



HAL
open science

Effet du platooning sur l'orniérage des chaussées bitumineuses

Paulina Leiva-Padilla, Juliette Blanc, Emmanuel Chailleux, Ferhat Hammoum, Pierre Hornych

► **To cite this version:**

Paulina Leiva-Padilla, Juliette Blanc, Emmanuel Chailleux, Ferhat Hammoum, Pierre Hornych. Effet du platooning sur l'orniérage des chaussées bitumineuses. 27^e Congrès Mondial de la Route, AIPCR, Oct 2023, Prague, République tchèque. 13 p. hal-04454027

HAL Id: hal-04454027

<https://hal.science/hal-04454027>

Submitted on 12 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

EFFET DU PLATOONING SUR L'ORNIERAGE DES CHAUSSEES BITUMINEUSES

PRAGUE, RÉPUBLIQUE TCHÈQUE, 02-06 OCTOBRE, 2023

Paulina Leiva-Padilla, Juliette Blanc, Ferhat Hammoum,
Emmanuel Chailleux, Pierre Hornych
Département MAST – Université Gustave Eiffel, Campus Nantes, France
paulina.leiva-padill@univ-eiffel.fr

RESUME

La conduite des camions en convoi (ou platooning) est une solution qui utilise des systèmes de conduite automatisés pour améliorer l'efficacité et la sécurité du transport de marchandises et réduire la consommation de carburant et les émissions de CO₂. Cependant, le platooning peut également contribuer à augmenter l'endommagement des chaussées, par plusieurs facteurs : l'augmentation du nombre de répétitions de charges lourdes, avec un trafic fortement canalisé, la réduction des temps de repos entre applications des charges et la réduction des vitesses par rapport aux autres véhicules (moins de 90km/h avec les technologies de guidage actuelles). Un trafic lourd et canalisé, à vitesse lente et à température élevée, peut notamment augmenter le risque d'orniérage des chaussées bitumineuses. Cette étude a pour objectif d'évaluer l'orniérage produit par des configurations types de convois de camions, sur une structure de chaussée bitumineuse à fort trafic. Après avoir sélectionné un modèle viscoélastique pour la prédiction de l'orniérage des couches bitumineuses sous charges roulantes, une étude paramétrique est réalisée avec le modèle pour prédire l'effet de différents paramètres sur l'orniérage produit par les pelotons de camions : vitesse des camions, balayage latéral, température de la chaussée et types d'essieux de la remorque (à roues simples ou jumelées). Les résultats montrent que les configurations de convois de camions peuvent être optimisées pour réduire l'impact de ce nouveau type de charges sur les structures de chaussées. L'étude vise à aider les décideurs en charge des transports à définir des politiques permettant un bon déploiement des pelotons, en limitant leur impact sur la durabilité des structures de chaussées.

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, le secteur automobile a mis en avant l'intérêt des convois de camions partiellement/entièrement autonomes (Alam et al., 2015; Eilers et al., 2015; Gungor et al., 2020; Hoque et al., 2021; Humphreys et al., 2016; Konstantinopoulou et al., 2019; Ladino et al., 2021; Noorvand et al., 2017; Thunberg et al., 2019; Tsugawa et al., 2016) : meilleures capacités de freinage/accélération des véhicules, réduction de la consommation de carburant et des coûts d'exploitation des véhicules, amélioration de la sécurité routière et meilleur contrôle du trafic, entre autres.

Malgré ces avantages, un déploiement de convois de camions sans précautions peut conduire à une augmentation de l'endommagement des chaussées (Chen et al., 2019 ; Gungor & Al-Qadi, 2020 ; Noorvand et al., 2017). Il conduit en particulier à des charges plus canalisées (réduction du balayage latéral des camions), et à une réduction des distances entre camions, qui réduit la capacité d'auto-réparation des matériaux bitumineux.

Dans ce contexte, la Commission Européenne a lancé en 2018 un projet de recherche H2020 de 3 ans, appelé ENSEMBLE. L'objectif du projet ENSEMBLE était de contribuer à un déploiement sûr des convois de camions en Europe. En tant que partenaire du projet, l'Université Gustave Eiffel (précédemment connue sous l'acronyme IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) a mené dans ce projet différentes études visant à évaluer l'effet des camions en convoi sur le comportement en fatigue des chaussées bitumineuses (Leiva-Padilla, Blanc, Hammoum, et al., 2022; Leiva-Padilla, Blanc, Salgado, et al., 2022; Leiva-Padilla, Blanc, Trichet, Baudru, et al., 2022; Leiva-Padilla, Blanc, Trichet, Salgado, et al., 2022; Marsac et al., 2020).

Faisant suite aux études menées dans ENSEMBLE, cet article présente une étude théorique de l'orniérage produit sur la même structure de chaussée, avec le même type de convois de camions. L'étude se base sur la méthode PEDRO (Bjorklund, 1984; Said & Hakim, 2016) (Acronyme anglais : « PERmanent Deformation of asphalt concrete layers for ROads »). Cette méthode propose une approche mécanique simple mais réaliste pour la prévision de l'orniérage, que pourrait s'appliquer au dimensionnement des chaussées.

1.1. Déformations des matériaux bitumineux

Comme le montrent l'Equation 1 et la Figure 1, dans l'hypothèse des petites déformations, la réponse des matériaux bitumineux se caractérise par deux composantes de déformations (Chen et al., 2017; Huang et al., 2007, 2011; Perzyna, 1971): les déformations réversibles (ε_{ve} , qui peuvent être instantanées « élastiques » ou dépendantes du temps « viscoélastiques ») et les déformations irréversibles (ε_{vp} , ou permanentes « viscoplastiques »).

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp}$$

Equation 1

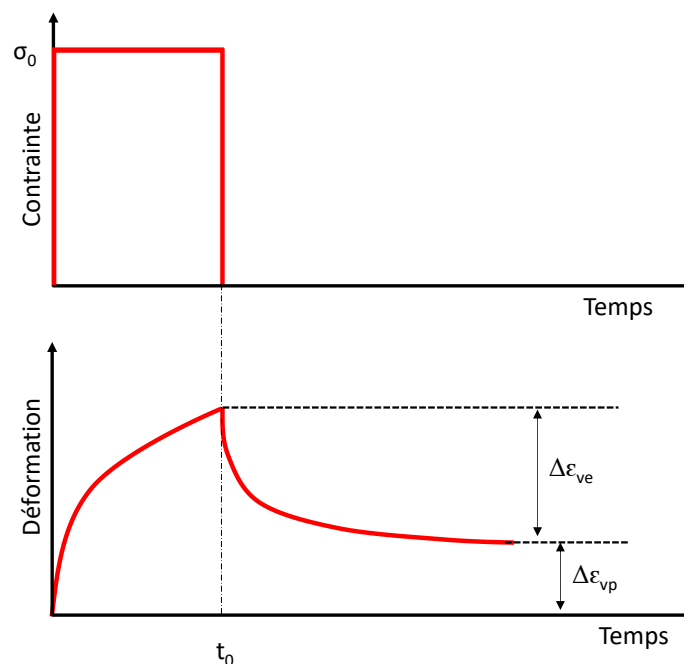


Figure 1. Composantes des déformations dans un essai de fluage / recouvrance (Chen et al., 2017)

Les approches développées pour décrire les composants de déformations, utilisent fréquemment la théorie de la viscoplasticité de Perzyna pour les déformations irréversibles (Perzyna, 1971). Pour la composante réversible, des modélisations élastiques ou viscoélastique sont utilisées, suivant le besoin de prendre en compte des vitesses lentes et

des températures élevées (Di Benedetto et al., 2007; Lu & Wright, 1998; Masad et al., 2005, 2007; Neifar & Di Benedetto, 2001).

Cependant, l'utilisation de modèles avancés augmente aussi la complexité des essais nécessaires pour déterminer leurs paramètres (Sohm et al., 2012). Dans cet article, on a cherché à utiliser une approche de modélisation de l'orniérage qui reste simple, basée sur le modèle proposé par la méthode PEDRO (Bjorklund, 1984; Said & Hakim, 2016). La méthode PEDRO utilise la théorie viscoélastique linéaire, et des paramètres déterminés à partir des essais de module complexe. Elle est basée sur une méthode de calcul analytique pour l'estimation de l'orniérage, utilisable pour des applications de dimensionnement (prenant en compte la charge à la roue, la pression de contact, la vitesse, la température, etc.). Cette méthode et son application sont décrites plus précisément dans la suite de l'article.

1.1.1 Model théorique d'orniérage de la méthode PEDRO

Le modèle d'orniérage de la méthode PEDRO utilise la viscoélasticité linéaire pour le calcul de la déformation verticale permanente produite par une charge roulante (se déplaçant à une vitesse V , m/s, Equation 2) dans un demi-espace viscoélastique (Bjorklund, 1984; Said & Hakim, 2016).

La méthode PEDRO permet le calcul de la déformation permanente verticale (ε_p , Equation 2) par l'addition de deux termes (Bjorklund, 1984; Said & Hakim, 2016) : la déformation volumique ($\varepsilon_{p_{com}}$, quand le matériau présente un changement de volume significatif, Equation 3) et la déformation de cisaillement ($\varepsilon_{p_{cis}}$, quand le changement de volume est pratiquement nul, Equation 4).

Comme le montrent l'Equation 3 et l'Equation 4, cette approche considère la viscosité de l'enrobé à taux de cisaillement nul (η_p , Pa.s) comme propriété pour caractériser la déformabilité de l'enrobé bitumineux. La compressibilité volumique ou densification prend en compte le coefficient de Poisson (ν). Le contact pneu-surface de chaussée est représenté, dans les deux équations, par la pression de contact (σ_0 , Pa) et le rayon de l'aire de contact (a , m).

La position transversale (distance à partir du centre de la charge, x , m) et la profondeur (z , m) sont utilisées pour calculer l'état de déformation en différents points des couches bitumineuses. Pour les deux équations $i = \sqrt{-1}$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{p_{com}} + \varepsilon_{p_{cis}} \quad \text{Equation 2}$$

$$\varepsilon_{p_{com}} = \frac{\sigma_0(1-2\nu)}{V \eta_p} \operatorname{Re} \left[\sqrt{(z+ix)^2 + a^2} - (z+ix) \right] \quad \text{Equation 3}$$

$$\varepsilon_{p_{cis}} = \frac{\sigma_0 z}{V \eta_p} \operatorname{Re} \left[1 - \frac{z+ix}{\sqrt{(z+ix)^2 + a^2}} \right] \quad \text{Equation 4}$$

A partir de ces équations, la profondeur d'ornière d'une couche de chaussée (δ_k) (déplacement vertical cumulé) est calculée par l'addition des déformations permanentes verticales obtenues suivant une ligne verticale. Pour cela, chaque couche bitumineuse est subdivisée en n sous-couches verticales, d'épaisseur (h_j). La profondeur d'ornière est alors calculée par l'Equation 5 :

$$\delta_k = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{pj} * h_j \quad \text{Equation 5}$$

Cette valeur peut être cumulée comme le montre l'Equation 6, pour calculer l'orniérage total (δ_t) des n_c couches de la structure, pour une position transversale spécifique à la surface de la chaussée, et pour un nombre n_{pl} de points suivant le profil longitudinal de la chaussée.

$$\delta_t = \sum_{m=1}^{n_{pl}} \sum_{k=1}^{n_c} \delta_{k,m} \quad \text{Equation 6}$$

2. MATERIAUX ET HYPOTHESES DE CALCUL

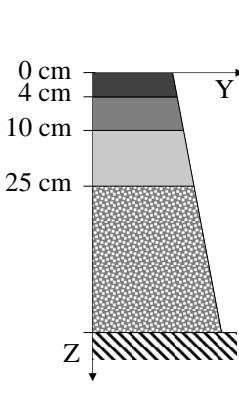
2.1 Structure de chaussée

En raison du lien de cette étude avec les travaux du projet européen ENSEMBLE, la structure de chaussée étudiée correspond à une section expérimentale située sur les pistes d'essai de l'entreprise IDIADA Applus, à Tarragone, Espagne. Comme le montre le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, la structure de chaussée est composée d'une couche de fondation en grave non traitée, et de trois couches bitumineuses : une couche de base de 15 cm d'épaisseur, une couche de liaison de 6 cm et une couche de roulement de 4 cm.

Selon la norme UNE-EN 13108-1, les mélanges bitumineux de chaque couche sont classés comme : AC 22 G (G-20), AC 22 S (S-20) et AC11. Ces mélanges ont été mis en œuvre avec des pourcentages de vides de 4.7% à 6.8%, avec un liant bitumineux de type PMB 45-80/65 (liant modifié aux polymères suivant la norme UNE-EN 14023).

La viscosité à taux de cisaillement nul (η_0) de chaque couche bitumineuse a été déterminée par l'extrapolation, à une fréquence nulle, des viscosités calculées à partir des courbes maitresses de module complexe des matériaux bitumineux, selon la méthode proposé par (Zeida et al., 2022). Ces courbes de module complexe ont été tirées de l'étude de (Mateos & Soares, 2015), réalisée sur des matériaux similaires, pour deux températures d'analyse : 10°C (climat frais) et 60°C (climat chaud).

Tableau 1 : Caractéristiques des couches bitumineuses.

	Couche	Epaisseur (cm)	Coefficient de Poisson* ν		Viscosité du mélange bitumineux à taux de cisaillement nul ** η_0 (Pa s)	
			10°C	60°C	10°C	60°C
			Couche de roulement AC11	4	0,24	0,48
Couche de liaison AC22 S (S-20)	6	0,24	0,48	4,89E+08	3,03E+07	
Couche de base AC22 G (G-20)	15	0,24	0,48	4,67E+08	1,95E+07	

Notes Tableau 1 :

* Calculé à partir de $\nu = 0,15 + \frac{0,35}{1 + \exp(3,1849 - 0,04233 * T)}$ (Witczak & Mirza, 1999).

** Calculé à partir des résultats de l'étude de (Mateos & Soares, 2015).

2.2 Hypothèses de calcul

L'objectif de l'étude a consisté à étudier les déformations permanentes produites par des camions semi-remorque de type T2S3 (tracteur à 2 essieux et semi-remorque à 3 essieux), pour deux vitesses (40km/h et 80km/h), en considérant deux configurations : un camion isolé (Voir Figure 2, Cas 1) et un convoi de trois camions, avec un intervalle de temps variable entre camions (de 0,5 s et 1,5 s) et un balayage latéral des charges (égal à 0 ou ± 20 cm).

Comme le montre la Figure 2, les rayons des charges et les pressions de contact des pneus des camions utilisés pour l'étude correspondent à ceux d'un camion T2S3 chargé à 44 tonnes (charge maximale en France) et avec des roues simples (Cas 1) ou jumelés (Cas 2) sur la remorque.

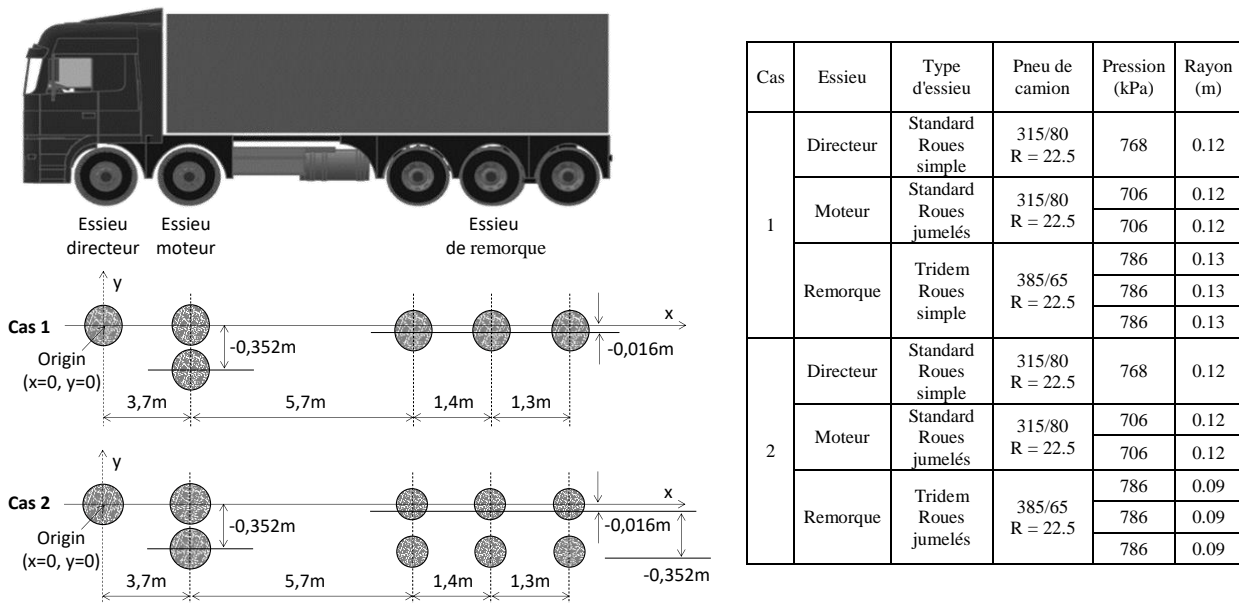


Figure 2. Charges de référence pour les camions T2S3

3. RESULTATS

3.1 Composantes de déformations permanentes verticales

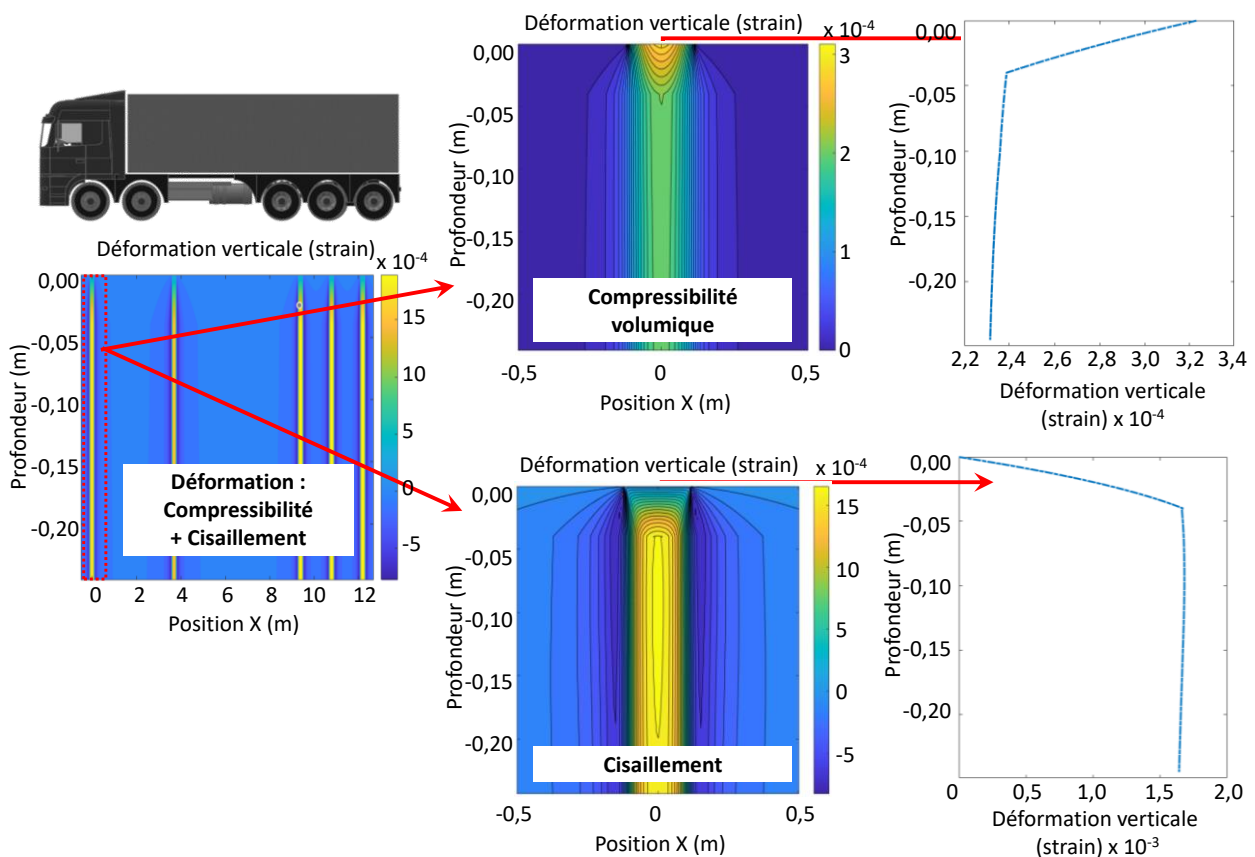
Les résultats présentes ici concernent uniquement des calculs théoriques réalisés avec le modèle d'orniérage PEDRO, présenté précédemment. Dans le cadre du projet ENSEMBLE, il n'a pas été possible de réaliser une expérience d'orniérage sur site, qui aurait été très longue et très coûteuse, car ce type d'étude nécessite de réaliser un grand nombre de passages de poids-lourds, sur une longue durée. Ce travail, qui complète les études menées dans le projet ENSEMBLE, sur la problématique de l'orniérage, se limite donc à une approche théorique, par la modélisation.

La Figure 3 présente la répartition des déformations permanentes verticales calculées pour les couches bitumineuses (d'épaisseur 250 mm) de la structure de chaussée étudiée, pour une température de 60°C, pour un camion T2S3 isolé, circulant à 40km/h, sans balayage latéral. La Figure 3 montre aussi la répartition des déformation permanentes volumiques et de cisaillement, sous l'essieu directeur. Elle représente également l'évolution des déformations avec la profondeur (seulement pour les couches bitumineuses), sous le centre de la charge. Les résultats montrent que :

- Pour la composante de compressibilité volumique de la déformation, les valeurs les plus élevées sont obtenues au niveau de la surface des couches bitumineuses et en-

dessous de la charge. Les valeurs diminuent avec la profondeur avec une pente plus élevée pour la première couche. L'orniérage est calculé uniquement dans les couches bitumineuses. Il est supposé nul dans la plate-forme (profondeur > 250 mm). A l'extérieur de la zone chargée, les déformations sont nulles en surface, et augmentent avec la profondeur, jusqu'à une valeur maximale au niveau de la base de la première couche.

- Pour la composante de cisaillement, les valeurs de déformations permanentes augmentent avec la profondeur, et plus vite dans la première couche. Cela justifie l'importance d'utiliser des matériaux résistants à l'orniérage pour la couche de roulement. Les valeurs diminuent avec l'augmentation de la distance à la charge et sont négatives en bord de charge. Les valeurs positives correspondent à un tassement, qui se produit sous la charge. Les valeurs négatives correspondent à un soulèvement, qui se produit au bord de la zone chargée.



3.2 Effet du balayage transversal des camions

La Figure 4 montre l'orniérage (déplacement vertical permanent) produit par la composante de compressibilité volumique et par la composante de cisaillement, après 30000 cycles de chargement, et le cumul de ces deux effets. La Figure 4 compare l'orniérage (déplacement vertical permanent) produit à la base de chaque couche bitumineuse de la chaussée par les passages d'un camion isolé sans balayage, et de trois camions en convoi, avec et sans balayage transversal. Les conditions de chargement sont les mêmes que précédemment (température 60 °C, vitesse 40 km/h). L'analyse des résultats montre que pour la structure étudiée :

- L'orniérage dû à la compressibilité volumique correspond à la densification du matériau sous les premiers chargements (post-compactage). Dans le modèle, cette composante volumique est fonction du coefficient de Poisson. Dans cette étude, on

a considéré, par simplification, un coefficient de Poisson constant égale à 0,48 (à 60°C). Pour cette valeur du coefficient de Poisson, la composante volumique représente une faible part de l'orniérage total (entre 2% et 8%). Cette modélisation pourrait être améliorée en prenant en compte une évolution du coefficient de Poisson avec le temps et la température, basée sur des données expérimentales.

- L'orniérage dû au cisaillement se développe sur une plus grande largeur. Sa valeur représente entre 92% et 98% de l'orniérage total.
- L'orniérage maximal atteint 8,7 mm dans le cas du convoi de 3 camions. Il se développe essentiellement dans la couche de base.
- Dans les cas sans balayage, l'orniérage produit par des convois de 3 camions augmente la profondeur d'ornière totale de 11% dans la zone située sous le centre de la charge, par rapport à des camions isolés.
- L'ajout d'un balayage transversal B de ± 20 cm, dans le cas du convoi, permet de répartir l'orniérage sur une plus grande largeur, et réduit la profondeur d'ornière maximale de 43%.

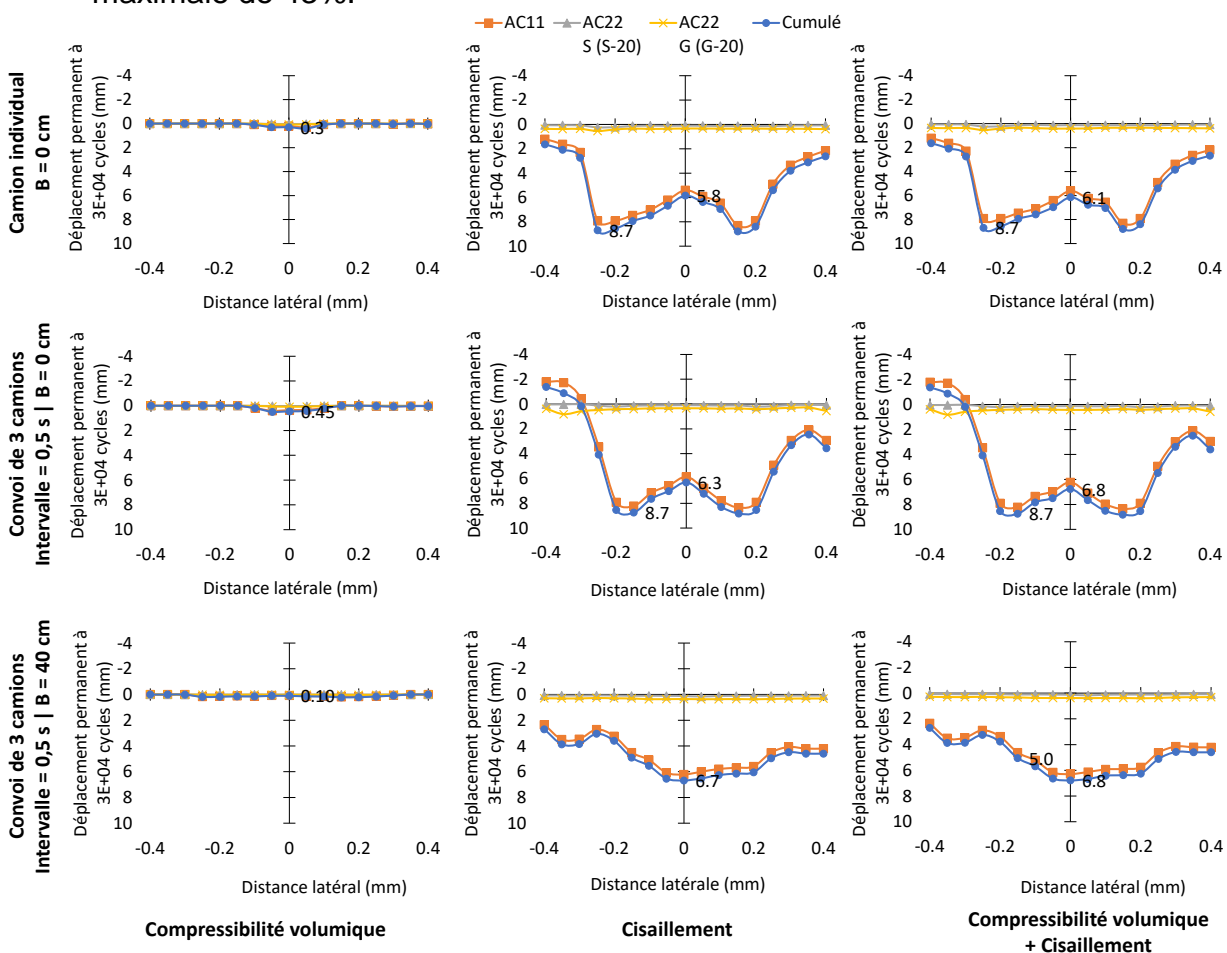


Figure 4. Orniérage obtenu après 30000 cycles (avec et sans balayage, déplacement vers le bas positif, température = 60°C, vitesse = 40 km/h)

3.3 Effet de la vitesse, de la température et de l'intervalle entre camions

La Figure 5 compare l'orniérage total produit par un seul passage d'un camion isolé ou d'un convoi de 3 camions, à 40 km/h et 80 km/h, et pour des températures des couches bitumineuses de 10°C et 60°C. Ces figures mettent en évidence que :

- Augmenter l'intervalle entre camions de 0,5 s (ce qui représente 5,6 m à 40 km/h et 11,1 m à 80 km/h) à 1,5 s (16,7 m à 40 km/h et 33,3 m à 80 km/h), peut réduire l'orniérage produit par le convoi étudié de 11% à 40 km/h et de 33% à 80 km/h, pour les deux températures.

- L'orniérage augmente quand la vitesse des camions diminue, et quand la température augmente. Par exemple, pour la configuration étudiée, à 60°C et pour un convoi de 3 camions séparés avec un intervalle de 0,5 s, réduire la vitesse de 80 km/h à 40 km/h, conduit à augmenter l'orniérage par un facteur 2,2.
- La température a un effet très important. Lorsque la température baisse de 60°C à 10°C, l'orniérage est réduit de 94% (42% en passant de 60°C à 30°C et 52% en passant de 30°C à 10°C). A 10 °C et 80 km/h, on peut noter que l'orniérage du convoi (intervalle = 1,5 s) est quasi nul ($5,19 \times 10^{-5}$ mm)

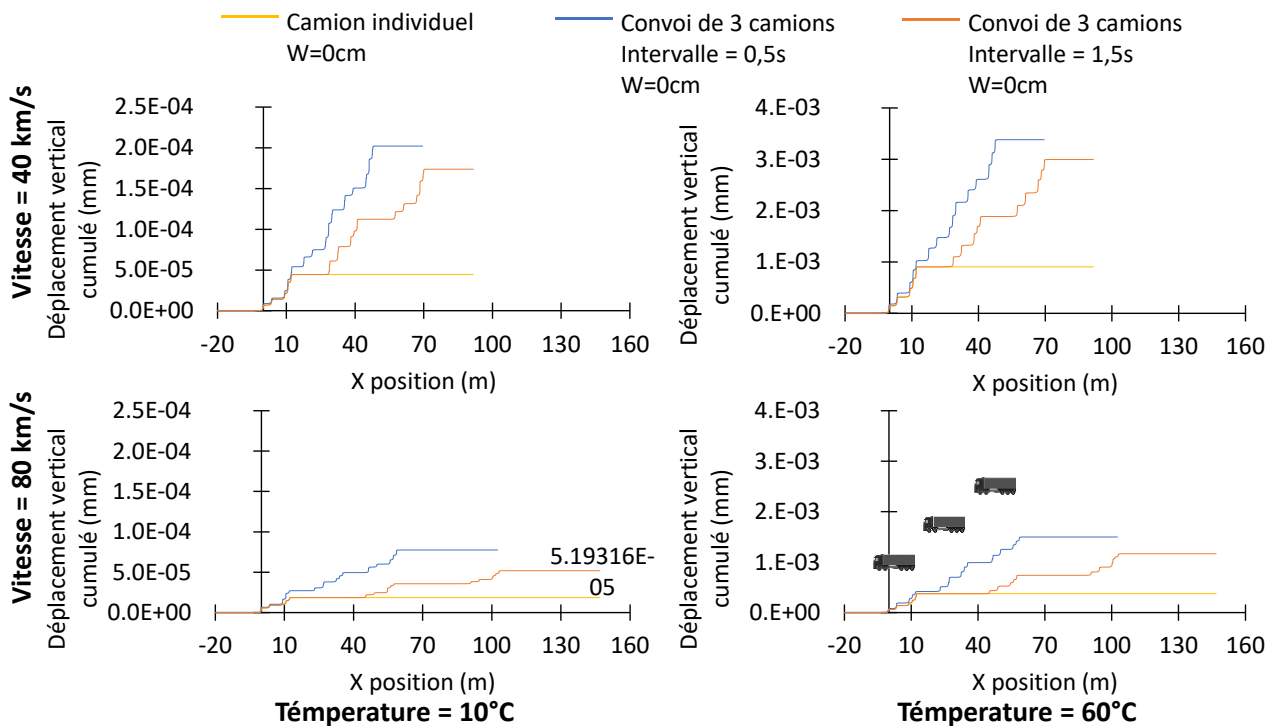


Figure 5. Effet de la vitesse, de la température et de l'intervalle entre camions sur l'orniérage (déplacement vers le bas positif, un seul passage de camion isolé ou de convoi)

3.4 Effet d'essieux tridem a roues simples ou jumelées

La Figure 6 compare l'orniérage total produit par un seul passage de 3 camions en convoi, avec l'essieu tridem de la semi-remorque, équipé de roues simples ou jumelées. L'exemple présenté correspond à un intervalle de 0,5 s entre camions, une vitesse de 40 km/h et une température de 60°C. Les résultats montrent que remplacer les roues simples par des roues jumelées permet une meilleure répartition des charges et permet de réduire l'orniérage de 29% pour un passage de camions en convoi, au début de la durée de vie de la route.

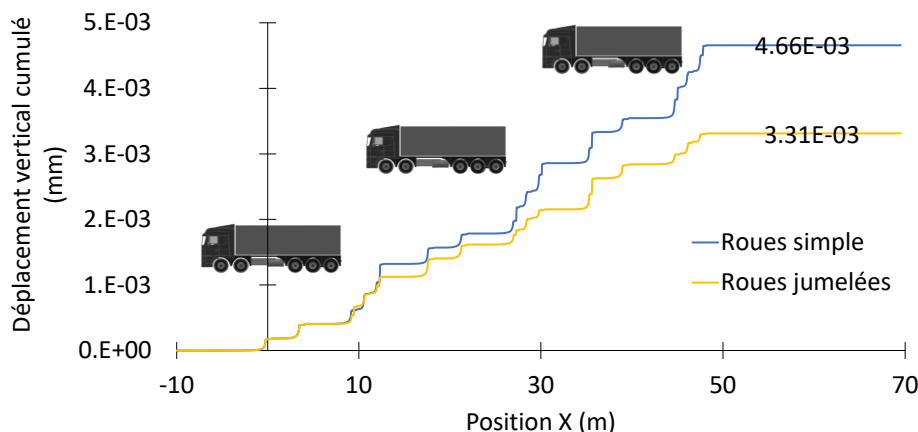


Figure 6. Effet de l'utilisation de roues simples ou jumelées sur l'orniérage
(Déplacement vers le bas positif, un seul passage de camions en convoi, Intervalle = 0,5s, Température = 60°C,
Balayage latéral = 0 m, Vitesse = 40km/h)

3.5 Comparaison des effets des différents paramètres de chargement.

La Figure 7 présente une comparaison des valeurs d'orniérage calculées à la position transversale 0 (voir schéma de la figure 2), c'est-à-dire dans la direction longitudinale, sous le centre de la roue droite de l'essieu directeur (considérée comme position de référence), pour les différents cas analysés dans cet article. Les calculs ont été réalisés pour 30000 cycles, par référence à l'essai d'orniérage de la norme NF EN 12697-22 : Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22 : essai d'orniérage. Cet essai comprend 30000 cycles de chargement, pour la plupart des matériaux. Les résultats montrent qu'après 30000 cycles de chargement :

- Pour les différents cas de vitesses et températures analysés, les valeurs d'orniérage varient entre 0,04% et 2,46% par rapport à l'épaisseur totale des couches bitumineuses (250 mm).
- Comme on pouvait s'y attendre, l'effet le plus important est celui de la température : augmenter la température de 10°C à 60°C multiplie l'orniérage par un facteur de 16 à 30. On peut noter que pour tous les cas de chargement étudiés, l'orniérage reste négligeable pour la température de 10 °C (inférieur à 0,40 mm dans tous les cas)
- L'effet de la vitesse est également très significatif. Réduire la vitesse de 80 km/h à 40 km/h augmente l'orniérage par un facteur de 2,3 à 5,2 à 60°C. Les effets de la vitesse et de la température sont associés au comportement viscoélastique des matériaux bitumineux, qui semble être bien représenté par le modèle d'orniérage utilisé.
- L'inclusion d'un balayage latéral relativement faible, de ± 20 cm, pour le convoi de camions étudié, permet de répartir l'orniérage sur une plus grande largeur de la chaussée, et permet de réduire l'orniérage à la position de référence de 28% à 34%, suivant les cas étudiés à 10°C. A 60°C, les valeurs d'orniérage sont les mêmes, pour cette position de référence. Néanmoins, on peut voir sur la Figure 4 que le balayage latéral de ± 20 cm permet de réduire l'orniérage maximal de 43%.
- Le graphique confirme aussi qu'augmenter l'intervalle de séparation entre les camions du convoi de 0,5 s à 1,5 s permet également de réduire l'orniérage de 14% à 28% à 10°C.
- Finalement, l'utilisation de roues jumelées sur les essieux tridem de la remorque permet aussi une meilleure répartition des charges, et donc une réduction de l'orniérage des couches bitumineuses de l'étude. Cette réduction est de 11% à 62% suivant les cas étudiés, en comparaison avec l'utilisation de roues simples.

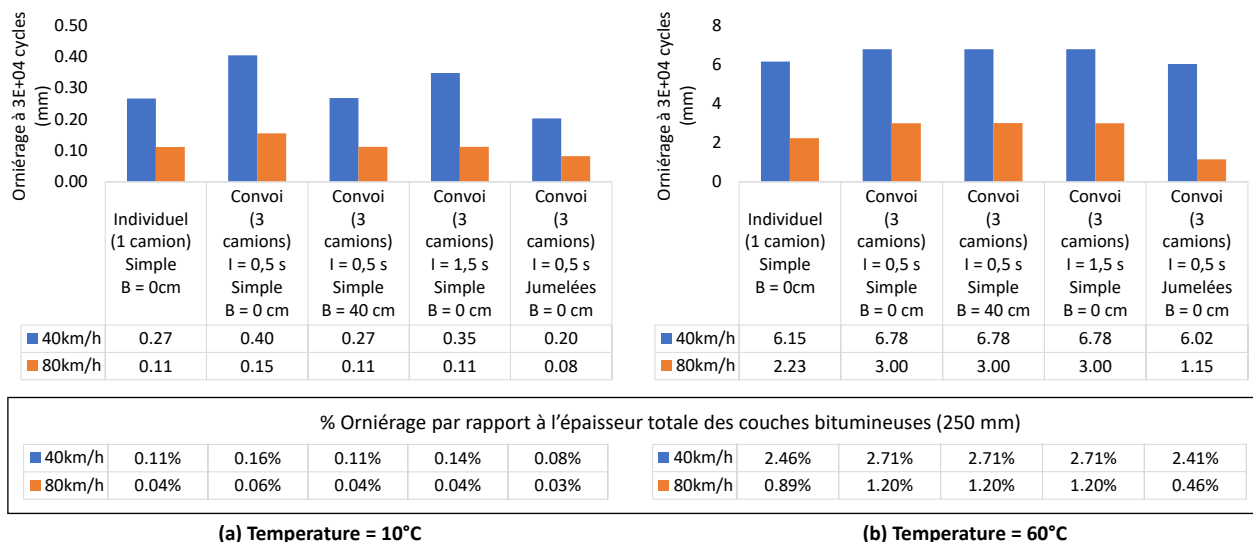


Figure 7. Comparaison des effets des différents paramètres des convois sur l'orniéage obtenu dessous la charge après 30000 cycles de chargement

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article présente une suite des recherches menées dans le projet européen ENSEMBLE, sur l'effet de l'utilisation des convois de camions sur les dégradations des chaussées bitumineuses. Dans cet article, on s'est intéressé à la prévision de l'orniéage des couches bitumineuses, en se basant sur des calculs théoriques, réalisés avec le modèle d'orniéage PEDRO, proposé par (Bjorklund, 1984; Said & Hakim, 2016), qui permet de réaliser des calculs analytiques relativement simples, tout en prenant en compte les principaux paramètres influents (vitesse, température, niveau de charge, balayage latéral des charges). L'étude permet de conclure que :

- La méthode PEDRO permet de calculer séparément deux composantes de la déformation permanente verticale des matériaux bitumineux : la composante de compressibilité volumique et la composante de cisaillement. La compressibilité volumique est plus importante au début du développement de l'orniéage (lors des premiers chargements), et elle dépend, dans le modèle, de la valeur du coefficient de Poisson. Pour mieux estimer cette composante volumique, il faudrait prendre en compte une variation du coefficient de Poisson avec le temps, basée sur des essais de laboratoire.
- Des mesures peuvent être prises pour réduire les risques d'endommagement (et ici en particulier d'orniéage) des chaussées bitumineuses par les convois de camions. L'introduction d'un balayage latéral, ou une meilleure répartition des charges par l'utilisation de roues jumelées apparaissent en particulier comme des mesures efficaces pour réduire l'effet des convois de camions sur les chaussées bitumineuses. Inciter à la circulation des convois lors des heures et périodes de l'année où les températures sont moins élevées, et augmenter les intervalles entre camions permettrait également de limiter les dégradations. Enfin, la vitesse des camions a également un effet très significatif sur l'orniéage, dont il faut tenir compte.
- Cette étude constitue une première approche pour la prédiction de l'orniéage, qui repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui pourraient être améliorées dans la suite de ce travail. En particulier, il serait intéressant :
 - De discrétiser les surfaces de charge, afin de mieux rendre en compte les distributions réelles de charges et de pressions des pneumatiques.
 - D'étendre cette analyse à d'autres cas de matériaux et de structures de chaussées.
 - De prendre en compte l'effet des variations réelles de température (saisonniers ou journalières) sur le calcul de l'orniéage cumulé.

- Finalement, il sera également nécessaire de réaliser une validation expérimentale des résultats obtenus par la modélisation, soit par des essais d'orniérage en laboratoire soit par des essais accélérés en vraie grandeur (qui sont plus complexes à réaliser). Cette validation devrait permettre de recalibrer ou d'améliorer la modélisation proposée. Cela permettra, in fine, d'aider les autorités de transport à définir des politiques permettant le développement du platooning, tout en préservant la durabilité des structures de chaussées.

5. REMERCIEMENTS

Ces travaux sont menés dans le cadre du programme de recherche public-privé « France Relance » lancé pour le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) et le plan NextGenerationEU de l'Union Européenne et s'inscrivent dans la continuité du projet ENSEMBLE, cofinancé par l'Union européenne dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon2020, accord de subvention n° 769115, que a fini en mars 2022 et de lequel l'Université Gustave Eiffel a été partenaire.

REFERENCES

- Alam, A., Besselink, B., Turri, V., Martensson, J., & Johansson, K. H. (2015). Heavy-duty vehicle platooning for sustainable freight transportation: A cooperative method to enhance safety and efficiency. *IEEE Control Systems*. <https://doi.org/10.1109/MCS.2015.2471046>
- Bjorklund, A. (1984). *Creep induced behaviour of resurfaced pavements*.
- Chen, F., Balieu, R., & Kringos, N. (2017). Thermodynamics-based finite strain viscoelastic-viscoplastic model coupled with damage for asphalt material. *International Journal of Solids and Structures*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.09.014>
- Di Benedetto, H., Mondher, N., Sauzéat, C., & Olard, F. (2007). Three-dimensional thermo-viscoplastic behaviour of bituminous materials: The DBN model. *Road Materials and Pavement Design*, 8(2). <https://doi.org/10.3166/rmpd.8.285-315>
- Eilers, S., Martensson, J., Pettersson, H., Pillado, M., Gallegos, D., Tobar, M., Johansson, K. H., Ma, X., Friedrichs, T., Borojeni, S. S., & Adolfson, M. (2015). COMPANION-Towards Co-operative Platoon Management of Heavy-Duty Vehicles. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.208>
- Gungor, O. E., She, R., Al-Qadi, I. L., & Ouyang, Y. (2020). One for all: Decentralized optimization of lateral position of autonomous trucks in a platoon to improve roadway infrastructure sustainability. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102783>
- Hoque, M. M., Lu, Q., Ghiasi, A., & Xin, C. (2021). Highway Cost Analysis for Platooning of Connected and Autonomous Trucks. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 147(1). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000474>
- Huang, C. W., Abu Al-Rub, R. K., Masad, E. A., Little, D. N., & Airey, G. D. (2011). Numerical implementation and validation of a nonlinear viscoelastic and viscoplastic model for asphalt mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4). <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.574137>
- Huang, C. W., Masad, E., Muliana, A. H., & Bahia, H. (2007). Nonlinearly viscoelastic analysis of asphalt mixes subjected to shear loading. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 11(2). <https://doi.org/10.1007/s11043-007-9034-5>
- Humphreys, H. L., Batterson, J., Bevely, D., & Schubert, R. (2016). An Evaluation of the Fuel Economy Benefits of a Driver Assistive Truck Platooning Prototype Using Simulation. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0167>

- Konstantinopoulou, L., Coda, A., & Schmidt, F. (2019). Specifications for Multi-Brand Truck Platooning. *ICWIM 8, 8th International Conference on Weigh-In-Motion, May 2019*, 8.
- Ladino, A., Xiao, L., Adjenugwhure, K., Deschle, N., & Klunder, G. (2021). Cross-Platform Simulation Architecture with application to truck platooning impact assessment. *27th ITS World Congress, 11-15 October*.
- Leiva-Padilla, P., Blanc, J., Hammoum, F., Salgado, A., Chailleux, E., Mateos, A., & Hornychn, P. (2022). The impact of truck platooning action on asphalt pavement: a parametric study. *International Journal of Pavement Engineering*. <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2103700>
- Leiva-Padilla, P., Blanc, J., Salgado, A., Hammoum, F., & Hornychn, P. (2022). Fatigue Life Predictions for a European Pavement Test Section Subjected to Individual and Platoon Truck Configurations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119812110654. <https://doi.org/10.1177/03611981211065430>
- Leiva-Padilla, P., Blanc, J., Trichet, S., Baudru, Y., Nguyen, M. L., Gouy, T., Hammoum, F., & Hornychn, P. (2022). The Impact of Platooning action on asphalt Pavement: Monitoring on site. *11th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*.
- Leiva-Padilla, P., Blanc, J., Trichet, S., Salgado, A., Hammoum, F., & Hornychn, P. (2022). Comparison of the response of an instrumented pavement section under individual and platoon truck loading. *International Journal of Pavement Engineering*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2028145>
- Lu, Y., & Wright, P. J. (1998). Numerical approach of visco-elastoplastic analysis for asphalt mixtures. *Computers and Structures*, 69(2). [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00139-4)
- Marsac, P., Blanc, J., Chupin, O., Gabet, T., Hammoum, F., Garg, N., & Nguyen, M. L. (2020). Optimization of truck platoon wander patterns based on thermo-viscoelastic simulations to mitigate the damage effects on road structures. In *Lecture Notes in Civil Engineering: Vol. 96 LNCE*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7_11
- Masad, E., Dessouky, S., & Little, D. (2007). Development of an Elastoviscoplastic Microstructural-Based Continuum Model to Predict Permanent Deformation in Hot Mix Asphalt. *International Journal of Geomechanics*, 7(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2007\)7:2\(119\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2007)7:2(119))
- Masad, E., Tashman, L., Little, D., & Zbib, H. (2005). Viscoplastic modeling of asphalt mixes with the effects of anisotropy, damage and aggregate characteristics. *Mechanics of Materials*, 37(12). <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2005.06.003>
- Mateos, A., & Soares, J. B. (2015). Validation of a dynamic modulus predictive equation on the basis of Spanish asphalt concrete mixtures. *Materiales de Construcción*, 65(317). <https://doi.org/10.3989/mc.2015.01114>
- Neifar, M., & Di Benedetto, H. (2001). Thermo-viscoplastic law for bituminous mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/14680629.2001.9689894>
- Noorvand, H., Karnati, G., & Underwood, B. S. (2017). Autonomous vehicles: Assessment of the implications of truck positioning on flexible pavement performance and design. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.3141/2640-03>
- Perzyna, P. (1971). Thermodynamic Theory of Viscoplasticity. *Advances in Applied Mechanics*, 11(C). [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70345-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70345-4)
- Said, S. F., & Hakim, H. (2016). Asphalt concrete rutting predicted using the PEDRO model. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(3). <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.993184>
- Sohm, J., Gabet, T., Hornychn, P., Piau, J. M., & Di Benedetto, H. (2012). Creep tests on bituminous mixtures and modelling. *Road Materials and Pavement Design*, 13(4). <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.735795>
- Thunberg, J., Lyamin, N., Sjoberg, K., & Vinel, A. (2019). Vehicle-to-Vehicle

- Communications for Platooning: Safety Analysis. *IEEE Networking Letters*, 1(4).
<https://doi.org/10.1109/lnet.2019.2929026>
- Tsugawa, S., Jeschke, S., & Shladovers, S. E. (2016). A review of truck platooning projects for energy savings. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.
<https://doi.org/10.1109/TIV.2016.2577499>
- Witczak, M., & Mirza, M. (1999). *Development of Relationships to Predict Poisson's Ratio for Paving Materials*. University of Maryland, College Park, MD, InterTEAM Technical Report for NCHRP 1-37A.
- Zeida, W., Liu, H., Al-Khateeb, G. G., Shanableh, A., & Samarai, M. (2022). Evaluation of test methods for measurement of zero shear viscosity (ZSV) of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 325.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126794>