

# Prédiction de la déformation de la couche de surface des chaussées par la méthode des éléments discrets

Oussama HAMMOUD<sup>1</sup>, Juan Carlos QUEZADA<sup>1</sup>, Ferhat HAMMOUM<sup>2</sup>, Cyrille CHAZALLON<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ICUBE, UMR 7357, CNRS, INSA de Strasbourg, Strasbourg, France

<sup>2</sup> MAST-MIT, Gustave Eiffel Université, Nantes, France

## RESUME

La déformation permanente (en particulier l'orniérage) est l'une des défaillances les plus courantes dans les chaussées. Cette dégradation compromet sérieusement la sécurité et le confort des usagers. En se basant sur la méthode des éléments discrets (DEM), nous avons utilisé le logiciel LMGC90 pour réaliser des simulations numériques d'une charge roulante sur une plaque de matériau bitumineux. La simulation reprend les caractéristiques de la roue utilisée avec l'orniéreur français utilisé en laboratoire (FWTT : French Wheel Tracking Test) afin de prédire l'orniérage des deux types d'enrobé et d'analyser les réponses micromécaniques de ces derniers pendant le développement de l'orniérage. Le modèle utilisera une empreinte de roue à géométrie réelle. Afin de modéliser des mélanges granulaires plus réalistes, on utilise la méthode de génération des particules de LMGC90. Une loi de contact viscoélastique (modèle de Burgers) a été utilisée pour modéliser les propriétés mécaniques des granulats et du mastic. Des calculs numériques de suivi de la roue ont été réalisés en faisant l'hypothèse de charge équivalente simplifiée et d'un échantillon à échelle réelle, puis vérifiés par des essais en laboratoire. Les résultats montrent que la simulation numérique permet de prédire l'orniérage de l'enrobé. En outre, l'analyse de la réponse micromécanique de l'enrobé, a révélé des chemins privilégiés de transmission du chargement, ce qui explique les mécanismes de l'orniérage à l'échelle des particules.

**Mots-clefs :** Orniéreur mlpc, matériau bitumineux, DEM, LMGC90

## 1. Introduction

L'orniérage, qui se traduit par une déformation permanente des couches bitumineuses, est l'un des problèmes prématurés les plus graves et constitue la cause majeure de la dégradation des chaussées souples (Chazallon et al., 2009a), Di Benedetto and Corté, 2005, Collop et al., 1995, Collop and Cebon, 1997). Il est principalement produit par des chargements à haute température

et se présente généralement sous la forme de déformations longitudinales dans la trajectoire des roues.

L'essai français de roulement libre (FWTT) est destiné à qualifier les mélanges bitumineux en fonction de leur capacité à résister à l'orniérage. Il fait partie intégrante de la méthode française de conception des chaussées (Di Benedetto and Corté, 2005, SETRA-LCPC (1997)). Plusieurs études ont utilisé l'approche des éléments finis pour modéliser le comportement des matériaux viscoélastiques, l'essai de suivi des roues et pour interpréter l'orniérage des enrobés, en considérant le matériau bitumineux comme un matériau homogène (Ali, 2006, Chazallon et al., 2009b, Abu Al-Rub et al., 2012, He et al., 2019). Or, nous sommes en présence d'un matériau typiquement hétérogène.

Une deuxième approche pour ce problème consiste à utiliser une approche discrète, qui a été largement utilisée pour modéliser le comportement des matériaux granulaires. Cette méthode permet de simuler l'interaction d'un ensemble de corps rigides ou déformables en contact. Au cours des deux dernières décennies, la méthode des éléments discrets (DEM) a été utilisée dans plusieurs études pour modéliser le comportement mécanique des enrobés bitumineux. Cette approche prend en compte la nature granulaire des agrégats et le comportement du mastic en appliquant des lois viscoélastiques au contact des particules (Ge et al., 2021, Quezada and Chazallon, 2020, Zhou et al., 2019), Nguyen et al., 2017). Ces études ont modélisé l'enrobé en utilisant des particules sphériques, des particules irrégulières créées avec des sphères ou en générant des échantillons à l'aide de techniques d'imagerie (Collop et al., 2006, Cai et al., 2014). Il y a peu de travaux sur la simulation de l'orniérage avec l'approche discrète à cause des limitations liées au temps de calcul. Récemment, quelques études commencent à apparaître sur ce sujet (Xue et al., 2021, Wang et al., 2021).

Ce travail vise à développer un modèle numérique en utilisant la méthode des éléments discrets (DEM) pour reproduire l'essai français de roulement libre (FWTT) (Gabet et al., 2011, Perraton et al., 2011). Pour cela, le logiciel de calcul LMGC90 (LMGC90, 2011), basé sur la méthode DEM (Cundall, 1971, 1988, Dondi et al., 2014, Quezada et al., 2017, Quezada and Chazallon, 2022), a été utilisé. Nous avons utilisé le modèle de Burgers pour représenter le mastic entre les agrégats, pour décrire les propriétés viscoélastiques des enrobés bitumineux, telles que la relaxation, le fluage et la réponse dynamique (Cai et al., 2014, Collop et al., 2006, Quezada and Chazallon, 2020). Ensuite, la section 2 introduit l'essai de module complexe et la modélisation de cet essai dans une configuration 2PB pour trouver les paramètres macroscopiques de la loi de contact entre particules. La section 3 est consacrée à la modélisation de l'essai d'orniérage avec la méthode des éléments discrets, ainsi qu'à la validation du modèle numérique en confrontant les résultats expérimentaux et numériques.

## 2. Essai de module complexe (2PB)

### a. Campagne expérimentale

Les essais de module complexe ont été réalisés dans une configuration de flexion deux points (2PB) conformément à la spécification EN 12697-26 :2012 (EN, 2012). Quatre échantillons trapézoïdaux ont été préparés avec un Béton bitumineux mince (BBMa). Le tableau 1 présente la

granulométrie de ce mélange bitumineux. Ces granulats proviennent de la carrière de Bréfauchet en France, avec un bitume de grade 35/50. Les éprouvettes ont les dimensions suivantes :  $b = 25$  mm,  $B = 56$  mm,  $e = 25$  mm et  $h = 250$  mm (Fig. 1a). Pour cette série d'essais, les valeurs de fréquence testées ont été fixées à 1, 3, 10, 25, 30 et 40 Hz tandis que les températures choisies étaient -10, 0, 10, 15, 20 et 30 °C. Pour chaque couple température-fréquence, un déplacement sinusoïdal  $z=A\sin(\omega t)$  est appliqué sur la tête mobile de chaque échantillon. L'amplitude  $A$  est fixée à  $63 \times 10^{-6}$  m afin d'obtenir une déformation  $\varepsilon$  inférieure à  $50 \times 10^{-6}$  pour éviter les dommages dus à la fatigue. Pour chaque couple température-fréquence, 100 cycles de chargement sont réalisés. Les valeurs maximales de la force  $F_0$ , du déplacement  $Z_0$  et de l'angle de phase initial  $\varphi$  ont été mesurées pendant les dix derniers cycles.

**Tableau 1. Distribution de la taille des particules pour un BBMa**

Diamètre (mm)	12.5	10	8	6.3	4	3.15	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
PSD (%)	100	90	64	44	36	34	32	22	17	13	11	7.3

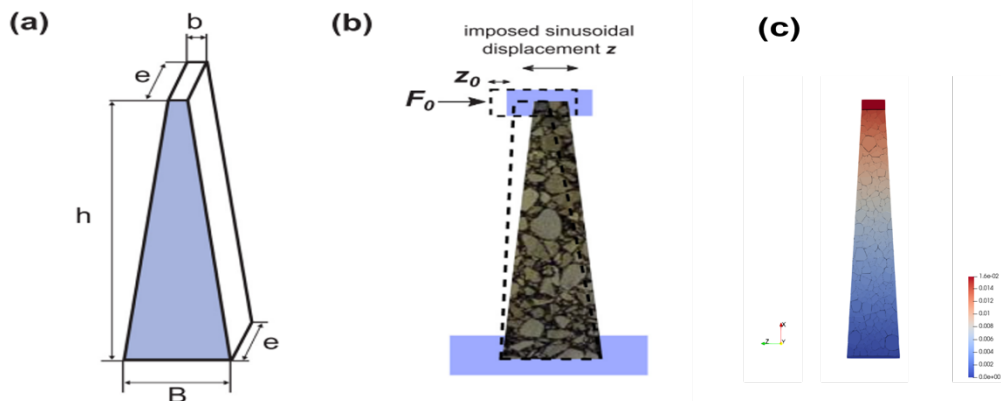
Le comportement viscoélastique d'un enrobé sous chargement cyclique peut être évalué par la norme du module complexe  $\|E^*\|$  et l'angle de phase associé  $\varphi$ . La partie réelle  $E_1$  et la partie imaginaire  $E_2$  du module complexe doivent être calculées pour chaque couple température-fréquence. Ces valeurs sont fournies par les équations (1) et (2) respectivement (EN, 2012):

$$E_1 = \gamma \left( \frac{F_0}{z_0} \cos(\varphi) + 10^{-6} \mu \omega^2 \right) \tag{1}$$

$$E_2 = \gamma \frac{F_0}{z_0} \sin(\varphi) \tag{2}$$

$$\gamma = \frac{12h^3}{e(B-b)^3} \left[ \left( 2 - \frac{b}{2B} \right) \frac{b}{B} - \frac{3}{2} - \ln \frac{b}{B} \right] \tag{3}$$

où  $\gamma$  (mm-1) est le facteur de forme dépendant des valeurs géométriques indiquées à la Fig. 1a et  $\mu = 0.135M + m$  est le facteur de masse qui influence la force résultante par des effets d'inertie.



**Figure 1. Dimensions et schéma de l'essai complexe dans une configuration de flexion à deux points avec la modèle numérique (c) (Quezada and Chazallon, 2020).**

Enfin, la norme du module complexe et l'angle de phase associé sont calculés à l'aide des expressions suivantes :

$$\|E^*\| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan(E_2/E_1) \quad (5)$$

*b. Modélisation de l'essai de module complexe 2PB avec le LMGC90*

Les échantillons numériques sont composés de particules rigides polyédriques où chaque particule a un diamètre compris entre 2 mm et 10 mm, sur la base de la granulométrie expérimentale présentée dans le tableau 1. Ici, la courbe granulométrique a été coupée à 2 mm pour éviter de modéliser toutes les fines. Ce choix permet de diminuer le nombre de particules et d'optimiser le temps de calcul, en considérant que les plus fines font partie du mastic qui enrobe le reste de particules. (Quezada and Chazallon, 2022), Zhang et al., 2022). Les particules générées sont disposées de manière aléatoire dans un réseau cubique de 0,25 m de long, 0,025 m de largeur et 1,6 m de hauteur, en prenant en considération la morphologie déjà identifiée dans les travaux de (Ge et al., 2021). La masse volumique de toutes les particules est de 3700 kg/m<sup>3</sup> qui est calibré pour prendre en compte l'élimination des petites particules et ainsi obtenir un échantillon de masse équivalente à l'échantillon réel de 0.6 kg.

Les particules sont déposées par gravité. Après cette étape, une loi de contact basée sur le modèle de Burgers (Quezada and Chazallon, 2020) est appliquée pour tous les contacts entre particules, avec les paramètres du modèle correspondant à la température cible. Le coefficient de friction entre les particules en contact est fixé à  $\mu = 0,7$ , ce qui est une valeur typique utilisée pour les granulats concassés de roche. Enfin, en activant la gravité dans les simulations, le système est stabilisé après 1000 pas de temps. À la fin de ce processus, quatre échantillons numériques ont été préparés, avec les mêmes propriétés géométriques que les spécimens expérimentaux.

*c. Calibration des paramètres du modèle*

Un modèle macro-mécanique basé sur les paramètres du modèle de Burgers a été établi pour décrire l'évolution de la norme du module complexe  $\|E^*\|$  et de l'angle de phase  $\varphi$ . Dans un matériau viscoélastique sous chargement cyclique, il est possible de déterminer la souplesse complexe à partir des déformations et des contraintes résultantes comme (Kim and Little, 2004, Tschoegl, 2012) :

$$|D^*| = \sqrt{D'(\omega)^2 + D''(\omega)^2} \quad (1)$$

$$D'(\omega) = \frac{1}{E_m} + \frac{E_k}{E_k^2 + \omega^2 \eta_k^2} \quad (7)$$

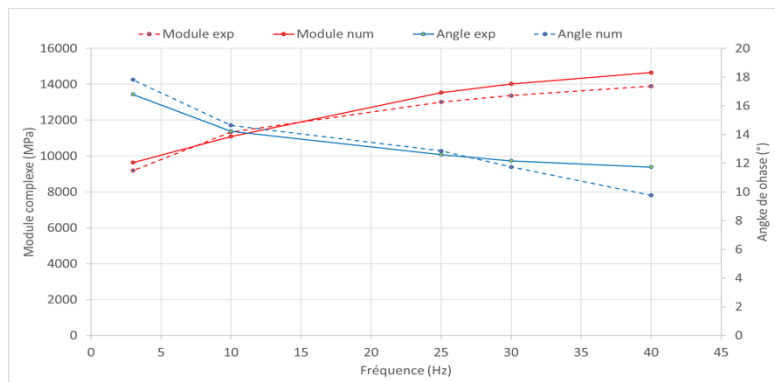
$$D''(\omega) = \frac{1}{\omega \eta_m} + \frac{\omega \eta_k}{E_k^2 + \omega^2 \eta_k^2} \quad (8)$$

où  $D'$  et  $D''$  correspondent respectivement aux parties réelle et imaginaire de la souplesse,  $E_m$  et  $\eta_m$  correspondent à la rigidité et la viscosité de Maxwell, et  $E_k$  et  $\eta_k$  à la rigidité et la viscosité de Kelvin-Voigt. Sur la base de ces expressions analytiques, il est possible de déterminer les

paramètres du modèle de Burgers pour reproduire l'évolution de la norme du module complexe et de l'angle de phase comme suit  $|E^*| = |D^*|^{-1}$  et  $\varphi = \arctan(D''/D')$  respectivement. Le tableau 2 et la courbe 2 présentent l'ensemble des paramètres calibrés déterminés avec cette procédure pour la température de référence de 15 °C.

**Tableau 2. Paramètre macroscopique du modèle de BURGER pour la température référentielle.**

T (°C)	Em (MPa)	$\eta_m$ (MPa)	Ek (MPa)	$\eta_k$ (MPa)
15	1.02E+02	1.27E+01	1.84E+02	2.15E+00



**Figure 2. Confrontation des résultats de l'essai 2PB expérimentale et numérique (résultats de LMGC90) pour la température de référence.**

### 3. Modèle numérique reproduisant l'essai et les résultats

En utilisant les résultats de l'essai 2PB, on peut maintenant utiliser ces résultats pour établir le modèle numérique de l'essai d'orniérage.

#### a. Modèle numérique de l'essai d'orniérage

L'essai d'orniérage français a été modélisé en 3D à l'aide de la méthode des éléments discrets en utilisant le code de calcul LMGC90 (Dubois and Jean, 2006, Dubois and Mozul, 2013, Perales et al., 2005). L'éprouvette est parallélépipédique, de dimensions 500 × 180 × 100 mm, sur laquelle un champ de forces se déplace à une vitesse constante afin de simuler le passage d'une roue pneumatique (figure 3a). Ce champ de forces à une surface elliptique, de 135 mm de longueur et 80 mm de largeur (cf. figure 3b), qui est extraite des mesures faites à l'UGE. Étant donné que le passage de la roue pneumatique est défini comme un roulement libre, des forces tangentielles sont ajoutées en plus de l'application du champ de force verticale, en prenant en compte un faible coefficient de frottement ( $\mu = 0,1$ ). Comme le système est symétrique le long de la trajectoire de la roue, seule la moitié de la plaque est simulée. Afin de réduire le temps de calcul, seule la moitié de la longueur de la dalle est considérée pour le déplacement du chargement (figure 4). L'échantillon est composé de 39 650 particules polyédriques, qui correspondent à la granulométrie du BBMa (tableau 1). Le champ de forces lors de son passage exerce une pression de 0,43 MPa sur l'échantillon. La vitesse de passage de la roue est constante et fixée à 5 Km/h. Tous les supports (les plans latéraux et le plan inférieur) sont supposés rigides. La loi de comportement utilisée entre les particules est la loi de Burgers, définie ultérieurement, et l'essai est réalisé à une température

ambiante de laboratoire de  $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ainsi que les paramètres sont estimées en se basant sur les paramètres de la température de référence et en appliquant la loi WLF.

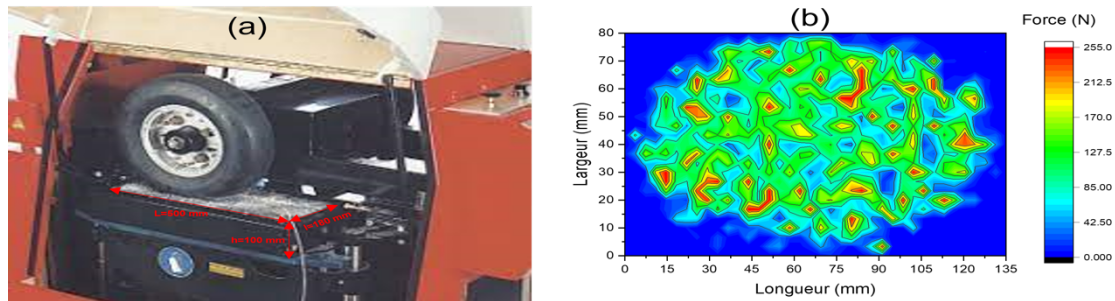


Figure 3. a) Ornièreur MLPC, b) Empreinte du pneu

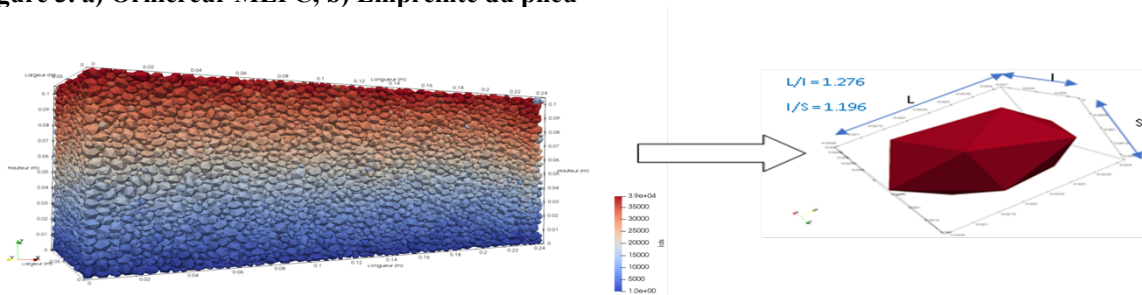


Figure 4. Représentation de l'échantillon numérique de l'orniéreur avec la dimension pour la morphologie utilisée.

*b. Résultat de la modélisation*

La méthode des éléments discrets est utilisée dans cette étude pour valider et confronter les résultats expérimentaux avec le modèle numérique proposé, lors d'un seul passage. Les observations en laboratoire nous donnent la distribution des déplacements sur le plan vertical de l'enrobé. Notre objectif dans cette étude est de reproduire numériquement l'essai d'orniérage afin de mieux comprendre l'influence de la vitesse et de la température sur les déformations subies par l'enrobé.

Deux types de cartographies de déplacements seront analysés : horizontaux et verticaux. Les résultats expérimentaux de type "u-plot" correspondent à la cartographie des déplacements horizontaux au sein de l'échantillon (en mm). Les valeurs de la légende correspondent au déplacement vers la droite pour les valeurs positives et au déplacement vers la gauche pour les valeurs négatives. Les résultats "v-plot" sont quant à eux liés aux déplacements verticaux dans l'échantillon et la légende indique la valeur de déplacement en mm.

La figure 5 présente les déplacements verticaux dans l'échantillon sous la charge roulante obtenus expérimentalement et numériquement. Cette image est la plus représentative de l'impact de la roue sur l'enrobé de BBMa. On peut remarquer que le point où les déplacements verticaux sont les plus importants est situé directement sous le centre de l'application de la charge( avec un déplacement vertical maximal de 1.85mm). De même, la partie gauche de l'enrobée qui a déjà subi le chargement n'a pas complètement repris sa forme initiale et un déplacement résiduel subsiste (d'une valeur de 0.195 mm). La partie droite de l'enrobée semble également subir un léger déplacement dû à la charge. Les résultats numériques montrent les mêmes tendances et ordres de

grandeur, ce qui permet de valider le modèle numérique proposé pour la description de l'essai d'orniérage. En ce qui concerne le champ de déplacement horizontal obtenu numériquement, on observe un déplacement important vers la droite (d'une valeur maximale égale à 0.8 mm) des particules au sein de l'échantillon, tandis qu'un déplacement moins important est observé vers la gauche de la roue (d'une valeur minimale égale à 0.35 mm)(figure 6). Le coefficient de frottement entre la plaque d'enrobés et l'acier est certainement différent de celui qui a été choisi, ceci explique les différences pour cette direction. Ce dernier fera l'objet prochainement d'une nouvelle estimation.

Il est également important de noter que les champs de déplacement ne sont pas uniformes dans la zone de chargement en raison de l'hétérogénéité du mélange bitumineux. De plus, une déformation résiduelle persiste après le premier passage du pneu, avec un déplacement maximal sous la charge du pneu. Cette déformation résiduelle est causée par le comportement viscoélastique de la loi de contact entre particules. Cette déformation permanente s'accroît avec le temps et génère l'orniérage de l'enrobé (figure 7).

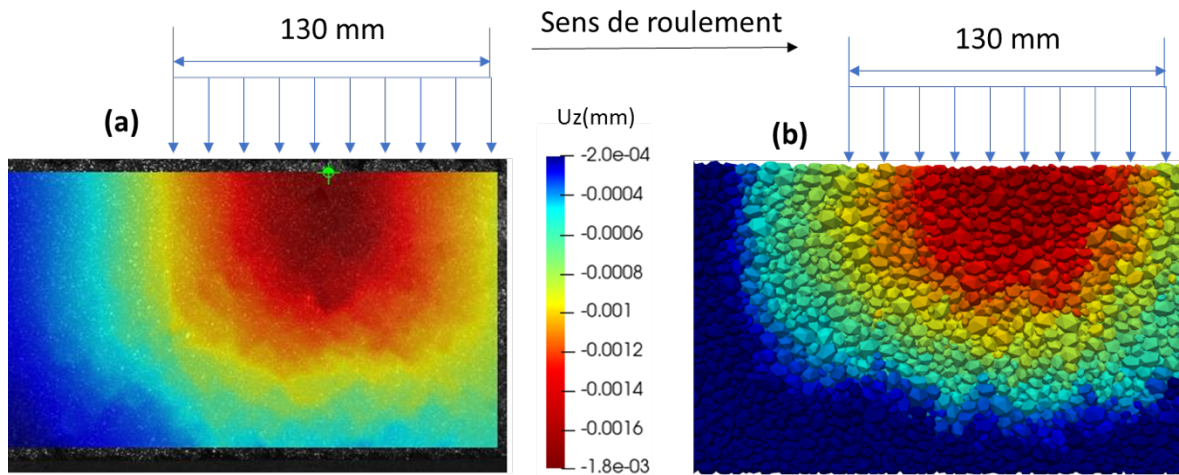


Figure 5. Confrontation entre les résultats expérimentaux (a) et numériques (b) pour le champ de déplacement vertical à T=22°C et la vitesse de passage de la roue v=5 km/h.

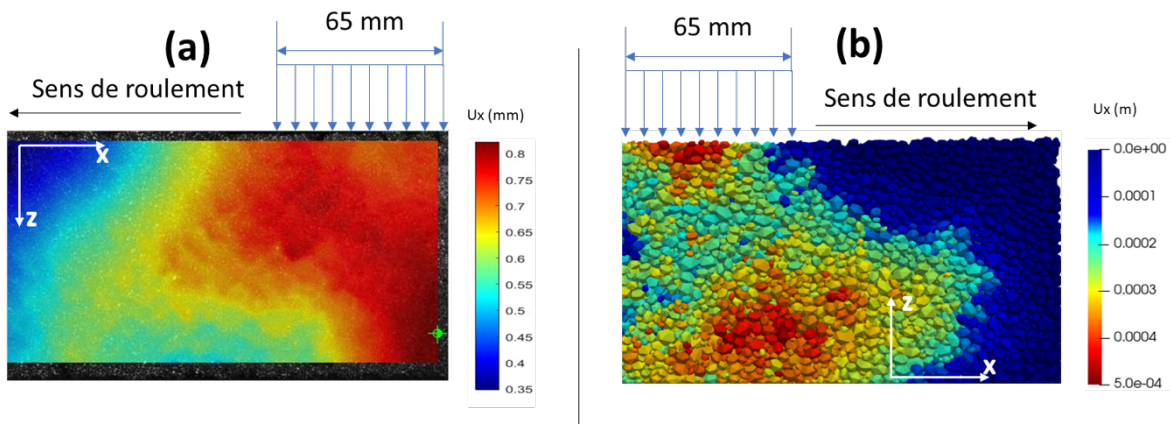


Figure 6. Confrontation entre les résultats expérimentaux et numériques pour le champ de déplacement horizontal à T=22 °C et vitesse de passage de la roue = 5 km/h.

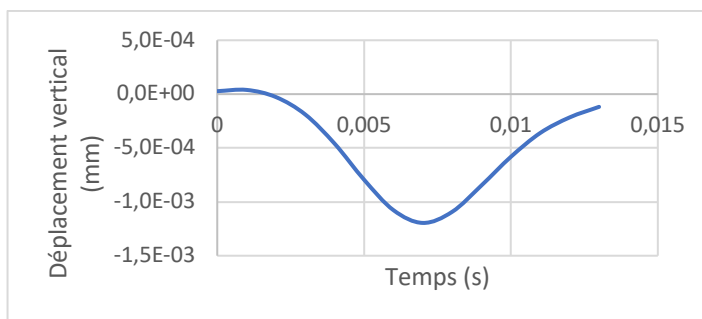


Figure 7. Courbe de déplacement vertical sous le chargement du pneu.

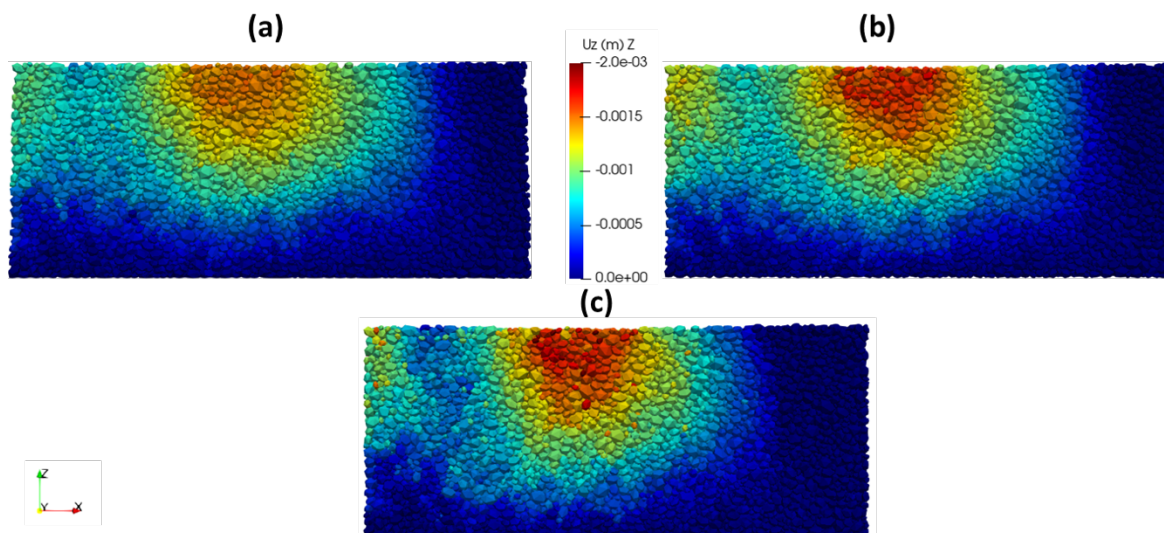


Figure 8. Comparaison numérique de l'effet de la température et de la vitesse sur le déplacement vertical sous le chargement du pneu pour a) :  $T=22\text{ °C}$  et  $V=5\text{ km/h}$  ; b) :  $T=22\text{ °C}$  et  $V=2,5\text{ km/h}$  ;  $T=40\text{ °C}$  et  $V=5\text{ km/h}$ .

D'autres essais numériques ont été effectués à une vitesse de 2,5 km/h et à des températures de 22 et 40 °C afin d'analyser l'effet de ces deux paramètres sur le déplacement des particules. En comparant la déformation verticale numérique obtenue pour ces conditions avec celle obtenue expérimentalement pour  $T=22\text{ °C}$  et  $V=5\text{ km/h}$  (figure 9), on remarque que la déformation augmente avec l'augmentation de la température et la diminution de la vitesse. Cette tendance est cohérente avec l'utilisation de la loi de contact viscoélastique.

#### 4. Conclusion et perspective

Cette étude a été motivée par la nécessité de mieux comprendre les mécanismes de déformation des enrobés bitumineux, en particulier l'orniérage, qui est l'un des défauts les plus courants affectant les chaussées bitumineuses. L'orniérage est un phénomène complexe causé par l'accumulation de déformations sur les routes causées par les charges des véhicules lents ou par températures élevées, qui entraînent une déformation permanente et une détérioration progressive de la chaussée.

Pour caractériser l'orniérage des enrobés à partir d'une approche micromécanique, cette étude propose un modèle 3D discret prenant en compte la granulométrie et les caractéristiques morphologiques des granulates, ainsi que la viscoélasticité du mastic d'enrobage. Le modèle

numérique proposé permet de reproduire les tendances observées lors des essais d'orniérage avec une précision satisfaisante.

Plus précisément, les résultats de cette étude montrent que le déplacement vertical et le déplacement horizontal de l'échantillon se produisent directement sous la zone de chargement, le déplacement vertical diminue progressivement de haut en bas de l'échantillon, tandis que le déplacement horizontal se produit principalement le long de la zone de chargement, zone centrale et inférieure le long de la hauteur du spécimen.

Le modèle numérique proposé est capable de reproduire ces tendances avec des valeurs de déformation numérique très proches des mesures expérimentales. De plus, cette étude qui a permis de simuler le comportement d'une plaque sous roulement libre, pose les bases pour développer une loi de prédiction de l'orniérage intégrant l'effet de différents paramètres environnementaux tels que la température, la vitesse et le nombre de cycles de chargement.

## 5. References

- Abu Al-Rub, R.K., Darabi, M.K., Huang, C.-W., Masad, E.A., Little, D.N., 2012. Comparing finite element and constitutive modelling techniques for predicting rutting of asphalt pavements. *Int. J. Pavement Eng.* 13, 322–338.
- Ali, B., 2006. *Modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées: application à l'analyse de l'orniérage*. Lille 1.
- Cai, W., McDowell, G.R., Airey, G.D., 2014. Discrete element visco-elastic modelling of a realistic graded asphalt mixture. *Soils Found.* 54, 12–22.
- Chazallon, C., Allou, F., Horny, P., Mouhoubi, S., 2009a. Finite elements modelling of the long-term behaviour of a full-scale flexible pavement with the shakedown theory. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 33, 45–70. <https://doi.org/10.1002/nag.702>
- Chazallon, C., Koval, G., Horny, P., Allou, F., Mouhoubi, S., 2009b. Modelling of rutting of two flexible pavements with the shakedown theory and the finite element method. *Comput. Geotech.* 36, 798–809.
- Collop, A.C., Cebon, D., 1997. Effects of 'road friendly' suspensions on long-term flexible pavement performance. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 211, 411–424. <https://doi.org/10.1243/0954406971521827>
- Collop, A.C., Cebon, D., Hardy, M.S.A., 1995. Viscoelastic Approach to Rutting in Flexible Pavements. *J. Transp. Eng.* 121, 82–93. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1995\)121:1\(82\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1995)121:1(82))
- Collop, A.C., McDowell, G.R., Lee, Y.W., 2006. Modelling dilation in an idealised asphalt mixture using discrete element modelling. *Granul. Matter* 8, 175–184.
- Di Benedetto, H., Corté, J.F., 2005. *Matériaux routiers bitumineux 2*. Hermès Lavoisier Ed.
- EN, C., 2012. Bituminous mixtures—test methods for hot mix asphalt—Part 26: Stiffness. *Eur. Comm. Stand. Bruss.*
- Ge, H., Quezada, J.C., Le Houerou, V., Chazallon, C., 2021. Three-dimensional simulation of asphalt mixture incorporating aggregate size and morphology distribution based on contact dynamics method. *Constr. Build. Mater.* 302, 124124.

- He, X., Abdelaziz, S., Chen, F., Yin, H., 2019. Finite element simulation of self-heated pavement under different mechanical and thermal loading conditions. *Road Mater. Pavement Des.* 20, 1807–1826.
- Kim, Y.-R., Little, D.N., 2004. Linear viscoelastic analysis of asphalt mastics. *J. Mater. Civ. Eng.* 16, 122–132.
- Nguyen, M.L., Balay, J.M., Di Benedetto, H., Sauzeat, C., Bilodeau, K., Olard, F., Héritier, B., Dumont, H., Bonneau, D., 2017. Evaluation of pavement materials containing RAP aggregates and hydraulic binder for heavy traffic pavement. *Road Mater. Pavement Des.* 18, 264–280.
- Quezada, J.C., Chazallon, C., 2022. Discrete element modelling of hot mix asphalt complex modulus using realistic aggregate shapes. *Road Mater. Pavement Des.* 1–18.
- Quezada, J.C., Chazallon, C., 2020. Complex modulus modeling of asphalt concrete mixes using the Non-Smooth Contact Dynamics method. *Comput. Geotech.* 117, 103255.
- Tschoegl, N.W., 2012. *The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior: an introduction.* Springer Science & Business Media.
- Wang, H., Zhou, Z., Huang, W., Dong, X., 2021. Investigation of asphalt mixture permanent deformation based on three-dimensional discrete element method. *Constr. Build. Mater.* 272, 121808.
- Xue, B., Xu, J., Pei, J., Zhang, J., Li, R., 2021. Investigation on the micromechanical response of asphalt mixture during permanent deformation based on 3D virtual wheel tracking test. *Constr. Build. Mater.* 267, 121031.
- Zhou, C., Zhang, M., Li, Y., Lu, J., Chen, J., 2019. Influence of particle shape on aggregate mixture's performance: DEM results. *Road Mater. Pavement Des.* 20, 399–413.