
Modélisation viscoélastique de l'endommagement des chaussées bitumineuses sous essieux multiples

Zoa Ambassa^{1*,2}, F. Allou¹, C. Petit¹, R. Medjo Eko².

¹Groupe d'Étude des Matériaux Hétérogènes – Équipe Génie Civil et Durabilité, Université de Limoges, boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France.

²Université de Yaoundé 1, BP 812 Yaoundé, Cameroun.

*daniel_zoa@yahoo.fr; fatima.allou@unilim.fr; christophe.petit@unilim.fr; rmedjo@yahoo.com.

RÉSUMÉ. Afin de caractériser le signal de chargement quelconque d'une chaussée bitumineuse, une modélisation numérique de structure de chaussée a été faite à l'aide du code de calcul aux éléments finis Cast3M. Le modèle de Kelvin Voigt généralisé implanté dans ce code a été utilisé pour prendre en compte le comportement viscoélastique des couches bitumineuses. Les résultats obtenus montrent que le signal de chargement dépend de la structure de chaussée (matériaux, épaisseur, température, interfaces, etc.), de la vitesse de chargement et de la configuration de la charge. Le niveau de déformation, la durée et le nombre de pics en extension sont des propriétés du signal de chargement qui influent sur la durée de vie en fatigue.

ABSTRACT. To characterize the signal of some load of flexible pavement, a numerical modeling of pavement structure was made by means of the finite element calculation code Cast3M. generalized Kelvin Voigt model implemented in this code was used to take into account the viscoelastic behavior of asphalt layers. The obtained results show that the signal of load depends on the pavement structure (materials, thickness, temperature, interfaces, etc.), of the speed of load and the configuration of the load. The level of deformation, the duration and the number of peaks in extension are properties of the signal of load which influence the life expectancy fatigue.

MOTS-CLÉS: chaussée, modélisation, signal, chargement, viscoélastique.

KEYWORDS: pavement, modeling, signal, loading, viscoelastic.

1. Introduction

La plupart des méthodes mécaniques utilisées pour l'analyse du comportement de chaussées considèrent une structure multicouches à comportement élastique, linéaire, homogène et isotrope avec un chargement statique. La méthode française de dimensionnement des chaussées (LCPC-SETRA, 1994), basée sur un modèle axisymétrique multicouches de Burmister (Burmister, 1943), est utilisée dans le logiciel ALIZE (LCPC-SETRA, 1998). Dans ce modèle statique 2D, chaque couche a un comportement homogène et élastique. Les effets viscoélastiques des couches bitumineuses sont pris en considération par un module élastique équivalent déterminé à partir des essais de module complexe (Chabot *et al.*, 2010) sur les matériaux bitumineux de référence. Le module élastique équivalent est pris pour une température de 15°C (température moyenne en France) et une fréquence de 10 Hz (EN 12697-26). On suppose que cette dernière est équivalente à la vitesse d'un véhicule de 72 km/h (vitesse moyenne de véhicules en France). L'objectif de ce papier est de caractériser le signal réel d'un chargement de trafic quelconque sur une chaussée bitumineuse afin d'estimer sa durée de vie en fatigue.

2. Structure de chaussée et caractérisation des matériaux bitumineux

2.1. Structure et matériaux

La structure multicouche adoptée (figure 1) pour le calcul est une chaussée bitumineuse, tirée de la fiche N°26 (VRNS) du catalogue des structures neuves (LCPC-SETRA, 1998). Elle est constituée de matériaux ayant un comportement viscoélastique (couches bitumineuses) et élastique (couches non liés) avec des paramètres standards pour le dimensionnement.

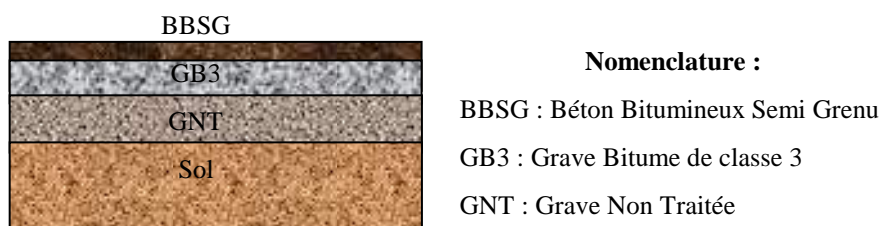


Figure 1. Structure étudiée.

Les caractéristiques géométriques et élastiques de cette structure de chaussée sont les suivantes : couche de roulement en BBSG de 60 mm d'épaisseur, E : 5400

MPa; couche de base en GB3 de 80 mm d'épaisseur, E : 9300 MPa; couche de fondation en GNT d'épaisseur 200 mm, E : 300 MPa; et la couche de sol support d'épaisseur 3000 mm, E : 120 MPa. Le coefficient de Poisson est égal à 0,35 pour tous les matériaux.

2.2. Caractérisation rhéologique à partir des données de modules complexes

Les données de mesures des modules complexes utilisées dans ce papier proviennent des essais de laboratoire sur des matériaux bitumineux. Dans cet article, on décrira le comportement viscoélastique linéaire des matériaux bitumineux en utilisant le modèle de Kelvin Voigt généralisé.

L'expression du module complexe de ce modèle est donnée par l'équation suivante :

$$E^{*KVG}(j\omega, T) = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^{i=N} \left(\frac{1}{E_i + j\omega\eta_i(T)} \right)^{-1} \quad [1]$$

Le modèle appelé « modèle 2S2P1D » développé par Olard et Di Benedetto est utilisé pour calibrer le modèle de Kelvin Voigt généralisé (Olard et Di Benedetto 2003). Il permet de mieux caractériser les propriétés viscoélastiques des matériaux bitumineux. Ce modèle (figure 2) est constitué d'une combinaison d'éléments analogiques (deux ressorts, deux éléments paraboliques et un amortisseur linéaire). À une température donnée, ce modèle possède 7 constantes et son module complexe est donné par l'expression suivante :

$$E^{*2S2P1D}(j\omega\tau) = E_\infty + \frac{E_0 - E_\infty}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad [2]$$

avec $1 > h > k > 0$.

Pour sa calibration, la méthode utilisée afin de déterminer les constantes de ce modèle consiste à minimiser la somme des distances entre le module complexe expérimental et celui du modèle général introduit en N points de pulsation ω_i . Cette minimisation est faite à la température de référence $T_{réf}$ en utilisant le Solver de MS Excel :

$$\sum_{i=1}^{i=N} \left(\left[E_1^{\text{exp}}(\omega_i) - E_1^{2S2P1D}(\omega_i) \right]^2 + \left[E_2^{\text{exp}}(\omega_i) - E_2^{2S2P1D}(\omega_i) \right]^2 \right) \quad [3]$$

E_1^{exp} et E_2^{exp} sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire du module complexe expérimental ($E^{*\text{exp}}$). E_1^{2S2P1D} et E_2^{2S2P1D} sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire du module complexe du modèle 2S2P1D ($E^{*2S2P1D}$). Les figures 3 et 4 présentent une comparaison entre les données expérimentales de

modules complexes et le modèle 2S2P1D calibré à une température de référence $T_{\text{réf}} = 20^\circ\text{C}$. Le tableau 1 présente les différents paramètres du modèle introduit pour le Béton Bitumineux Semi Grenu (BBSG) et la Grave Bitume de classe 3 (GB3) à $T_{\text{réf}} = 20^\circ\text{C}$ pour $\tau_{\text{réf}}$.

Tableau 1. Paramètres du modèle 2S2P1D obtenus pour des températures de 20 et 30°C.

Matériau	δ	k	h	E_∞	E_0	β	τ à (20°C)	τ à (30°C)
BBSG	1,7	0,208	0,540	73	33500	10	0,00496	0,00032
GB3	1,95	0,220	0,633	74	31000	19	0,00966	0,00090

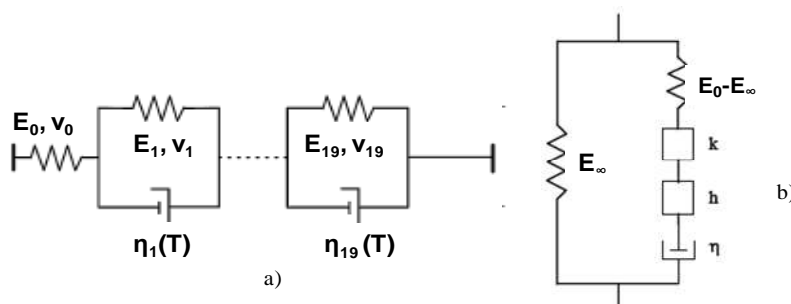


Figure 2. a) Forme asymptotique du modèle de Kelvin Voigt généralisé à 19 branches dans le domaine viscoélastique linéaire, b) Modèle 2S2P1D.

Les paramètres ($n+1$ valeurs de E_i et n valeurs de η_i) du modèle de Kelvin Voigt généralisé sont obtenus suivant un processus d'optimisation à partir des 7 paramètres du modèle 2S2P1D. Le module E_0 dans l'expression du module complexe du modèle 2S2P1D (Équation 2) correspond à la rigidité E_0 du modèle KVG (Équation 1). La méthode de détermination des paramètres du modèle de KVG consiste à minimiser la somme des distances entre le module complexe du modèle 2S2P1D et celui du modèle KVG introduit en N points de pulsation ω_i . Cette minimisation est faite à la température de référence $T_{\text{réf}}$ en utilisant le Solver de MS Excel :

$$\sum_{i=1}^{i=N} \left(\left[E_1^{2S2P1D}(\omega_i) - E_1^{KVG}(\omega_i) \right]^2 + \left[E_2^{2S2P1D}(\omega_i) - E_2^{KVG}(\omega_i) \right]^2 \right) \quad [4]$$

E_1^{KVG} et E_2^{KVG} sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire du module complexe du modèle KVG. Les figures 3 et 4 présentent une comparaison entre les données de module complexe du modèle 2S2P1D et le modèle KVG à 19 branches calibré à une température de référence $T_{\text{réf}} = 20^\circ\text{C}$. Le tableau 2 présente les différents paramètres E_i et η_i du modèle KVG obtenus à $T_{\text{réf}} = 20^\circ\text{C}$.

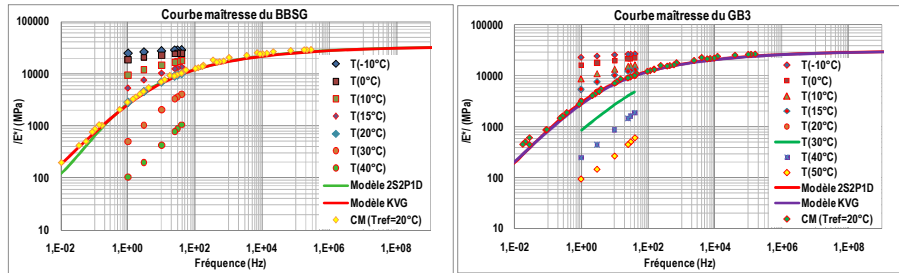


Figure 3. Calage des paramètres des modèles 2S2PID et KVG à 19 branches sur la courbe maîtresse de référence.

Tableau 2. Paramètres du modèle de Kelvin Voigt généralisé obtenus pour des températures de 20 et 30°C.

n°	BBSG			GB3		
	E _i (MPa)	η _i (20°C) (MPa.s)	η _i (30°C) (MPa.s)	E _i (MPa)	η _i (20°C) (MPa.s)	η _i (30°C) (MPa.s)
	33500			31000		
1	1479000	9,15E-06	5,34E-07	1522500	1,04E-05	8,95E-07
2	1397400	8,65E-05	5,04E-06	1438500	9,79E-05	8,46E-06
3	1091400	6,76E-04	3,94E-05	1123500	7,65E-04	6,61E-05
4	705840	4,37E-03	2,55E-04	726600	4,95E-03	4,27E-04
5	433500	2,68E-02	1,57E-03	446250	3,04E-02	2,62E-03
6	265200	1,64E-01	9,57E-03	273000	1,86E-01	1,61E-02
7	159120	9,85E-01	5,74E-02	163800	1,12E+00	9,63E-02
8	90576	5,61E+00	3,27E-01	93240	6,35E+00	5,48E-01
9	46716	2,89E+01	1,69E+00	48090	3,27E+01	2,83E+00
10	20196	1,25E+02	7,29E+00	20790	1,42E+02	1,22E+01
11	7007	4,34E+02	2,53E+01	7214	4,91E+02	4,24E+01
12	1999	1,24E+03	7,22E+01	2058	1,40E+03	1,21E+02
13	495	3,06E+03	1,79E+02	509	3,47E+03	2,99E+02
14	99	6,12E+03	3,57E+02	102	6,93E+03	5,98E+02
15	22	1,33E+04	7,77E+02	22	1,51E+04	1,30E+03
16	216	1,34E+06	7,81E+04	223	1,52E+06	1,31E+05
17	733	4,54E+07	2,65E+06	755	5,14E+07	4,44E+06
18	19278	1,19E+10	6,96E+08	19845	1,35E+10	1,17E+09
19	504900	3,13E+12	1,82E+11	519750	3,54E+12	3,06E+11

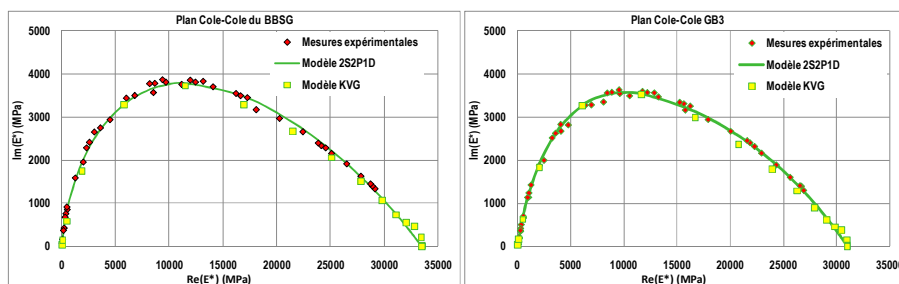


Figure 4. Comparaison des Modules complexes expérimentaux et ceux obtenus par le modèle 2S2PID et le modèle KVG à 19 branches.

3. Modélisation éléments finis 3D de la structure de chaussée

Lors du passage d'une charge, roulant suivant l'axe L à une vitesse V, supposée constante, le point A (figure 5) de la chaussée est sollicité. Ce point est situé à une profondeur Z par rapport à la surface.

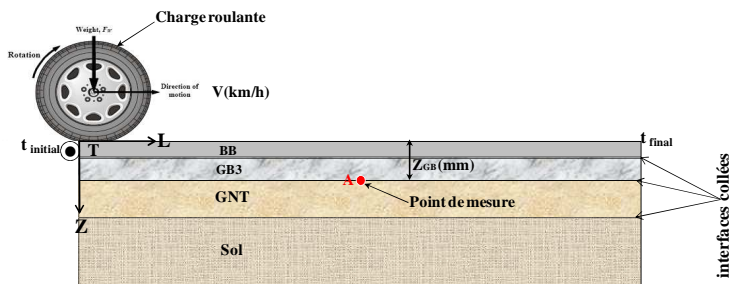


Figure 5. Schéma de sollicitation d'une charge roulante dans la chaussée.

La pression de contact charge/chaussée étant uniformément répartie sur une surface rectangulaire, la construction du modèle élément finis sous Cast3M (Cast3M, 2009) est faite en utilisant des éléments cubiques à 8 nœuds (CUB8) comme supports géométriques pour chaque couche de matériau. Le modèle de Kelvin Voigt généralisé implémenté dans ce code de calcul a été utilisé pour prendre en compte le comportement viscoélastique des couches bitumineuses. Les paramètres de ce modèle à 19 branches et un ressort en série sont présentés dans le tableau 2. La figure 6-a présente le maillage du modèle éléments finis 3D de la structure de chaussée étudiée (§.2.1) sous sollicitation d'un tridem. Il est construit et utilisé pour évaluer la réponse mécanique de la structure sous l'effet d'une charge roulante. Les épaisseurs des couches de chaussée (§.2.1) sont suivies l'axe Z et l'axe L est la direction de la charge roulante. Les interfaces entre couches de chaussée sont parfaitement collées. Les effets des essieux simples, tandem et tridem des poids lourds courants (662kPa d'intensité chacune, sauf pour le chargement tandem qui est de 535 kPa) sur les chaussées routières et autoroutières ont été pris en compte à différentes vitesses de chargement. Le plan d'encastrement de la structure est bloqué en déplacement, les deux plans latéraux LZ sont bloqués suivant l'axe T et les déplacements des deux plans transversaux LT sont bloqués suivant l'axe L.

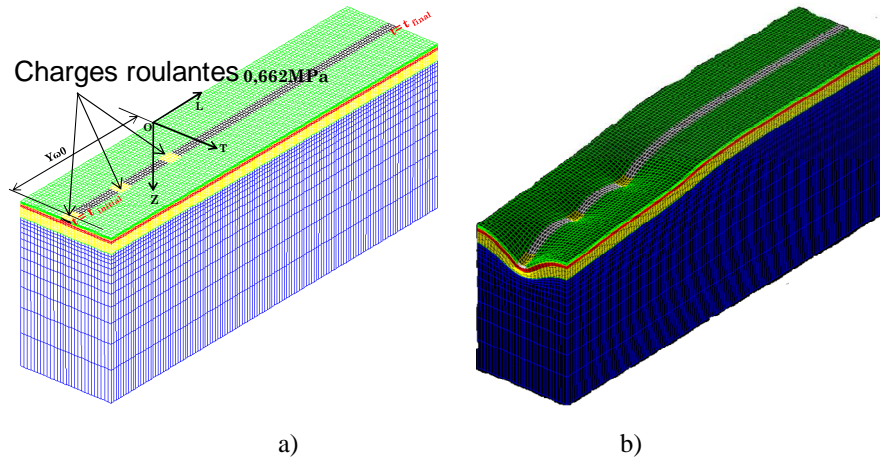


Figure 6. a) Vue du maillage 3D sous sollicitation d'une charge roulante de type tridem ; b) déformée de la structure sous charge roulante de type tridem au temps initial.

4. Réponse de chaussée bitumineuse et analyse des facteurs influant

La figure 6-b montre l'état de la déformée de la structure sous charge roulante de type tridem. Les figures 7 et 8 présentent les signaux de déformations longitudinales et transversales obtenus au fond de la couche de GB3 (point A de la figure 5). Ces figures 7 et 8 montrent qu'à l'approche de la charge, le point de mesure A (figure 5) est soumis à une contraction (déformation longitudinale) puis à une extension quand la charge est suffisamment proche, et l'amplitude de déformations longitudinales et transversales en extension est beaucoup plus grande que celle en contraction. La résistance de l'enrobé bitumineux en traction étant beaucoup plus faible que celle en compression, la dégradation se fait donc principalement dans la phase de traction par flexion. Les couches étant collées, cette traction par flexion est plus importante au point A et c'est à ce niveau que se déclenche l'amorçage de la fissure. Les figures 9 et 10 présentent les signaux de contraintes de cisaillement d'interface BBSG/GB3 de la structure de chaussée étudiée. L'interface entre couches de matériau bitumineux est plus sollicitée quand la température est basse.

Les résultats de simulations sous Cast3M du comportement de cette structure montrent que le signal de chargement dépend de la structure de chaussée (loi de comportement des matériaux, épaisseur et rigidité des couches, température, type d'interface entre couches, ...), de la configuration du chargement (intensité de la charge, type de roues, ...) et de la vitesse de chargement. Un véhicule lent dégrade la chaussée plus qu'un véhicule rapide. Le niveau de déformation, la durée et le

nombre de pics en extension sont des propriétés du signal de chargement qui influent sur la durée de vie en fatigue des chaussées bitumineuses.

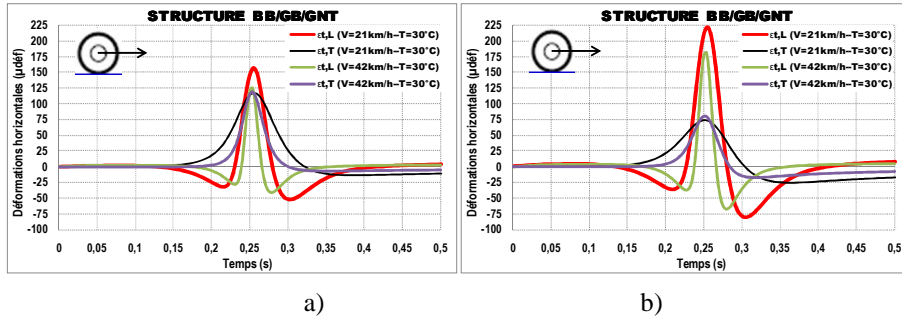


Figure 7. Signaux de déformations longitudinales et transversales à la base de la couche de GB3 ($Z=140\text{mm}$) au passage d'une charge roulante : a) roue isolée ; b) jumelage standard.

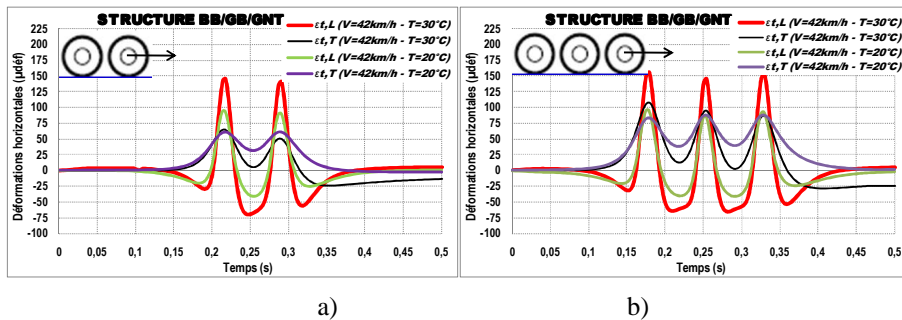


Figure 8. Signaux de déformations longitudinales et transversales à la base de la couche de GB3 ($Z=140\text{mm}$) au passage d'une charge roulante : a) configuration tandem ; b) chargement tridem.

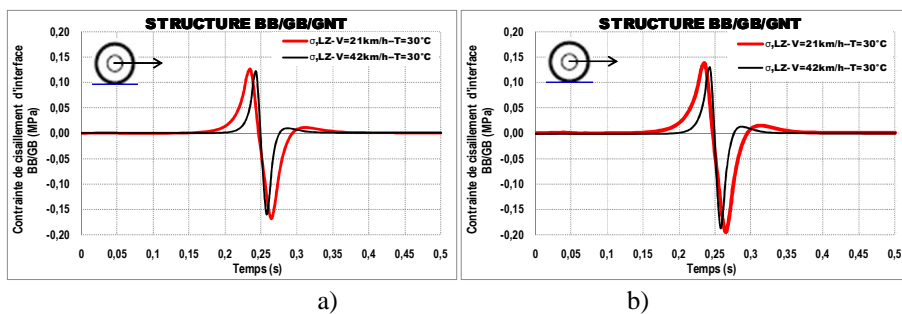


Figure 9. Signaux des contraintes de cisaillement d'interface BBSG/GB3 ($Z=60\text{mm}$) pris dans les sens longitudinal au passage d'une charge roulante : a) roue isolée; b) jumelage standard.

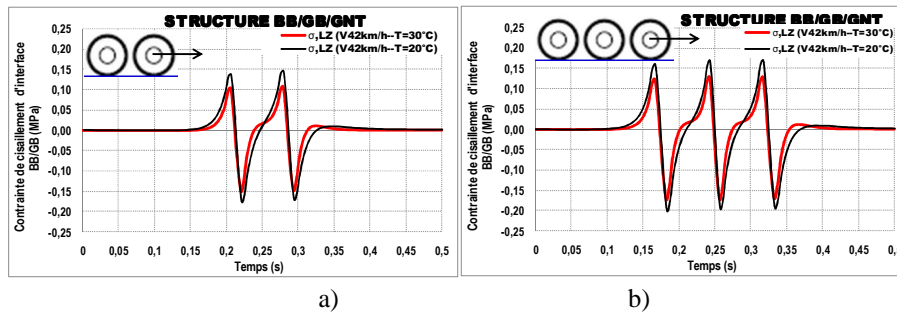


Figure 10. Signaux des contraintes de cisaillement d'interface BBSG/GB3 ($Z=60\text{mm}$) pris dans les sens longitudinal au passage d'une charge roulante : a) configuration tandem ; b) chargement tridem.

5. Conclusion et perspectives

Ces premiers résultats sur un modèle viscoélastique montrent qu'à vitesse constante, plus la température augmente, plus l'amplitude des signaux de déformations augmente et inversement pour l'amplitude des signaux de contraintes de cisaillement d'interface BBSG/GB3 qui diminue avec l'augmentation de la température. À température constante, l'amplitude des signaux de déformations et de contraintes de cisaillement d'interface BBSG/GB3 diminue au fur et à mesure que la vitesse augmente. L'utilisation d'un modèle viscoélastique à charge mobile intégrant tous ces paramètres influant permet d'évaluer de manière réaliste les effets des chargements multi-essieux sur l'endommagement par fatigue des chaussées bitumineuses. Ces résultats seront confirmés par d'autres modèles plus complexes et réalistes que nous aborderons prochainement, en prenant en compte d'autres facteurs tels que les sollicitations tangentielles sur les points singuliers et l'effet de l'interface entre couches de chaussée.

6. Bibliographie

Burmister D. M., « The theory of stresses and displacements in layered systems and applications of the design of airport runways », *Proceedings of the Highway Research Board* 23, 1943, pp. 126 – 148.

CAST3M « Cast3M is a research FEM environment; its development is sponsored by the French Atomic Energy Commission », at <http://www-cast3m.cea.fr/cast3m>, 2009.

Chabot A., Chupin O., Deloffre L., Duhamel D., « ViscoRoute 2.0 – A Tool for the Simulation of Moving Loads Effects on Asphalt Pavement », *Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, n° 2, 2010, p. 227-250.

LCPC–SETRA, *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*», *Guide technique* Paris, Décembre 1994.

LCPC–SETRA, *Catalogue des structures types de chaussées neuves*, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, France, 1998.

Olard F., Di Benedetto H., « General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes », *Road Materials and Pavement Design*, vol. 4, n° 2, 2003, p. 185-224.