frac{1}{2} q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (5)$$

C'est le paramètre de cohésion de matériaux est comme suit :

$$q = \sqrt{3/2} (s : s) \quad (6)$$

La contrainte équivalente de Von Mises est comme suit :

$$S = \sigma - pI \quad (7)$$

Le déviateur de contrainte est comme ci-dessous :

$$p = \text{tr}(\sigma) / 3 \quad (8)$$

La contrainte moyenne est :

$$r = (9) / (2 s : s : s)^{1/3} \quad (9)$$

Le troisième invariant des contraintes, ϕ l'angle de frottement et k le facteur de forme qui modifie l'aspect de la surface d'écoulement. Pour des matériaux cohésifs comme l'enrobé bitumineux ($k=1$ et $\phi=0$), la surface d'écoulement coïncide avec celle de Von Mises est comme suit :

$$F = q - c \quad (10)$$

3.3 Modélisation des couches d'assises

Le comportement des matériaux des couches d'assises est décrit à l'aide d'un modèle élastoplastique utilisant le critère de Mohr-Coulomb modifié :

$$F = R_{mc} q - p \cdot \tan \phi - c \quad (11)$$

Avec :

$$R_{mc}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \phi} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \phi \quad (12)$$

Avec :

$$\cos(3\theta) = \left(\frac{r}{q} \right)^3 \quad (13)$$

La surface d'écoulement fait intervenir la cohésion c et l'angle de frottement ϕ

La déformation élastique ε^e est calculée par la loi de Hooke.

4 Analyse du comportement de la chaussée à l'orniérage

4.1 Exemple de référence

L'étude est réalisée sur une chaussée dont la structure est identique à celle utilisée par LAVOC à Lausanne pour des essais en vraie grandeur [10,11]. Elle est composée de (Figure 2) :

- **Une couche de roulement** de 7 cm de béton bitumineux MR11 ;
- **Une couche de base** de 25 cm de graveleux latéritique (0/60 mm) ;
- **Couche de fondation** : 20cm de graveleux latéritique naturel améliorer au CRBR3C PLUS ;
- **Plate-forme support** : graveleux latéritique traité.

Deux essais ont été réalisés sur des chaussées ayant la même structure : essais HMT22-4 et HMT22-5. Le premier essai a comporté plus de cycles de passages. Le dimensionnement de ces chaussées a été effectué en sorte que la déformation verticale au sommet de la couche de support reste limitée. Les calculs ont été effectués à l'aide du code ABAQUS avec les conditions des essais, à savoir : charge de l'essieu de 11,5 tonnes ; pneu « super single » (38 mm) ; vitesse de déplacement de 12 km/h ; pression de pneus de 800 kPa ; température de 50°C à l'interface entre la couche de roulement et les couches d'enrobés.

4.2 Comparaison essais – modélisation

La figure 3 donne une comparaison entre l'orniérage calculé et les mesures effectuées. On constate que l'orniérage se développe en deux phases distinctes (initiation et propagation) avec des vitesses clairement distinctes. La première phase correspond à l'orniérage par densification de l'enrobé bitumineux, alors que la deuxième est relative au fluage. Les résultats numériques sont proches des mesures. Pour la phase d'initiation, ils sont plus proches de l'essai HMT-5. Pour la phase de propagation d'orniérage, les résultats numériques se situent entre les résultats des deux essais.

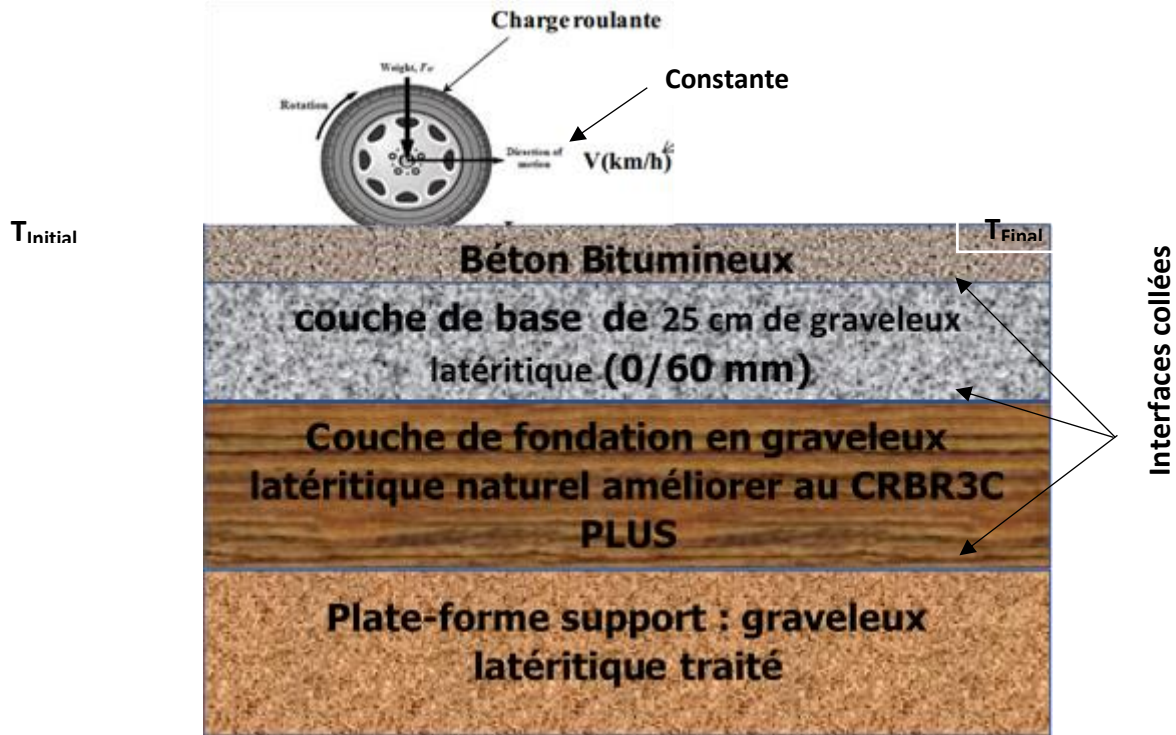


Figure 2 : Schéma de principe du modèle de chaussée sous charge roulante.

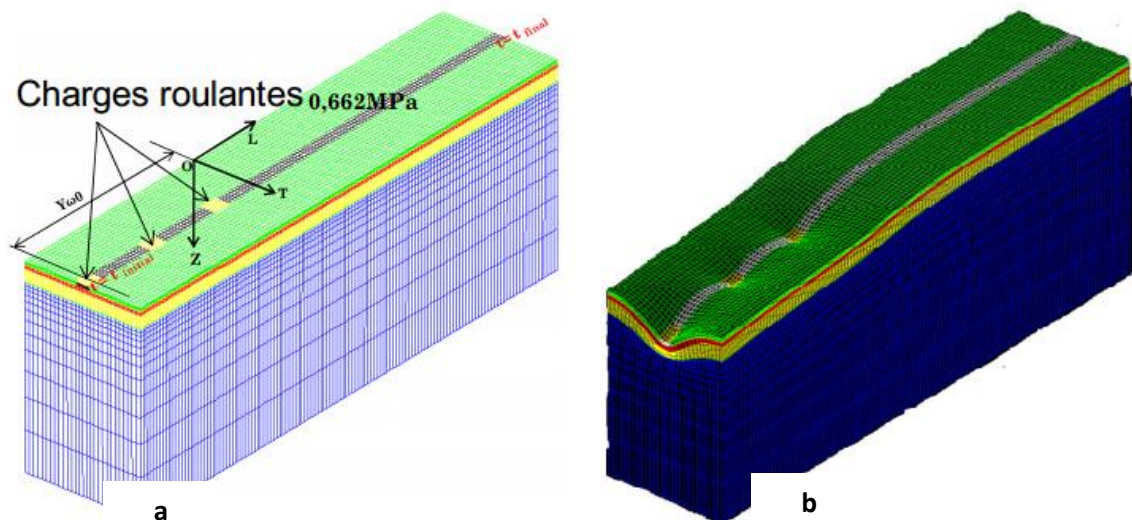


Figure 3 : a) Vue du maillage 3D sous sollicitation d'une charge roulante de type tridem ; b) déformée de la structure sous charge roulante de type tridem au temps initial.

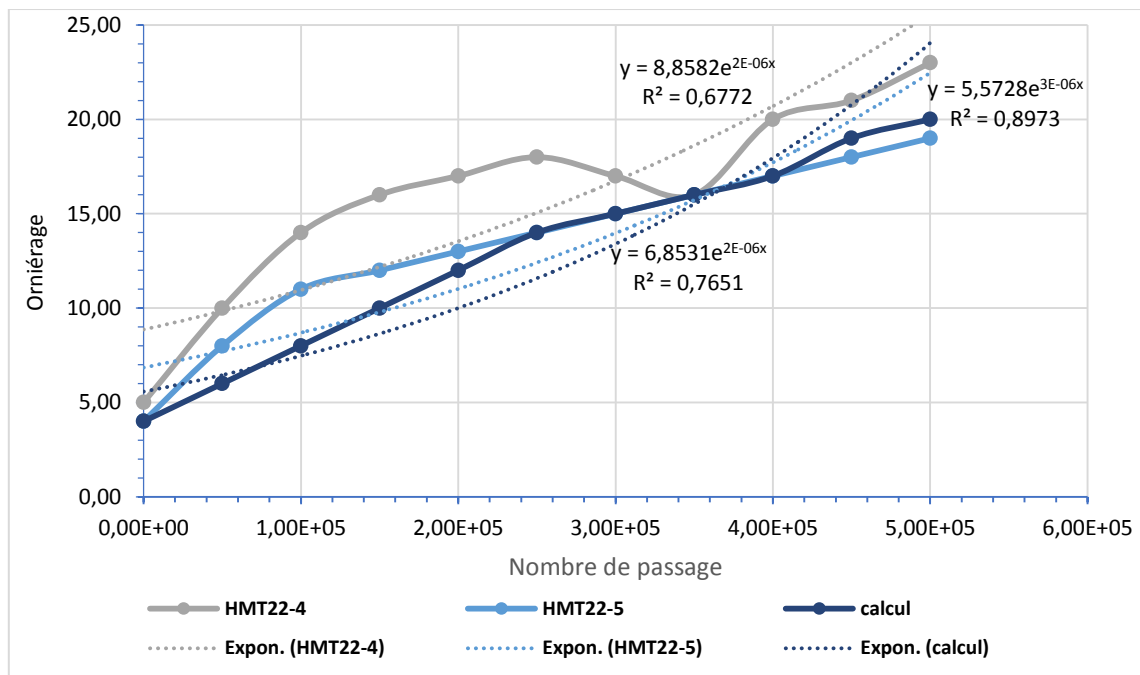


Figure 4 : Développement de l'orniérage : comparaison essais – modélisation.

4.3 Etude paramétrique

4.3.1 Influence des paramètres des matériaux et de la température

Analysons d'abord l'influence de la température sur l'orniérage. Les résultats numériques montrent que la température joue un rôle très important sur le développement de l'orniérage. Une élévation de la température de 15 à 35 °C fait augmenter l'orniérage de 0,5 à 1,32 mm avec 1,2 million de passages (Figure 5). Les paramètres AT et E des matériaux dépendent fortement de la température. La figure 5 illustre l'influence de la température sur le module de déformation. En augmentant la température de 15 à 35 °C, E décroît de 70%, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'orniérage (Figure 7). On constate que l'enrobé bitumineux avec des valeurs élevées de E présente une bonne résistance à l'orniérage. Nous avons présenté sur les figures ci-dessous les résultats.

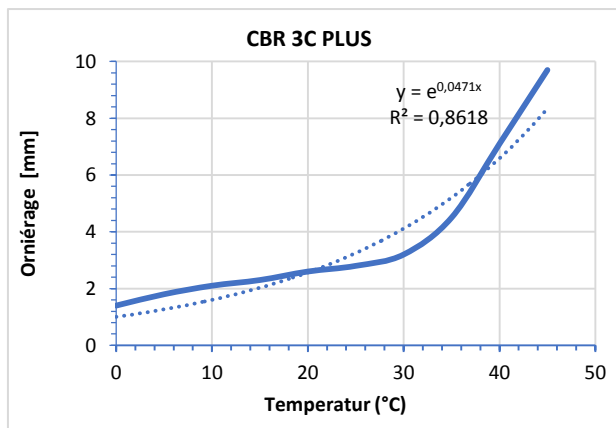


Figure 5 : Influence de la température sur l'orniérage.

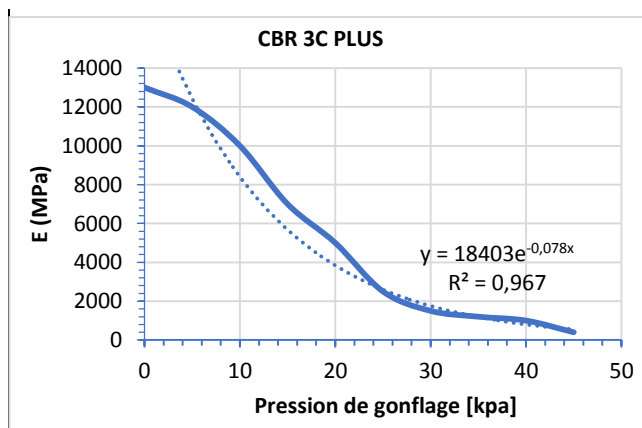


Figure 6 : Influence de la température sur E.

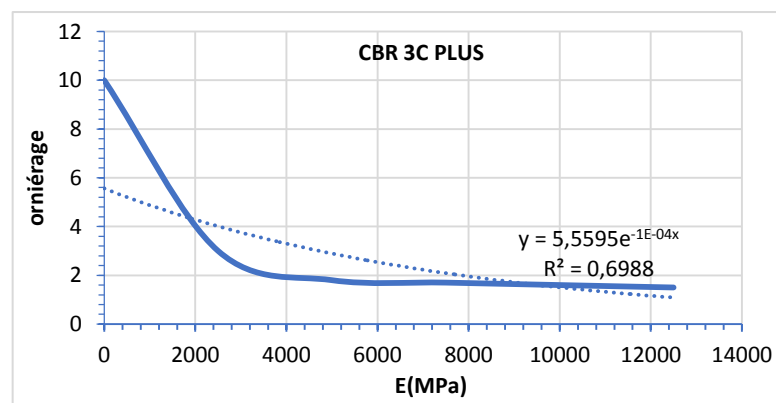


Figure 7 : La figure montre l'influence de E sur l'orniérage.

4.3.2 Influence des paramètres liés au trafic

Etudions maintenant l'effet des paramètres liés au trafic qui sont l'intensité de charge et la pression de gonflage. Les résultats de modélisation montrent que l'intensité de chargement a une influence plus importante que la pression de gonflage. L'augmentation de la charge de 8 à 13 tonnes avec une pression de gonflage de 800 kPa fait augmenter l'orniérage de 45% (Figure 9). Par contre, l'augmentation de la pression de gonflage de 600 à 900 kPa avec une charge par essieu de 12 tonnes ne la fait augmenter que de 12% (Figure 8).

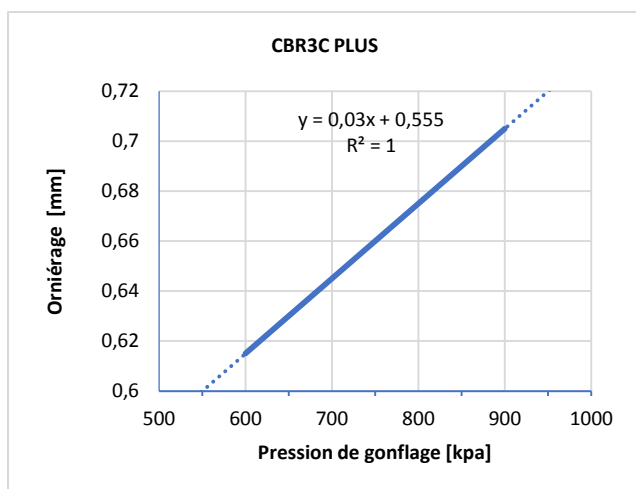


Figure 8 : la figure montre l'évolution de l'orniérage en de la pression de gonflage.

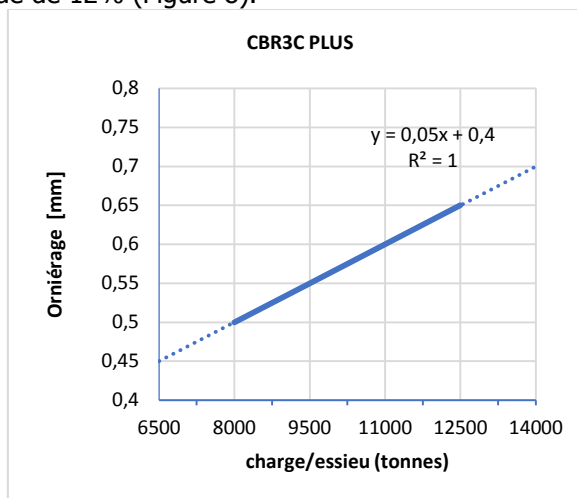


Figure 9 : la figure montre l'évolution de l'orniérage fonction de la charge par essieu.

4. CONCLUSIONS

Cette communication a comporté une étude numérique du mécanisme d'orniérage dans les chaussées souples sur une couche de fondation en graveleux latéritique naturel amélioré au CBR3C PLUS. Les résultats obtenus montrent qu'une modélisation élasto-viscoplastique pour les couches de surface et élasto-plastique pour les couches inférieures reproduit bien ce phénomène. Les enrobés à haut module de déformation présentent une meilleure résistance à la température, et par conséquent réduisent le risque d'orniérage. L'intensité de la charge par essieu a une influence plus significative sur l'orniérage que la pression de gonflage, selon les tests et contrôle effectués par le Laboratoire National des Travaux Publics ainsi que des observations et recommandations pour construire des routes imperméables et durables à Madagascar. L'utilisation de ces nouveaux liants (CBR3C PLUS, CBR2A PLUS et CBR2AC PLUS) permet d'avoir beaucoup d'avantage :

- 1- Résistance à la température du béton bitumineux ;
- 2- Résistance à la viscoplastique et viscoélastique du béton bitumineux ;
- 3- Résistance à la fatigue de la chaussée ;
- 4- Réduisent le risque d'orniérage (instabilité, structurelles, usure) ;
- 5- Résistance à l'inondation.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier Laboratoire Nationale et des Travaux Publics Madagascar (LNTPB) et CHINA ROAD AND BRIDGE CORPORATION (CRBC) à Madagascar pour la mise à disposition à la réalisation de ce travail.

Acronymes : CBR3C PLUS : Liant 01 ; CBR2A PLUS : Liant 02 ; CBR2AC PLUS : Mélange Liant 01 + Liant 02.

6. REFERENCES

- [1] A. Collop, D. Cebon. A visco-elastic approach to rutting in flexible pavements. *Journal of transportation engineering*. 1995; 121 (1): 82-93. Available on: <https://scholar.google.com/citations?user=>
- [2] A. Archilla, S. M. adanat. Estimation of rutting models by combining data from different sources pavements. University of Washington, Seattle, pp.673-692. 1997. Available on: <https://www.researchgate.net>.
- [3] E. Skok, E. Johnson, A. Turk. Asphalt pavement analyses (APA) evaluation technical. Technical report, Minnesota department of transportation, September 2002. Available on: <https://conservancy.umn.edu/bitstream>.
- [4] A. Scarpas, R. Al-Khoury, R. Van C. Gulp S. Erkens. Finite element simulation of damage development in asphalt concrete pavements. Proceedings of 8th International conference on asphalt, 1997. Available on: <https://www.researchgate.net/2810>.
- [5] Y. Lu, J. Wright. Numerical Approach of Visco-elastoplastic analysis for asphalt mixtures. *Journal of Computers & Structures*. 1998; 69:139-157. Available on: <https://fr.scribd.com/document/335071846/comportement-m-e-canique-des-chauss-es-souples>.
- [6] A. Chowdhury, J. Button, D. Jose, Grau Project. Effects of superpave restricted zone on permanent deformation. International center for aggregate research ICAR, Report o. 201, May 2001. Available on: <http://citeseerx.ist.psu.edu>.
- [7] J. Sousa, S. Weissman, J. Sackman, C. Monismith, A nonlinear elastic viscous with damage model to predict permanent deformation of asphalt. Transportation research board No.1384 pp. 80-93. Washington 1993. <https://trid.trb.org>.
- [8] T. White, M. John, E. Haddoc, K Adam, J. Hand, F. Hongbing. Contributions of pavement structural layers to rutting of hot mix asphalt pavements. NCHRP report 468. 2002. Available on: <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/160943.aspx>.

- [9] G. Chehab, Y. Kim, R. Schapery, M. Witzack, R. Bonaquist. Time-temperature superposition principle for asphalt concrete mixtures with growing damage in tension state. *Journal of Asphalt paving technology*. 2002. 71: 559-593. Available on: <https://trid.trb.org>.
- [10] J. Perret, A. Dumont, J. Turtzschy, M. Ould-Henia. Rapport de recherche : Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement. Available on: (1ère partie) : Enrobés à haut module, OFROU (Office fédéral des routes), décembre 2001. <https://infoscience.epfl.ch>.
- [11] J. Perret, Déformation des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic. Thèse présentée à l'EPFL Lausanne. 2003. Available on: <https://infoscience.epfl.ch › record>.
- [12] B. Ali, I. Shahrou, K. Woznica (Septembre 2005), Etude du comportement mécanique des chaussées souples application à la prévision de l'orniérage. Available on: <https://www.researchgate.net/publication/266491438>.



Cite this article: Ratsifaherandahy Flemond Dolin, Mamiharijaona Ramarason, Rajaonah Rabevala, Rasolomampionona Zarasoa Arnolev et Randriamalala Tiana Richard. MODELISATION THERMO-MECANIQUE DES CHAUSSEES SOUPLES APPLICATION A LA PREVISION DE L'ORNIERAGE DE L'ASSISE TRAITEE AVEC LES LIANTS VEGETAUX LOCAUX. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2021; 12(2): 138-144.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>