

# Évaluation de l'agressivité du trafic sur des chaussées bitumineuses en carrefour giratoire

ZOA AMBASSA

Université de Limoges, Groupe d'étude des matériaux hétérogènes, Égletons, France

Université de Yaoundé I, Yaoundé, Cameroun

Fatima ALLOU

Université de Limoges, Groupe d'étude des matériaux hétérogènes, Égletons, France

Christophe PETIT

Université de Limoges, Groupe d'étude des matériaux hétérogènes, Égletons, France

Robert MEDJO EKO

Université de Yaoundé I, Yaoundé, Cameroun

## ■ RÉSUMÉ

Cet article porte sur l'étude de l'agressivité du trafic routier sur les chaussées bitumineuses épaisses situées en giratoire et sur le dimensionnement de ces structures particulières. L'endommagement de la couche de base est analysé en fonction des déformations induites par les sollicitations verticales et centrifuges apportées par le trafic lourd et sur la base du critère usuel de fatigue des enrobés bitumineux de la méthode française de dimensionnement des chaussées.

Un nouveau critère est introduit, relatif à la tenue en fatigue de l'interface EB/GB entre couche de surface et couche de base, sous l'effet des contraintes de cisaillement répétées subies par la structure. Trois structures types du catalogue de chaussées sont analysées. Les calculs de contrainte et déformation sont effectués à partir de modélisations 3D réalisées à l'aide du code de calcul aux Eléments Finis Cast3M. Les résultats confirment que l'agressivité du trafic augmente sensiblement en giratoire, par rapport aux sections droites, notamment à cause de la dissymétrie des charges à l'essieu et des sollicitations tangentielles appliquées. Les calculs en fatigue montrent que l'endommagement de l'interface couche de surface-couche de base peut parfois être prépondérant devant le critère de déformation en base des couches liées. Des coefficients d'agressivité sont proposés pour ramener le dimensionnement en giratoire au dimensionnement usuel des tronçons en alignement droit.

## Evaluation of traffic aggressiveness on bituminous pavements in roundabouts

### ■ ABSTRACT

*This article is about the study of traffic aggressiveness on thick bituminous pavements located in roundabouts and the design of such specific structures. The damaging of base layer is analysed in terms of strains produced by the vertical and centrifugal loads brought by the heavy traffic and by reference to the usual criterion for asphalt concrete fatigue in the French pavement design method. A new criterion is introduced, relative to the resistance to fatigue of the surface layer/base layer interface, which is submitted to repeated shear loading. Three models of structures chosen in the French catalogue of pavement structures are analysed. The stress and strain values were obtained from 3D finite elements analyses using the FEM code Cast3M. The results confirm that traffic aggressiveness increases markedly in roundabouts, when compared to straight road sections. This is due, in particular, to the dissymmetry of axle loads and to the tangential loads applied. Fatigue calculations show that the damage at the interface of surface layer and base layer may sometimes be more important than the deformation at the bottom of bounded layers. Aggressiveness coefficients are proposed to take the design of roundabout pavements back to the usual design of pavements for straight sections.*

## 1. INTRODUCTION

Les chaussées sur giratoire sont le siège de pathologies spécifiques, pouvant se manifester dès les premières années de service, tout particulièrement dans les courbes à petit rayon. Ces pathologies

sont soit des fissurations longitudinales, soit des phénomènes de décollement des couches de chaussée ou les deux à la fois, sans parler des risques d'orniérage accru, non traités dans cet article. Les explications données sont souvent liées à des problèmes de réalisation, conduisant les entreprises à se concentrer sur l'amélioration des techniques de construction pour limiter ces dégradations précoces. Toutefois, on ne peut écarter l'idée que le trafic poids lourd est foncièrement plus agressif dans les carrefours giratoires que dans les sections courantes à cause des efforts tangentiels induits en surface et de la dissymétrie des charges à l'essieu.

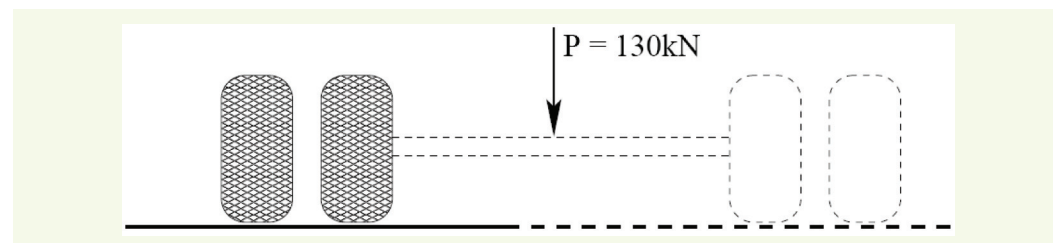
Cet article porte sur l'évaluation de l'agressivité du trafic en giratoire et sur le dimensionnement de ces structures, permettant de leur conférer une durée de vie équivalente à celle des tronçons en alignement. On espère ainsi combler un manque sur la conception de ces points singuliers, constituant aujourd'hui une composante essentielle d'aménagement des réseaux routiers et pour lesquels existe par ailleurs une documentation technique importante, axée sur les aspects de circulation routière (SETRA, 2006 ; Hamlat, 2007).

## 2. ANALYSE MÉCANIQUE DU PROBLÈME

Notre analyse s'appuie en grande part sur les principes de la méthode française de dimensionnement des chaussées. Rappelons-en quelques traits : seul le trafic poids lourd, exprimé en nombre cumulé de poids-lourds attendus pendant la « durée de vie » de la chaussée, est pris en compte. L'analyse est fondée sur la modélisation des chaussées sous forme de multicouches élastiques, semi-infinies, qui montrent que, dans le cas des chaussées bitumineuses épaisses, les contraintes de traction et les extensions maximales se situent à la base des couches bitumineuses. Le dimensionnement conduit à comparer, à travers un certain nombre de coefficients correcteurs, ces grandeurs susceptibles d'entraîner la rupture en fatigue par flexion des chaussées aux performances de résistance à la fatigue des matériaux, déterminées en laboratoire.

Dans cet article, l'agressivité du trafic en giratoire est évaluée en modélisant non seulement l'effet des forces verticales s'exerçant sur la chaussée, mais également l'effet des forces horizontales. Le jumelage standard français (130 kN) est pris comme charge de référence (figure 1). Deux critères sont considérés : i) le critère usuel de résistance des couches bitumineuses sous flexion répétée ; ii) mais aussi, la résistance en cisaillement de l'interface couche de surface-couche de base.

L'étude considère trois structures de chaussée, pour lesquelles on compare le dimensionnement en alignement droit, effectué en ne considérant que la composante verticale du poids des véhicules, et le dimensionnement en giratoire, effectué en ajoutant les efforts centrifuges exercés par le trafic. Les analyses sont effectuées en fonction du rayon des giratoires et des vitesses de franchissement praticables.



**figure 1**  
Charge de référence :  
jumelage standard  
français.

### 3. HYPOTHÈSES ET DONNÉES DES SIMULATIONS

#### ■ 3.1. Structures étudiées, modules élastiques équivalents des couches bitumineuses

Trois structures types, bitumineuses, correspondant aux fiches N°2 (VRNS et VRS)<sup>1</sup> et N°26 (VRNS) du catalogue des chaussées neuves (LCPC, 1998), sont retenues pour cette étude (figure 3). Elles possèdent des épaisseurs voisines, mais des rigidités différentes. Ces structures sont composées d'une couche de surface bitumineuse (béton bitumineux semi grenu : BBSG), sur une assise en matériaux traités aux liants hydrocarbonés (grave-bitume de classe 3 : GB3) pour les fiches N°2 et d'une assise en GNT (grave non traitée) pour la fiche N°26 (figure 3).

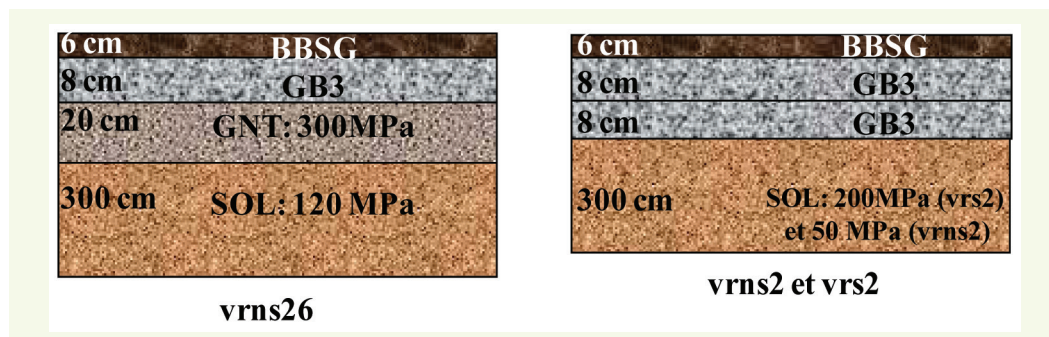
Ces structures de chaussée sont supposées constituées de matériaux à comportement mécanique élastique linéaire, homogène et isotrope avec des paramètres standards. Le coefficient de Poisson est égal à 0,35 pour l'ensemble des matériaux. Afin de déterminer le comportement mécanique de chacune des structures, en présence de sollicitations horizontales, les modélisations sont effectuées en 3D à l'aide du code de calcul aux éléments finis Cast3M (Cast3M, 2010). Les interfaces entre couches de matériaux sont considérées comme parfaitement collées.

Pour la détermination du comportement élastique équivalent des couches bitumineuses en giratoire où les vitesses de franchissement sont faibles, nous avons préalablement effectué une campagne de modélisations viscoélastiques permettant de reconsidérer la valeur de fréquence équivalente de 10 Hz, usuellement associée aux vitesses de poids lourds de l'ordre de 70-90 km/h, rencontrées sur section courante. Les comparaisons des calculs viscoélastiques et élastiques ont été présentées par Zoa et al. (2013).

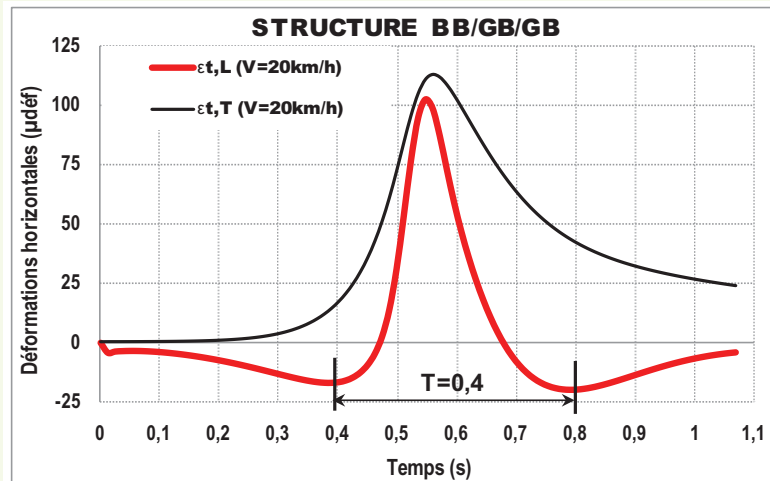
L'identification des paramètres viscoélastiques suit la démarche suivante : nous avons choisi deux matériaux types GB3 et BBSG de la base d'essais de l'IFSTTAR (LCPC, 2003). On dispose pour ceux-ci des valeurs de module complexe en flexion sinusoïdale (EN 12697-26, annexe A) pour des températures allant de -10 à 50 °C et des fréquences de 1 à 40 Hz. Ces mesures sont converties en paramètres du modèle de Kelvin-Voigt généralisé pour effectuer des calculs viscoélastiques transitoires de chaussée sous charge roulante (Zoa et al., 2011), en utilisant le code de calcul aux éléments finis Cast3M (Cast3M, 2010).

Afin de permettre dans la mesure du possible un calcul élastique simplifié, un calcul de fréquence équivalente a été fait sur la base de la durée de référence (figure 2.a) d'un signal de déformation longitudinale à la base des couches bitumineuse calculé avec le modèle viscoélastique par éléments finis. Dans sa thèse Zoa Ambassa (Zoa et al., 2013) a montré que le niveau de déformation obtenu en modélisation élastique est assimilable à celui du calcul de référence viscoélastique pour le cas du jumelage de référence. Par contre, les auteurs déconseillent cette simplification pour le cas des multi-essieux.

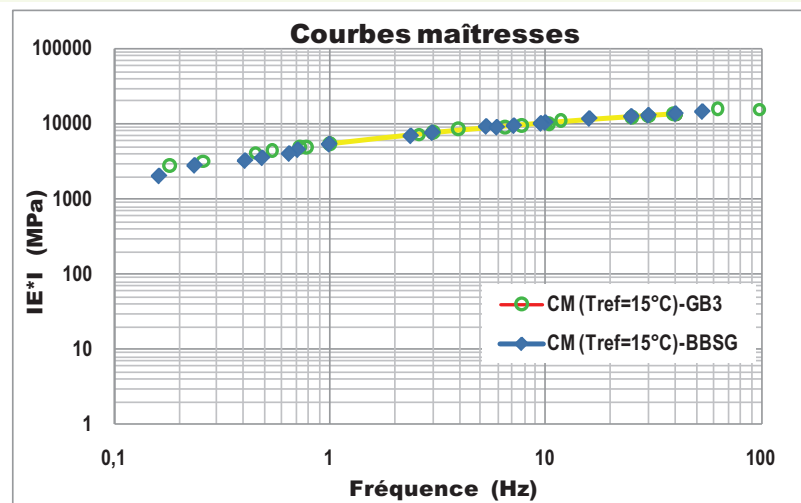
<sup>1</sup> VR(N)S = voie du réseau (non) structurant : cette distinction entre types de réseau, introduite dans le catalogue SETRA/LCPC est associée au choix d'hypothèses plus ou moins conservatives, conduisant à des dimensionnements distincts



**figure 3**  
Schémas des structures de chaussée étudiées  
Épaisseurs et modules d'Young considérés pour le sol et la GNT.



a. Détermination de la fréquence équivalente



b. Détermination des modules à partir de la courbe maîtresse

**figure 2**  
Détermination des paramètres pour un calcul élastique équivalent.

Les valeurs de fréquence de sollicitations ont été calculées à partir des signaux de déformation obtenus par le calcul en éléments finis. La période  $T$  est mesurée entre les deux pics en contraction du signal longitudinal (**figure 2.a**). A posteriori, les résultats obtenus sont réexprimés après traitement sous forme de fréquences équivalentes associées aux vitesses de 20, 25, 30 et 85 km/h.

À partir des fréquences équivalentes et à la température de référence (15°C), les modules pour un calcul élastique équivalent ont été déterminés à partir des courbes maîtresses présentées sur la **figure 2-b**. La correspondance entre vitesses et fréquences équivalentes et les valeurs associées des modules élastiques équivalents sont présentées dans le **tableau 1** pour les deux matériaux considérés.

**tableau 1**  
Valeurs des modules des matériaux bitumineux pour un calcul élastique équivalent à 15 °C.

Matériaux bitumineux	Vitesse ou fréquence équivalente			
	20 km/h (2,5 Hz)	25 km/h (3 Hz)	30 km/h (3,5 Hz)	85 km/h (10 Hz)
BBSG - E(MPa)	7100	7668	8500	10431
GB3- E(MPa)	7150	7667	8200	10229

### ■ 3.2. Stabilité d'un poids lourd sur un giratoire, sollicitations en surface de chaussée

Considérons un essieu soumis sous chaque roue à une répartition uniforme de pression normale et de contrainte tangentielle au passage d'un giratoire (figure 4).

Si l'essieu chargé d'un effort vertical  $P$  est sollicité par la force centrifuge  $F = Mv^2 / R$ , dans un giratoire de rayon  $R$  et de dévers  $d = \tan \delta$ , l'équilibre des forces permet d'écrire, avec les notations de la figure 4, les équations suivantes :

– Équilibre suivant l'axe  $Z$  :

$$N_1 + N_2 = P \cos \delta - F \sin \delta \quad (1)$$

– Équilibre suivant l'axe  $X$  :

$$T_1 + T_2 = F \cos \delta + P \sin \delta \quad (2)$$

soit, si  $\delta$  est petit :

$$N_1 + N_2 = P - Fd$$

$$T_1 + T_2 = F + Pd$$

– Équilibre en rotation de l'essieu :

$$\frac{1}{2}x(N_2 - N_1) = h_G(F + Pd) \quad (3)$$

La résolution des équations (1) et (3) donne :

$$N_2 = \frac{1}{2}(P - Fd) + \frac{h_G}{x}(F + Pd) \quad \text{et} \quad N_1 = \frac{1}{2}(P - Fd) - \frac{h_G}{x}(F + Pd),$$

montrant la dissymétrie des charges normales.

Sous l'action des efforts appliqués par le véhicule, le pneu se déforme, tandis que l'aire de contact et les distributions verticale et tangentielle des efforts de contact se transforment (Berthier, 1991). L'angle d'enivrage  $\alpha$  représente la distorsion du pneu dans les virages.

Dans le cas de petites valeurs ( $\alpha < 6$  degrés), cet angle régit à lui seul le rapport  $K_\alpha$  entre les composantes normale et tangentielle. Dans ce cas :

$$T_1 = K_\alpha N_1 \quad (4)$$

$$T_2 = K_\alpha N_2 \quad (5)$$

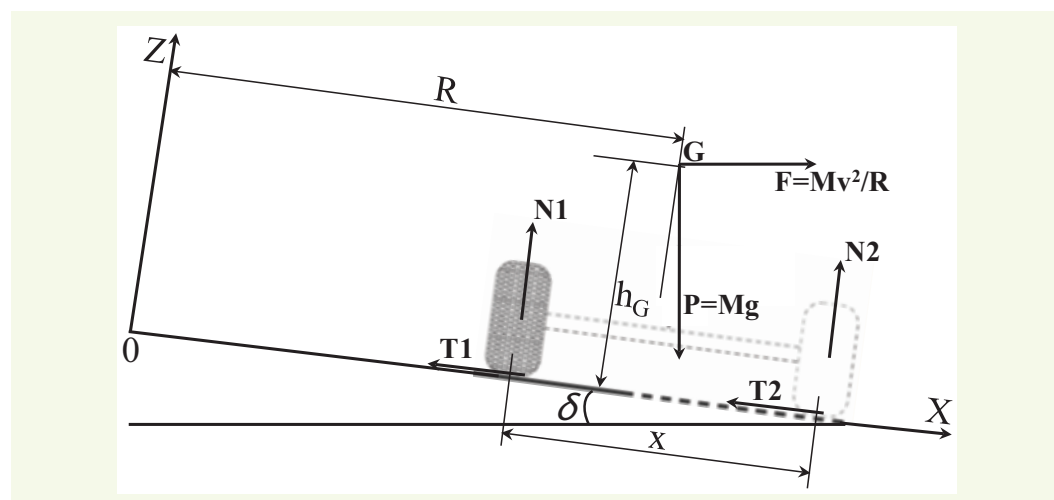


figure 4  
Stabilité d'un essieu  
sur un giratoire.

En combinant les équations (1), (2), (4) et (5), on peut écrire :

$$\frac{T_1 + T_2}{N_1 + N_2} = \frac{F + Pd}{P - Fd} = K\alpha \quad (6)$$

Si M est la masse du véhicule, se déplaçant à la vitesse v sur une courbe de rayon R, et si toutes ses roues sont sollicitées et se comportent de façon identique, la relation (6) permet d'écrire :

$$\frac{M \frac{v^2}{R} + Mgd}{Mg - M \frac{v^2}{R} d} = K\alpha \Leftrightarrow \frac{\frac{v^2}{Rg} + d}{1 - \frac{v^2}{Rg} d} = K\alpha$$

et d'en déduire les intensités des efforts tangentiels  $T_1$  et  $T_2$  en fonction de  $N_1$  et  $N_2$  et de la vitesse des véhicules, prise plus loin comme donnée d'entrée des calculs en fatigue.

Cette vitesse est plafonnée par la valeur de frottement pneu-chaussée  $K_p$  qui permet de calculer la vitesse limite  $v_{lim}$  des véhicules en virage. En négligeant  $\frac{v^2}{Rg} d$  dans l'expression ci-dessus, on obtient :  $v_{lim} = \sqrt{Rg(K_f - d)}$ .

Pour le calcul, seul le demi-essieu droit est modélisé pour déterminer l'agressivité du jumelage standard. Trois vitesses moyennes et trois rayons de giratoire sont considérés (tableau 2) avec les données suivantes, tirées de la bibliographie (Berthier, 1991 ; LCPC-SETRA, 1994 ; Brunel, 2005 ; SETRA, 2006 ; GRR, 2010) :  $d = \tan \delta = 2,5\%$  ;  $M = 13000$  kg ,  $x = 2,05$  m et  $h_g = 2$  m.

Le tableau 2 récapitule les intensités des charges à la roue les plus pénalisantes ( $N_2$  et  $T_2$ ) obtenues dans ces conditions à partir des équations ci-dessus. Ces valeurs sont appliquées sur chacune des deux roues du demi-essieu pris en compte dans nos modèles.

### ■ 3.3. Calculs aux éléments finis

Préalablement au maillage tridimensionnel des structures, on détermine les dimensions de l'empreinte pneu/chaussée sur laquelle chaque roue du jumelage est supposée exercer une pression normale  $p = 662$  kPa uniformément répartie. La surface de contact pneu-chaussée est idéalisée sous forme d'un rectangle de surface  $0,5227L^2$  et de largeur  $0,6L$ , L étant fonction de la charge Q et de la pression de contact (Huang, 1993):

$$L = \sqrt{\frac{Q}{0,5227p}} \quad (7)$$

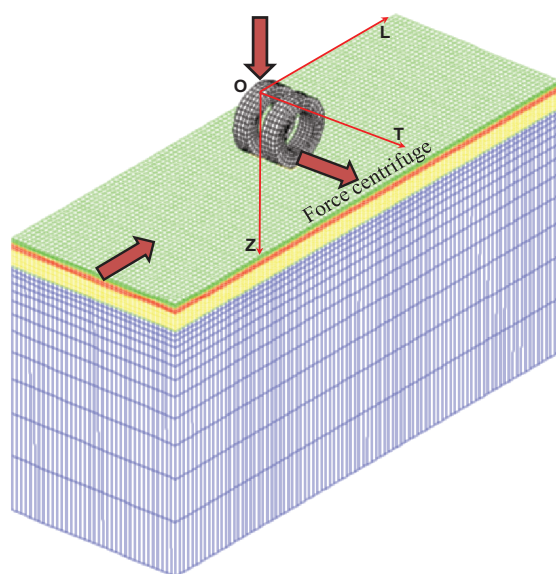
La figure 5 présente un exemple de maillage du modèle en éléments finis des chaussées modélisées (cas de la structure 1). On néglige sur le plan géométrique la courbure de la chaussée. Le maillage est construit à partir d'éléments hexaédriques à 8 nœuds (CUB8) à interpolation linéaire. Sur la zone sollicitée par la charge, une pression normale (suivant l'axe Z) et tangentielle (suivant l'axe T)

**tableau 2**  
Intensité des charges à la roue utilisées pour la modélisation des giratoires, en fonction de R et v.

Types de charges	Section courante	Vitesse v = 20 km/h			Vitesse v = 25 km/h			Vitesse v = 30 km/h		
		R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R = 20m	R = 15m
$N_2$ (kN)	32,50	41,81	43,75	46,97	46,16	49,18	54,21	51,47	55,82	63,07
$T_2$ (kN)	0	6,23	7,87	10,89	10,10	13,17	18,94	15,69	20,96	31,13
$K_\alpha$	-	0,15	0,18	0,23	0,22	0,27	0,35	0,30	0,38	0,49



**figure 5**  
 Vue en perspective du maillage de la structure VRNS26 et du chargement induit en giratoire par le jumelage standard chargé à 2 fois ( $N_2$ ,  $T_2$ ) (modèle à 90752 éléments CUB8 et 98338 nœuds).



est uniformément répartie sur une surface rectangulaire de 184 x 267 mm<sup>2</sup>, afin de reproduire la sollicitation de l'essieu sur la chaussée.

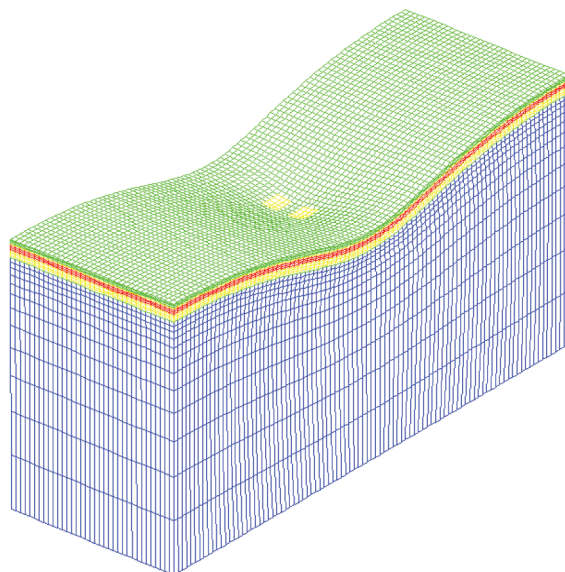
Les conditions aux limites en déplacement sont de type usuel : les composantes normales aux faces latérales sont imposées nulles, la face horizontale inférieure est bloquée suivant les trois directions.

#### 4. RÉSULTATS ET CALCULS D'ENDOMMAGEMENT

La **figure 6** présente la déformée de la structure VRNS 2 sur un giratoire. La **figure 7** présente la cartographie des contraintes longitudinales et transversales pour la structure VRNS 2 modélisée avec un chargement correspondant à un giratoire de 15 m de rayon sollicité par un jumelage standard à une vitesse de 30 km/h. Les contraintes de traction (respectivement, compression) sont comptées positivement (respectivement, négativement).

##### ■ 4.1. Déformations critiques à la base des couches bitumineuses

Dans le cas usuel du dimensionnement des chaussées en section droite, le critère dimensionnant est la déformation horizontale, longitudinale ou transversale, d'extension maximale atteinte en bas de couche de base, que l'on relie à la fatigue par flexion des couches bitumineuses.



**figure 6**  
 État de la déformée de la structure VRNS 2.

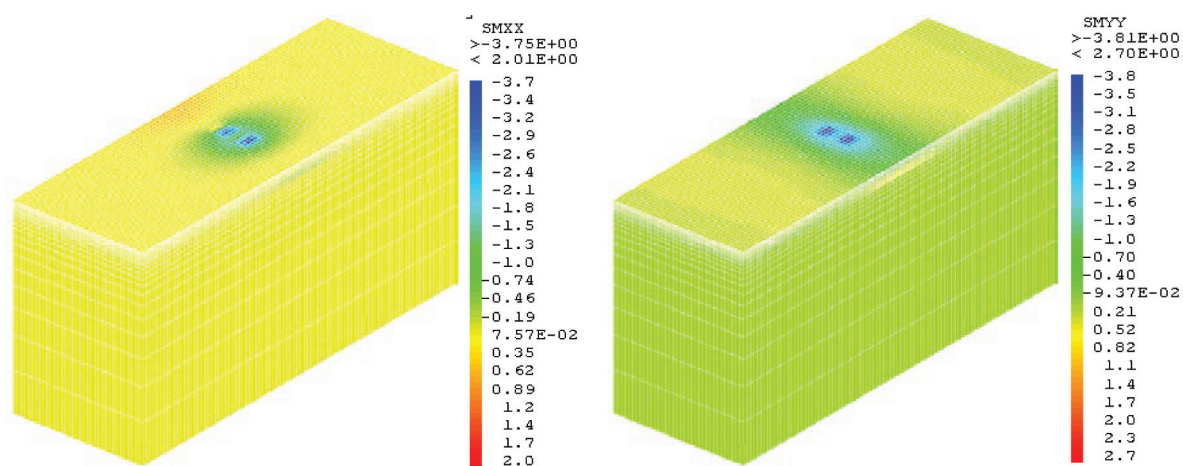
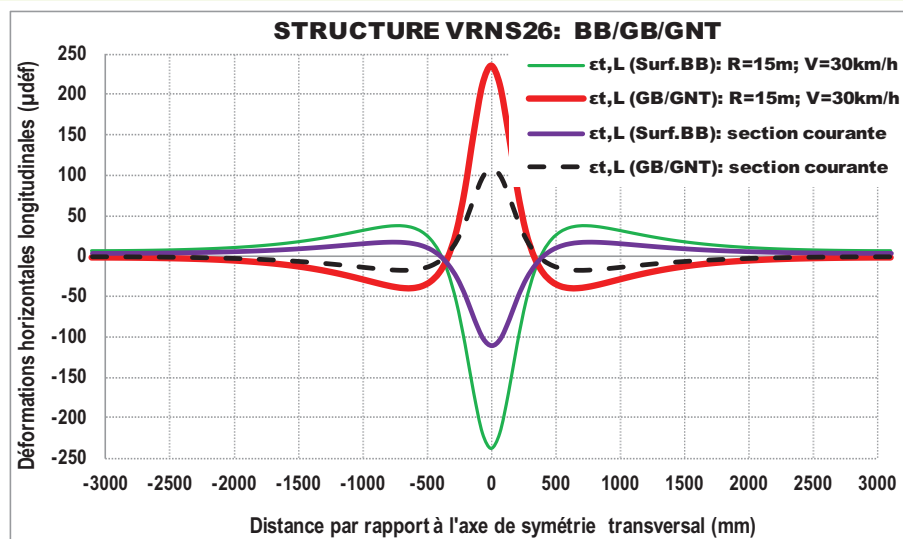


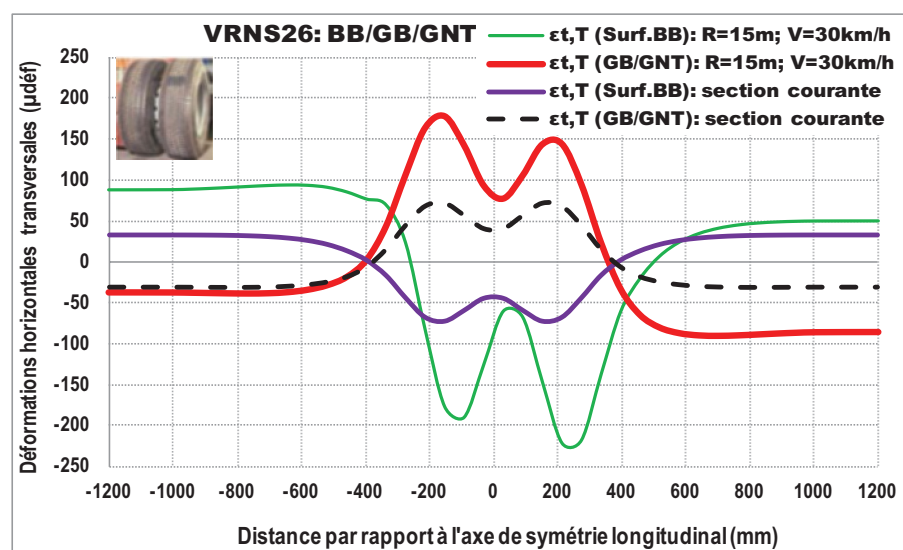
figure 7

Isovaleurs des contraintes longitudinales et transversales dans la structure VRNS 2 ( $R = 15m$  et  $v = 30 km/h$ ).

Mais, en présence de sollicitations tangentielles, les calculs révèlent également l'existence de déformations d'extension en surface de chaussée, dont il convient d'évaluer l'incidence. Les figures 8 à 10, tracées pour différents rayons de giratoire et différentes vitesses, comparent à cet effet les



a) Déformations longitudinales

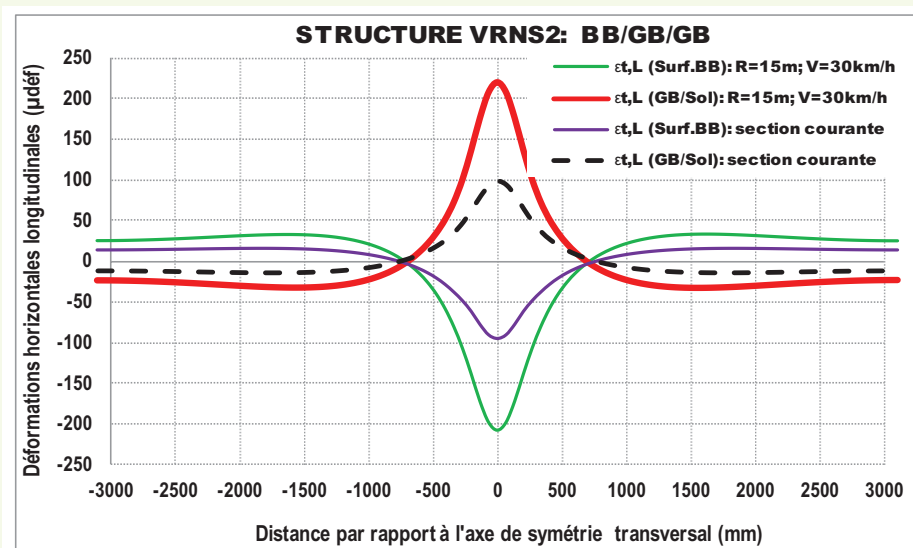


b) Déformations transversales

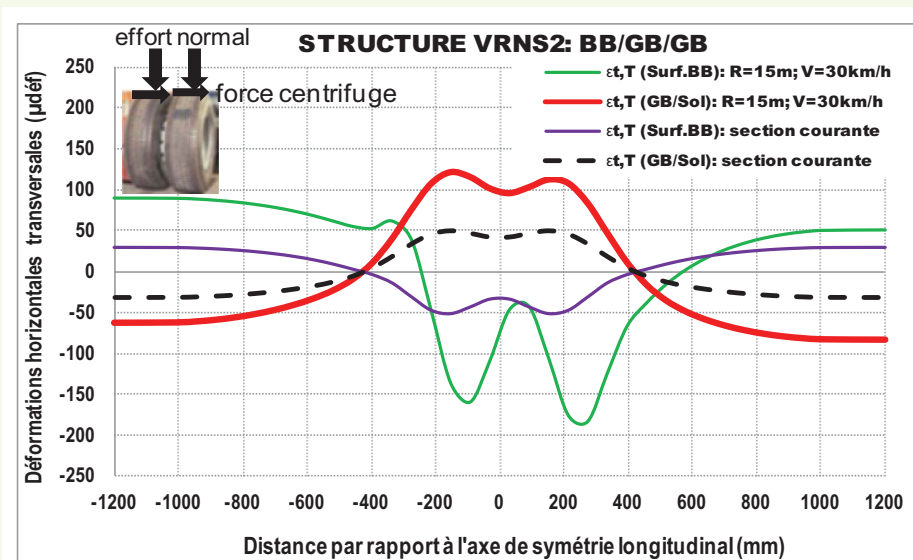
figure 8

Déformations horizontales à la base de la couche de GB3 et au sommet du BB (structure VRNS 26).





a) Déformations longitudinales

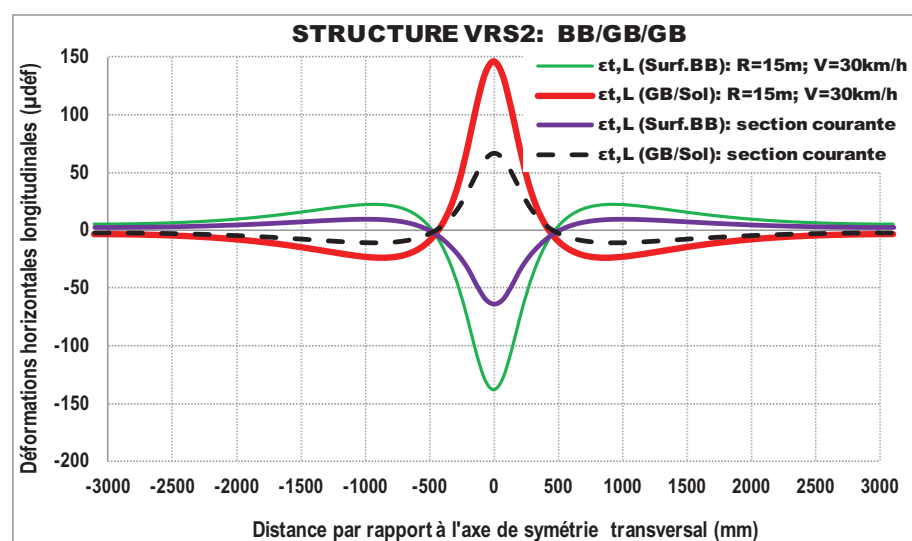


b) Déformations transversales

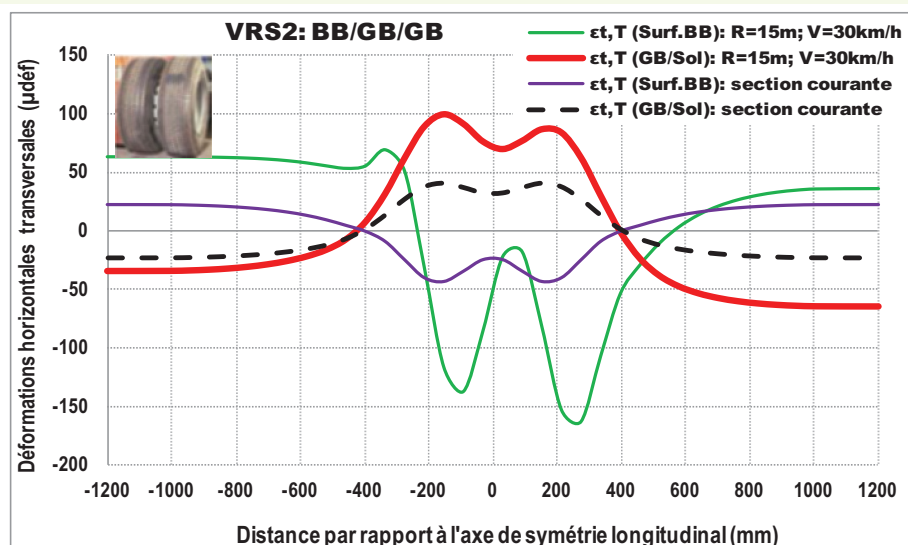
**figure 9**  
Déformations horizontales à la base de la couche de GB3 et au sommet du BB (structure VRNS 2).

profils de déformation horizontale obtenus en surface et en bas de la couche de GB3 des structures de chaussée. Il apparaît que les valeurs d'extension maximale atteintes en couche de GB sont supérieures dans tous les cas à celles calculées en surface de chaussée, ce qui montre qu'il n'y a pas lieu d'introduire de nouveau critère, contrairement, comme on le verra, au cas de la tenue de l'interface entre BBSG et GB. Cette observation n'est pas systématique. Il existe des configurations dépendant de la structure, de la géométrie et du chargement pour lesquelles l'extension transversale en surface pourrait expliquer en partie des pathologies de fissurations longitudinales initiées en surface et descendant vers les couches de base. Ce travail concerne trois structures types et ne couvre pas tous les cas possibles.

Sur les profils présentés et dans le **tableau 3**, on note par ailleurs la diminution de la valeur maximale des déformations obtenues, en fonction de la rigidité des structures de chaussée, de l'accroissement du rayon des giratoires et de la vitesse des poids lourds. Les profils indiquent aussi clairement la composante de déformation horizontale à considérer pour vérifier la tenue à la fatigue des couches bitumineuses. Pour les trois structures, il s'agit de la déformation longitudinale ( $\epsilon_L$ ), susceptible d'induire une fissuration transversale des chaussées du bas vers le haut.



a) Déformations longitudinales



b) Déformations transversales

**figure 10**  
Déformations horizontales à la base de la couche de GB3 et au sommet du BB (structure VRS 2).

Le **tableau 3** regroupe les valeurs des amplitudes de déformation maximale obtenues sur chacune des structures de chaussée au passage du jumelage de référence chargé à 2 fois ( $N_2$ ,  $T_2$ ). Les giratoires à petits rayons s'avèrent les plus exposés aux dégradations. La vitesse apparaît dans tous les cas comme un facteur aggravant.

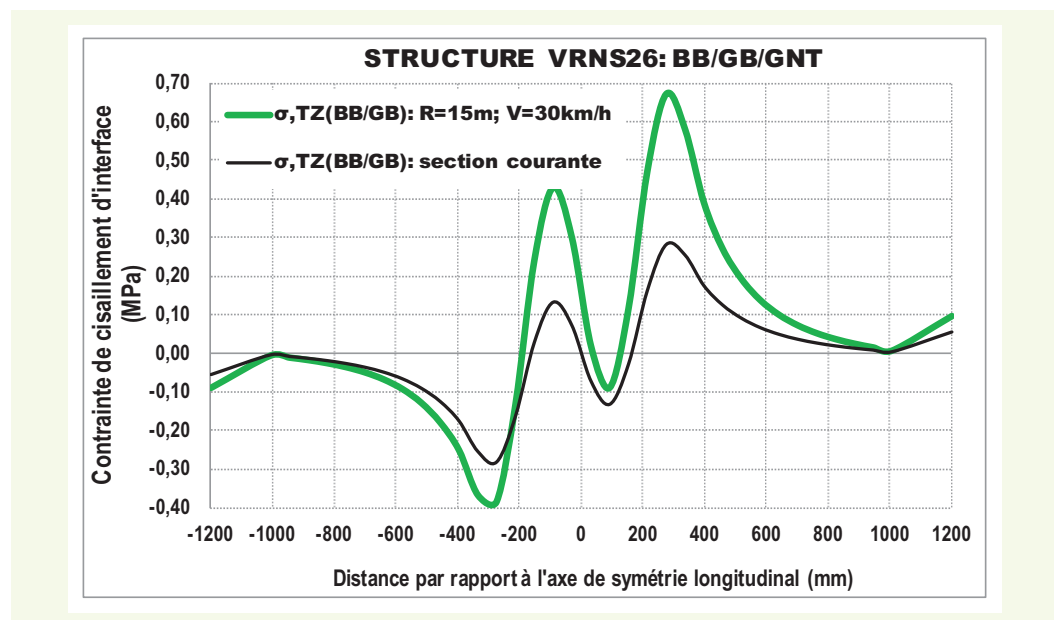
**tableau 3**  
Récapitulatif des valeurs de microdéformations sur les trois structures. Comparaison entre giratoires et section courante.

Structure	Section courante	Vitesse v = 20 km/h			Vitesse v = 25 km/h			Vitesse v = 30 km/h		
		R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R=20m	R = 15m
VRNS 26	109	170	177	190	180	192	211	193	209	235
VRNS 2	99	165	173	185	173	184	202	182	197	221
VRS 2	67	109	113	121	114	121	133	121	130	146

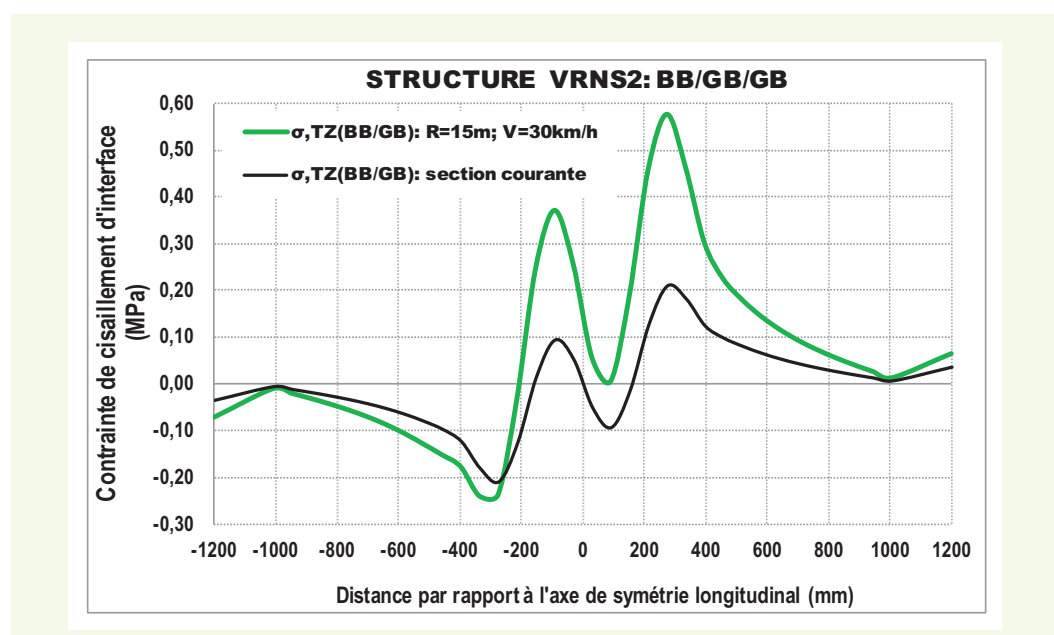
## ■ 4.2. Contraintes de cisaillement critiques à l'interface BB/GB

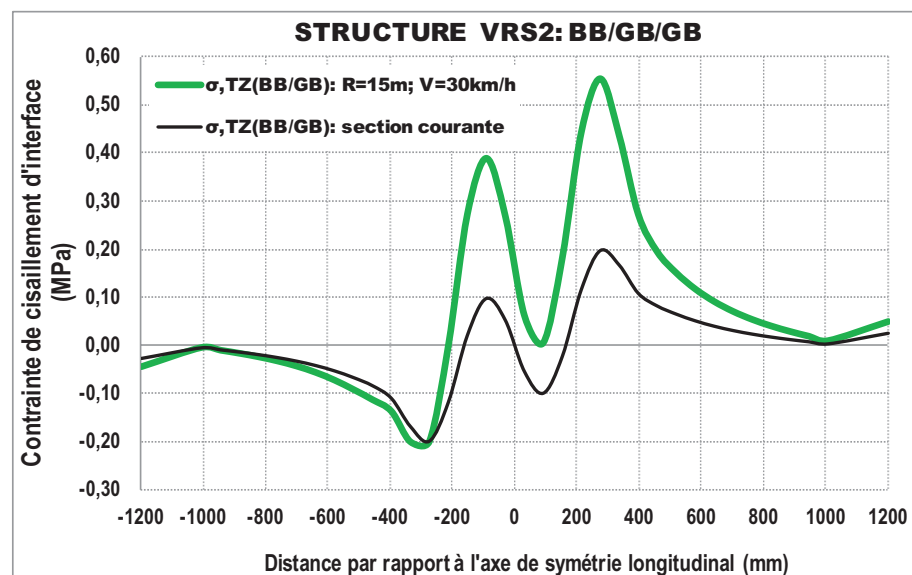
Les essais de fatigue usuels portent sur le comportement des enrobés bitumineux dans « leur masse », lorsqu'ils sont soumis à des efforts de flexion ou de traction-compression répétés. Mais, lorsque les chaussées sont exposées à de fortes sollicitations tangentielles, la dégradation des couches d'accrochage peut éventuellement devenir prépondérante devant le critère classique de déformation à la base des couches liées. Les **figures 11, 12 et 13** présentent les profils typiques de contraintes de cisaillement d'interface BB/GB obtenus dans les différentes structures en l'absence ou présence de forces tangentielles exercées en surface. Les valeurs maximales de cisaillement obtenues pour chaque structure en fonction de la vitesse des poids lourds et du rayon du giratoire sont réunies dans le **tableau 4**.

**figure 11**  
Profil de contrainte de cisaillement à l'interface BB/GB (structure VRNS 26).



**figure 12**  
Profil de contrainte de cisaillement d'interface BB/GB (structure VRNS 2).





**figure 13**  
 Contrainte de cisaillement  
 à l'interface BB/GB  
 (structure VRS 2).

Structure	Section courante	Vitesse v = 20 km/h			Vitesse v = 25 km/h			Vitesse v = 30 km/h		
		R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R = 20m	R = 15m
VRNS 26	0,28	0,37	0,39	0,44	0,43	0,47	0,54	0,50	0,57	0,67
VRNS 2	0,21	0,30	0,32	0,36	0,35	0,39	0,45	0,42	0,47	0,58
VRS 2	0,20	0,28	0,30	0,34	0,33	0,37	0,43	0,40	0,45	0,55

**tableau 4**  
 Valeurs maximales des  
 contraintes de cisaillement  
 à l'interface BB/GB pour  
 les trois structures (MPa).

## 5. ESTIMATION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES DE CHAUSSÉES EN GIRATOIRE

Les valeurs de déformation, précédemment obtenues en base de GB et à l'interface BB/GB, permettent d'estimer la durée de vie des chaussées en giratoire par référence à la méthode française de dimensionnement des chaussées, en y adjoignant un critère de fatigue de l'interface BB/GB. Le nombre d'essieux équivalents est calculé en faisant l'hypothèse que les caractéristiques mécaniques des couches de matériau restent inchangées pendant la durée de vie de la chaussée. On suppose également que tous les véhicules passent à une même vitesse donnée. La tenue à la fatigue par flexion des couches en matériaux bitumineux peut alors être vérifiée à travers l'expression suivante (LCPC, 1994) :

$$\varepsilon_{L\max} = \varepsilon_{6(10^{\circ}C, 25Hz)} \sqrt{\frac{E(10^{\circ}C, 10Hz)}{E(15^{\circ}C, 10Hz)}} \left(\frac{10^6}{N_E}\right)^{-b} k_r k_c k_s \quad (8)$$

avec :

$\varepsilon_{L\max}$  = déformation horizontale maximale, calculée en base de GB ;

$\varepsilon_6(10^{\circ}C, 25Hz)$  = amplitude de la déformation qui provoquerait la rupture en fatigue par flexion de l'éprouvette trapézoïdale, en matériau bitumineux, au bout d'un million de cycles de chargement (rupture définie conventionnellement par une baisse de rigidité d'un facteur 2) ;

$E(10^{\circ}C, 10 Hz)$  [resp.  $E(15^{\circ}C, 10 Hz)$ ] = norme du module complexe du matériau bitumineux évalué à  $10^{\circ}C, 10 Hz$  (resp.  $15^{\circ}C, 10 Hz$ ) ;

$N_E$  = nombre d'essieux standards équivalents ;

$b$  = pente de la droite de fatigue du matériau bitumineux ;

$k_r$  = coefficient qui ajuste la valeur de la déformation horizontale admissible au risque de calcul retenu, en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart-type  $s_h$ ) de la couche de GB et sur les résultats des essais de fatigue (écart-type  $s_N$ ) ;

$k_c$  = coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé sur chaussée ;

$k_s$  = coefficient minorant tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées.

Les valeurs de  $\epsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$ ,  $b$ ,  $E(10^\circ\text{C}, 10\text{ Hz})$  et  $E(15^\circ\text{C}, 10\text{ Hz})$  pour la grave-bitume prise comme exemple sont données dans le **tableau 5**. Les valeurs de  $k_r$ ,  $k_c$ ,  $k_s$  sont celles du Guide de dimensionnement pour les structures de chaussée considérées : VRNS 26 (risque de calcul 12% ;  $k_r = 0,82$ ; et  $k_s = 1$ ) ; VRNS 2 (risque de calcul 12% ;  $k_r = 0,81$ ; et  $k_s = 0,91$ ) , VRS 2 (risque de calcul 5% ;  $k_r = 0,74$ ; et  $k_s = 1$ ) ;  $k_c = 1,3$  pour toutes les structures.

Le dimensionnement vis-à-vis de la tenue à la fatigue des couches bitumineuses conduit, pour ces données, aux valeurs du nombre d'essieux équivalents  $N_e$  indiquées dans le **tableau 6a**.

L'étude de la tenue à la fatigue par cisaillement de l'interface entre deux couches de matériaux bitumineux a donné lieu par ailleurs à plusieurs campagnes d'essais, réalisées au sein de notre équipe au cours de ces dernières années. Celles-ci ont notamment permis d'établir une relation à  $15^\circ\text{C}$  entre l'amplitude de contrainte de cisaillement maximale  $\tau_{\max}$  et le nombre de cycles de chargement à la rupture  $N_i$ , représentée par l'équation (9) (Diakhaté, 2007 ; Petit et al., 2009 ; Diakhaté et al., 2011) :

$$\tau = \tau_6(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz}) \left[ \frac{K_s(10^\circ\text{C})}{K_s(15^\circ\text{C})} \right]^{-1,697} \left( \frac{N_i}{10^6} \right)^{-0,233} \quad (9)$$

avec :

$\tau_6(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$  = amplitude de la contrainte de cisaillement provoquant la rupture d'une interface BB/GB au bout d'un million de cycles de chargement ;

$K_s(10^\circ\text{C})$  [resp.  $K_s(15^\circ\text{C})$ ] = module de cisaillement d'interface à  $10^\circ\text{C}$  (resp.  $15^\circ\text{C}$ )

Il convient de préciser qu'à ce stade les comparaisons avec des observations sur chaussées n'ont pas été réalisées. Afin de rendre complètement opérationnels les résultats de calcul proposés, une confrontation à des résultats sur chaussées réelles et expérimentales permettrait de définir les coefficients de calage et coefficients de risque spécifiques à la fatigue des interfaces de chaussées. Ces compléments pourraient conduire à une future méthode de dimensionnement des giratoires ou points singuliers soumis à des sollicitations tangentielles répétées en surface de chaussée.

L'estimation de ces paramètres en laboratoire fournit les valeurs suivantes :

$$\begin{cases} 10^\circ\text{C} : K_s = 104 \text{ MPa} / \text{mm} ; \tau_6 = 0,36 \text{ MPa} \\ 15^\circ\text{C} : K_s = 81 \text{ MPa} / \text{mm} \end{cases}$$

**tableau 5**  
Paramètres de tenue à la fatigue par flexion obtenus sur GB3 (LCPC, 2003 ; Domec, 2005 ; Zoa et al., 2011).

Matériau GB3	$\epsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$	Giratoire								B
		20 km/h ou 2,5 Hz		25 km/h ou 3 Hz		30 km/h ou 3,5 Hz		85 km/h ou 10 Hz		
E(MPa)	$65,5 \cdot 10^{-6}$	10°C	15°C	10°C	15°C	10°C	15°C	10°C	15°C	-0,2
		10229	7150	11080	7667	11800	8200	13671	10229	

**tableau 6**

Nombre d'essieux équivalents ( $10^4 N_e$ ) pour l'ensemble des structures étudiées en fonction de la vitesse des poids lourds et des rayons de giratoire (Le critère le plus pénalisant est indiqué en gras dans les tableaux)

Structure	Section courante	Vitesse v = 20 km/h			Vitesse v = 25 km/h			Vitesse v = 30 km/h		
		R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R = 20m	R = 15m
VRNS 26	22,20	2,86	2,29	1,62	2,17	1,59	0,99	1,53	1,03	0,57
VRNS 2	20,50	1,91	1,54	1,09	1,57	1,15	0,72	1,19	0,81	0,47
VRS 2	158	16,4	13,20	9,40	13,20	9,76	6,14	9,90	6,73	3,78

a. Critère de rupture en fatigue de la couche de base (GB3)

Structure	Section courante	Vitesse v = 20 km/h			Vitesse v = 25 km/h			Vitesse v = 30 km/h		
		R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R = 20m	R = 15m	R = 25m	R = 20m	R = 15m
VRNS 26	45,10	13,00	9,86	6,36	6,77	4,56	2,47	3,29	1,97	0,90
VRNS 2	168	33,40	24,50	15,00	16,70	10,80	5,41	7,75	4,37	1,83
VRS 2	223	44,80	32,50	19,60	21,70	13,70	6,76	<b>9,69</b>	<b>5,37</b>	<b>2,18</b>

b. Critère de fatigue de l'interface couche de roulement/couche de base (BB/GB3)

Appliquée aux valeurs  $\tau_{max}$  du **tableau 4**, l'équation (9) conduit aux nombres d'essieux équivalents donnés dans le **tableau 6b**.

La comparaison des résultats des **tableaux 6a et 6b** montre que, pour la structure de chaussée VRS2, à comportement élastique, calculée avec les paramètres mécaniques des matériaux à 15°C et 3,5 Hz, l'endommagement des couches d'accrochage pourrait être prépondérant devant le critère classique de déformation à la base des couches liées dans le cas d'un giratoire franchi à la vitesse (moyenne) de 30 km/h.

Ces résultats peuvent également être exprimés en examinant l'endommagement relatif causé sur giratoire par le jumelage standard par rapport à celui causé sur la même structure de chaussée en section droite. Cet endommagement relatif est aussi appelé agressivité. Le calcul résulte des relations (10) et (11).

$$N_{E,gir} = N_{E,sect.cour.} \left\{ \frac{\varepsilon_{t,gir} \left[ \frac{E(10^\circ C, 10Hz)}{E(15^\circ C, 10Hz)} \right]_{sect.cour.}}{\varepsilon_{t,sect.cour.} \left[ \frac{E(10^\circ C, \text{fréq.équi.})}{E(15^\circ C, \text{fréq.équi.})} \right]_{gir}} \right\}^{\frac{1}{b}} \quad (10)$$

que l'on peut écrire :

$$N_{E,gir} = \frac{1}{A_{gir}} N_{E,sect.cour.},$$

avec :

$$A_{gir} = \left\{ \frac{\varepsilon_{t,gir} \left[ \frac{E(10^\circ C, 10Hz)}{E(15^\circ C, 10Hz)} \right]_{sect.cour.}}{\varepsilon_{t,sect.cour.} \left[ \frac{E(10^\circ C, \text{fréq.équi.})}{E(15^\circ C, \text{fréq.équi.})} \right]_{gir}} \right\}^{\frac{1}{b}}$$

$$A_{gir,\tau} = \frac{N_{i,sect.cour.}}{N_{i,gir}} = \left( \frac{\tau_{max,gir}}{\tau_{max,sect.cour.}} \right)^{\frac{1}{0,223}}$$

d'où

$$N_{i,gir} = N_{i,sect.cour.} \left( \frac{\tau_{max,gir}}{\tau_{max,sect.cour.}} \right)^{\frac{1}{0,223}} \quad (11)$$



$$N_{i,gir} = \frac{1}{A_{gir,\tau}} N_{i,sect.cour.}$$

où  $A_{gir}$  est l'agressivité sur les couches bitumineuses,  $A_{gir,\tau}$  l'agressivité de l'interface, *fréq.équi* la fréquence équivalente,  $N_i$  le nombre d'essieux équivalent vis-à-vis du critère de fatigue de l'interface BB/GB.

Le **tableau 7** présente les coefficients d'agressivité du jumelage standard en giratoire, obtenus à partir des relations (10) et (11) et des valeurs des **tableaux 3, 4 et 5**. Les coefficients d'agressivité les plus élevés sont obtenus pour un poids lourd circulant à une vitesse de 30 km/h sur un giratoire de 15 m de rayon. Les valeurs sont de 42 vis-à-vis de la tenue de la couche de GB3 et de 102 vis-à-vis de la tenue de la couche d'accrochage. On retrouve le résultat de la comparaison entre les **tableaux 6a et 6b** ; lorsque la chaussée est exposée à de fortes sollicitations tangentielles, la dégradation des couches d'accrochage peut devenir prépondérante devant le critère classique de déformation en base des couches liées.

Ces coefficients d'agressivité permettent, pour une structure de chaussée sur giratoire, d'une part de dimensionner les épaisseurs de chaussées en fonction d'un trafic cumulé à supporter et, d'autre part, de déterminer les caractéristiques mécaniques nécessaires à la tenue en fatigue des couches d'accrochage. Il est clair que les situations pour lesquelles on prévoit une fatigue des interfaces de chaussée plus défavorable que le critère usuel nécessiteraient des études expérimentales spécifiques en cisaillement.

Pour assurer l'homogénéité de la durée de vie des chaussées entre sections droites et giratoires, les structures de chaussée équivalentes en giratoire devraient être dimensionnées en fonction du maximum des valeurs  $N_{E,gir}$  et  $N_{E,gir,\tau}$  déterminées par les équations (12) et (13).

$$N_{E,gir} (\text{chaussée équivalente}) = A_{gir} N_E (\text{section courante}) \quad (12)$$

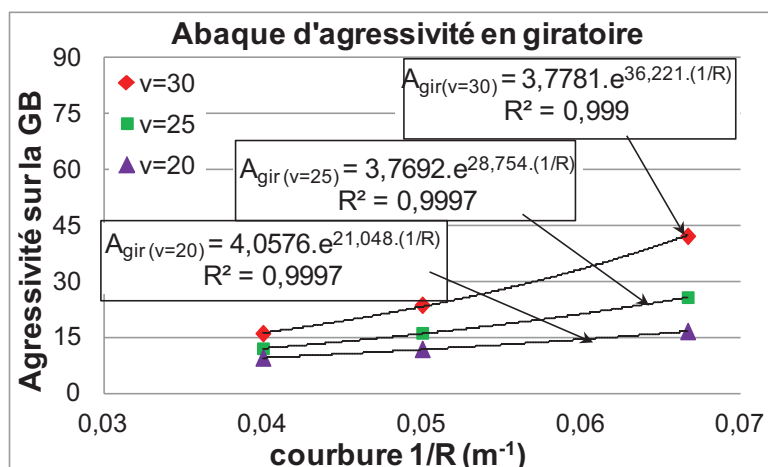
$$N_{E,gir,\tau} (\text{chaussée équivalente}) = A_{gir,\tau} N_E (\text{section courante}) \quad (13)$$

Les agressivités déduites des expressions (12) et (13), en fonction de la vitesse moyenne des poids lourds et du rayon du giratoire, sont présentées sur la **figure 14** pour la structure de chaussée VRNS2.

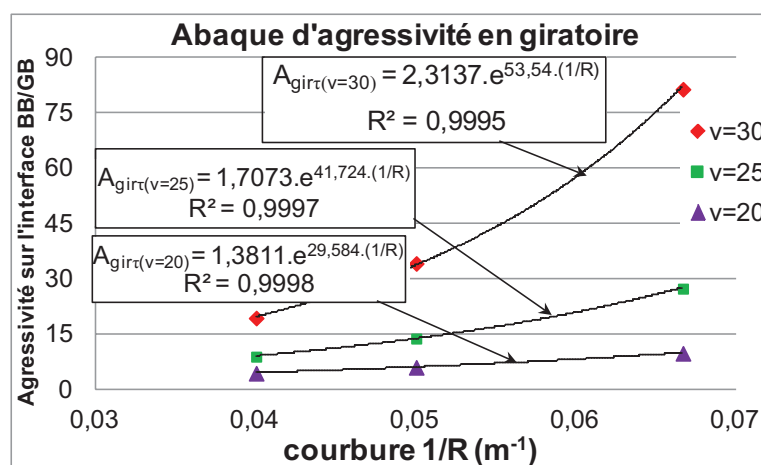
L'agressivité du trafic peut aussi être déterminée à partir des expressions rassemblées dans le **tableau 8**. Le **tableau 9** donne un exemple de dimensionnements équivalents de structures de chaussée en giratoire et en section courante.

**tableau 7**  
Coefficients d'agressivité  $A_{gir}$  et  $A_{gir,\tau}$  en fonction de la vitesse du poids lourd et du rayon du giratoire sur les trois structures de chaussée (les valeurs les plus pénalisantes sont indiquées en gras).

Agressivité en giratoire	Vitesse de 20 km/h			Vitesse de 25 km/h			Vitesse de 30 km/h		
	R = 25 m	R = 20 m	R = 15 m	R = 25 m	R = 20 m	R = 15 m	R = 25 m	R = 20 m	R = 15 m
Structure VRNS 26 (BB/GB3/GNT/PF3)									
$A_{gir}$	8	10	14	10	14	22	15	22	39
$A_{gir,\tau}$	3	5	7	7	10	18	14	22	50
Structure VRNS 2 (BB/GB3/GB3/PF2)									
$A_{gir}$	11	13	19	13	18	28	17	25	45
$A_{gir,\tau}$	5	7	11	10	16	31	22	39	92
Structure VRS 2 (BB/GB3/GB3/PF4)									
$A_{gir}$	10	12	17	12	16	26	16	23	42
$A_{gir,\tau}$	5	7	11	10	16	33	23	41	102



a) Critère de fatigue de la couche de GB



b) Critère d'interface BB/GB

figure14

Abaque d'Agressivité en giratoire sur la structure VRNS 2.

## 6. CONCLUSION

L'article quantifie l'effet des forces normale et tangentielle apportées par le trafic poids lourd sur les contraintes et déformations subies par les chaussées bitumineuses construites en carrefours giratoires. L'étude montre que la distribution des contraintes dans ces chaussées est fortement influencée par la géométrie (rayon, dévers) et la vitesse de circulation des véhicules. Les calculs de structure montrent la vulnérabilité des giratoires à l'effet des sollicitations tangentielle répétées et à la dissymétrie gauche/droite des charges exercées par les essieux. La méthodologie adoptée débouche sur

tableau 8

Formules de calcul des coefficients d'agressivité en giratoire.

Structure	$A_{gir}$	$A_{gir,\tau}$
VRNS 26	$A_{gir} = 3,314 e^{(0,312v^2+9,06) \frac{1}{R}}$	$A_{gir,\tau} = (0,0016v^2 + 0,52) e^{(0,043v^2+9,98) \frac{1}{R}}$
VRNS 2	$A_{gir} = 5,35 e^{(0,03v^2+5,77) \frac{1}{R}}$	$A_{gir,\tau} = (-0,0001v^2 + 0,67) e^{(0,047v^2+34,5) \frac{1}{R}}$
VRS 2	$A_{gir} = 3,98 e^{(0,03v^2+9,04) \frac{1}{R}}$	$A_{gir,\tau} = (0,0021v^2 + 0,55) e^{(0,049v^2+11,08) \frac{1}{R}}$

Structure de chaussée		Structure de chaussée équivalente en giratoire																	
		Vitesse de 20km/h						Vitesse de 25km/h						Vitesse de 30km/h					
		R = 25 m	R = 20 m	R = 15 m	R = 25 m	R = 20 m	R = 15 m	R = 25 m	R = 20 m	R = 15 m	R = 25 m	R = 20 m	R = 15 m						
Structure de chaussée	Section courante																		
	VRNS 26	TC <sub>3,20'</sub> BBSG: 6cm GB3: 8cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 13cm GNT: 20cm PF3					
		VRNS 2	TC <sub>3,20'</sub> BBSG: 6cm GB3: 8cm GB3: 8cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2	TC <sub>5,20'</sub> BBSG: 8cm GB3: 10cm GB3: 11cm PF2				
VRS 2			TC <sub>4,30'</sub> BBSG: 6 cm GB3: 8 cm GB3: 8 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4	TC <sub>6,30'</sub> BBSG: 8 cm GB3: 11 cm GB3: 12 cm PF4				

**tableau 10**  
Structures de chaussée  
équivalentes en giratoire et  
section courante.

des règles de calcul en fatigue permettant *a priori* d'étendre le dimensionnement des structures du catalogue des chaussées au cas des chaussées en giratoire. L'article conduit à des résultats d'agressivité en fonction de la vitesse moyenne des poids lourds et de la courbure du giratoire. Il est toutefois probable que les deux paramètres soient corrélés. Il conviendra dans une future méthode de dimensionnement de proposer des coefficients d'agressivité en fonction de la courbure uniquement.

## 7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERTHIER J. (1991).** Véhicules et routes. *Techniques de l'ingénieur, traité construction*, 15 pages.
- BRUNEL H. (2005).** Cours de routes, *Université d'Orléans*, France, 96 pages.
- CAST3M (2010).** Cast3M is a research FEM environment; its development is sponsored by the French Atomic Energy Commission. See web site <<http://www-cast3m.cea.fr/cast3m>>.
- DIAKHATÉ M. (2007).** Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, 245 pages.
- DIAKHATÉ M., MILLIEN A., PETIT C., PHELIPOT-MARDELE A., POUTEAU B. (2011).** Experimental investigation of tack coat fatigue performance: Towards an improved lifetime assessment of pavement structure interfaces. *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp.1123-1133.
- DOMEC V. (2005).** Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux en condition de trafic simulé et de température. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, France.
- GRR (2010).** Guide de Réglementation Routière, Article 32bis. Dimensions et masses des véhicules.
- HAMLAT S. (2007).** Étude de la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, France, 178 pages.
- HUANG Y. H. (1993).** Pavement analysis and design, Prentice-hall: Englewood Cliffs, NJ.
- LCPC-SETRA (1994).** Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide technique.
- LCPC-SETRA (1998).** Catalogue des structures types de chaussées neuves, Ministère de l'équipement, des transports et du logement.
- LCPC (2003).** Vérification du comportement mécanique des matériaux du manège. Rapport technique.
- PETIT C., DIAKHATÉ M., MILLIEN A., PHELIPOT-MARDELE A., POUTEAU B. (2009).** Pavement design for curved road sections - Fatigue performances of interfaces and longitudinal top-down cracking in multilayered pavements, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 10, n° 3, pp. 609-624.
- SETRA (2006).** Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes, Rapport technique.
- ZOA A., ALLOU F., PETIT C., MEDJO R. (2011).** Modélisation viscoélastique de l'endommagement des chaussées bitumineuses sous chargement multi-essieux. Actes des 29<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, Algérie, 29-31 Mai. Vol. 3, pp. 120-129.
- ZOA A., ALLOU F., PETIT C., MEDJO R. (2013).** Fatigue life prediction of an asphalt pavement subjected to multiple axle loadings with viscoelastic FEM, *Construction and Building Materials*, 43, pp. 443-452.
- ZOA A. (2013).** Vers la modélisation du comportement à la fatigue des chaussées bitumineuses routières sous chargement réel. Thèse de l'Université de Limoges, <http://epublications.unilim.fr/theses/index.php?id=147>, 21 janvier 2013.