

---

page 17 - AMPHI 9 - Lundi 22 mai 2017 - 16:56/16:58 (02 min)

# Détermination du comportement visco-élastique d'une grave routière à base de MIOM traitée au bitume par modélisation numérique 3D hiérarchique multi-échelles

Libasse SOW<sup>1,2</sup>, Fabrice BERNARD<sup>2</sup>, Siham KAMALI-BERNARD<sup>2</sup>, Cheikh Mouhamed Fadel KEBE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ecole Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar - Sénégal

<sup>2</sup>Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM), INSA de Rennes - France

Corresponding author: [libasse.sow@esp.sn](mailto:libasse.sow@esp.sn) / [libasse.sow@insa-rennes.fr](mailto:libasse.sow@insa-rennes.fr)

---

**RÉSUMÉ.** Partant d'une granulométrie de particules de MIOM 0/25 qui a fait l'objet d'une étude expérimentale dans [BEC 07], nous avons mis en place un modèle numérique 3D dans des volumes élémentaires représentatifs. Ce modèle est basé sur une stratégie de modélisation dite « multi-échelles hiérarchique ». Les agrégats traités au bitume ont été pris en compte explicitement dans deux volumes élémentaires représentatifs : sub-mesoscopique (0/6) et mesoscopique (6/25). Les tests de relaxation de contraintes effectués aux deux échelles ont permis d'obtenir les propriétés thermo-rhéologiques de la grave de MIOM traités à 3% de bitume. Ces propriétés sont les poids de la série de Prony à une température de référence de 0°C ainsi que les constantes de la loi WLF pour décrire le comportement thermo-rhéologiquement simple. Les séries de Prony sont obtenues par l'intermédiaire des modules élastiques normalisés. Les constantes de loi WLF obtenues sont  $C_1=20$  °C<sup>-1</sup> et  $C_2=130$  °C. Une validation numérique a été faite en comparant les réponses du matériau hétérogène de grave-bitume et celles d'un matériau homogène à qui nous avons donné les propriétés tirées du matériau hétérogène.

**ABSTRACT.** Starting with a particle size of particles MSWI bottom ash 0/25 which was the subject of an experimental study in the thesis of Frédéric Becquart [BEC 07], a 3D numerical model has been developed. This model is based on a hierarchical multi-scale modeling strategy. In this study, the aggregates are embedded in bitumen. Two representative elementary volumes are considered: sub-mesoscopic (0/6) and mesoscopic 6/25). The stress relaxation tests carried out at the two scales enable one to obtain the thermo-rheological properties of the micro-aggregate treated with 3% bitumen. These properties are the Prony series at a reference temperature of 0°C and the WLF law constants. Prony series are obtained by means of standardized elastic moduli. The obtained WLF law constants are  $C_1=20$  °C<sup>-1</sup> and  $C_2=130$  °C. The numerical simulations have been validated by comparing the responses of heterogeneous and corresponding homogeneous materials.

**MOTS-CLÉS:** modélisation multi-échelles hiérarchique, grave routière, MIOM, bitume, viscoélastique, série de Prony, loi WLF, modules élastiques normalisés

**KEY WORDS:** hierarchical multi-scale modeling, road aggregates, MSWI bottom ash, bitumen, viscoelastic, Prony series, WLF law, standardized elastic moduli

---

## 1. Introduction

En techniques routières, les différentes couches doivent être constituées de matériaux capables de reprendre et de répartir les charges provenant des véhicules roulants. Les assises de chaussée jouent un rôle structurel important du fait qu'elles réduisent les contraintes exercées sur le sol de fondation. Les matériaux constitutifs de ces couches doivent présenter des caractéristiques mécaniques leur permettant de remplir pleinement leurs fonctions dans la structure de chaussée. Face à une expansion démographique importante et une consommation sans cesse croissante des populations, les autorités publiques, notamment les villes, se trouvent confrontées à des problèmes d'urbanisation aigus les poussant à revoir leurs politiques de gestion des déchets. Dans un cadre de recyclage et de développement durable, les Mâchefers d'Incineration d'Ordures Ménagères (MIOM) peuvent représenter un gisement de substitution de granulats classiques stratégiques pour faire face à l'impossibilité de mise en décharge continue des déchets et aux difficultés d'ouverture de nouvelles carrières de matériaux routiers. Plusieurs auteurs se sont intéressés à la modélisation des matériaux bitumineux : [LYT 90], [BUT 99], [MET 99], [SHA 02], [KIM 04], [SHU 08], [BAN 08], [NGU 08], [DAI 11] et [TEH 12]. Dans sa thèse, [NGU 08] a fait une étude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique avec une analyse de l'essai de rupture sur un bitume viscoélastique pur de classe 50/70. Il a déterminé par un travail expérimental les propriétés thermo-rhéologiques (paramètres de la série de Prony, les constantes de la loi WLF, la courbe maîtresse, entre autres). [TEH 12] a utilisé les propriétés du bitume de [NGU 08] et a mis en place une stratégie de modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis pour déterminer le module dynamique des enrobés poreux (matrice/inclusions). Le matériau considéré est modélisé comme un milieu bi-phasique 2D composé d'inclusions granulaires avec des propriétés élastiques linéaires et une matrice poreuse bitumineuse contenant un pourcentage donné de porosité (6 à 5%) présentant un comportement viscoélastique linéaire pour des valeurs de déformation faibles ( $\epsilon_{\max} \leq 10^{-4}$ ). Dans ce présent article, nous développons une modélisation 3D de graves routières à base de MIOM traitées au bitume. Cette modélisation prend en compte explicitement les différentes phases du matériau granulaire traité (liant, squelette granulaire, porosité) dans des volumes élémentaires représentatifs. Le liant bitumineux est celui de [NGU 08] et de [TEH 12]. Les MIOM en question (figure 1) sont ceux étudiés

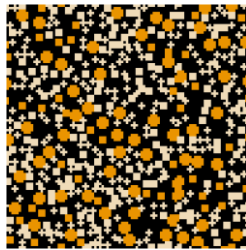


**Figure 1.** Granulats de MIOM étudiés dans la modélisation [BEC 07]

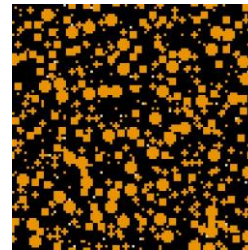
Comme tout matériau présentant un squelette granulaire, les MIOM traités peuvent voir leur structure granulométrique se diviser en différentes échelles. Nous développons une modélisation multi-échelles hiérarchique consistant à représenter l'hétérogénéité de la grave routière traitée au bitume dans des volumes élémentaires représentatifs des différentes échelles d'études. L'objectif est de mettre en place une méthodologie de détermination par simulations numériques des paramètres thermo-rhéologiques simples de la grave routière à base de MIOM traités à 3% de bitume.

## 2. Stratégie de modélisation adoptée

La modélisation se base sur une grave dont la formule de recombinaison granulométrique est la suivante : classe 0/6: 47,5% ; classe 6/25: 52,5%. La fraction granulaire des MIOM est trop étendue pour être considérée dans son intégralité dans une modélisation aux Eléments Finis 3D car cela conduirait à un nombre de grains et de degrés de liberté trop importants. Nous devons donc considérer deux échelles et adopter une stratégie de modélisation hiérarchique : une échelle sub-mesoscopique (classe 0/6 - micro-grave-bitume - MGB) et une échelle mesoscopique (classe 6/25 - grave-bitume - GB). Les figures 2 et 3 montrent les structures générées.



**Figure 2.** Image 2D de la MGB générée avec la méthode du « Take and place »



**Figure 3.** Image 2D de la GB générée avec la méthode du « Take and place »

Le comportement mécanique des phases viscoélastiques à chaque échelle est pris en compte en développant le module de cisaillement et le module volumique sous la forme de séries de Prony :

$$G_R(t) = G_0 \left( 1 - \sum_{k=1}^N \bar{g}_k^p (1 - e^{-t/\tau_k}) \right) \quad [1]$$

$$K_R(t) = K_0 \left( 1 - \sum_{k=1}^N \bar{k}_k^p (1 - e^{-t/\tau_k}) \right) \quad [2]$$

Ces expressions montrent que le comportement du matériau peut être phénoménologiquement reproduit par des associations en parallèle de ressorts et d'amortisseurs en séries. Les résultats de [NGU 08] sont utilisés : 13 ressorts et amortisseurs sont nécessaires pour bien reproduire le comportement viscoélastique du bitume. En fonction de la température, le bitume présente un comportement thermo-rhéologiquement simple : il suffit ainsi de connaître son comportement à une température de référence  $T_{ref}$  pour le déduire à n'importe quelle température. Ce comportement est pris en compte par l'intermédiaire du principe d'équivalence temps-température. Ce principe permet de préciser la dépendance en température des grandeurs viscoélastiques ; il stipule que le passage de la température de référence  $T_{ref}$  à une température  $T$  revient à multiplier l'échelle du temps par un facteur constant (dit facteur de décalage)  $a_T$ . La loi WLF est utilisée pour exprimer  $a_T$  :

$$\log a_T = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{C_2+T-T_{ref}} \quad [3]$$

Nous utilisons les résultats de [NGU 08] à la température de référence  $T_{ref} = 0^\circ\text{C}$ . Identifier le comportement thermo-rhéologiquement simple d'un matériau revient à identifier  $C_1$  et  $C_2$ . La stratégie de simulation adoptée est celle qui suit :

**Détermination des propriétés thermo-rhéologiques de la MGB :**

- Modules de cisaillement normalisés en fonction du temps
  - Poids de la série de Prony
- Constantes de la loi WLF de la MGB

**Simulations sur VER mesoscopique : MGB + Gros MIOM (0/6+6/25)**

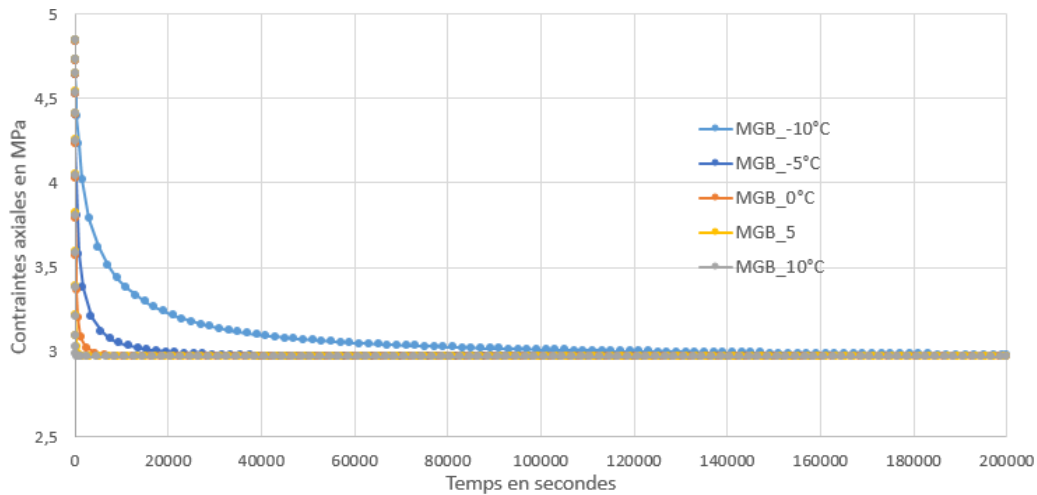
→ Tests de relaxation de contraintes en fonction du temps

**Détermination des propriétés thermo-rhéologiques de la GB :**

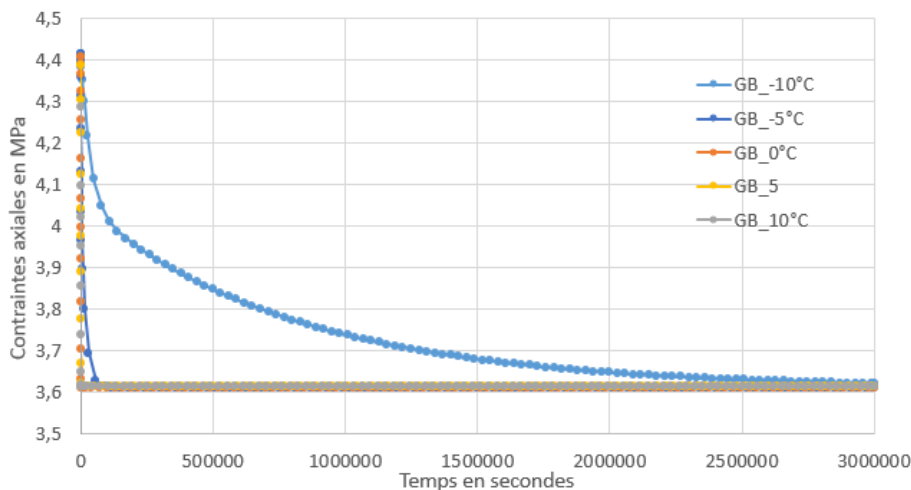
- Modules de cisaillement normalisés en fonction du temps
  - Poids de la série de Prony
- Constantes de la loi WLF de la grave de MIOM traitée au bitume

**3. Tests de relaxation de contraintes**

Nous avons simulé des tests de « relaxation de contraintes » sur la micro-grave-bitume et sur la grave-bitume. Les paramètres des séries de Prony de la MGB ou de la GB sont obtenus par une calibration utilisant la méthode des moindres carrés. Les tests de relaxation de contraintes sont effectués à différentes températures d’essais de sorte à avoir le même module pour chaque température (égal au module à -10°C). Les courbes de relaxation de contraintes à -10, -5, 0, 5 et 10°C sont montrées aux figures 3 et 4. Ces tests ont permis de déterminer les caractéristiques thermo-rhéologiques caractérisant la grave de MIOM traitée à 3 % de bitume. Il a été trouvé  $C_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  et  $C_2 = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Figure 3.** Courbes de relaxation de contraintes de la MGB en fonction du temps



**Figure 4.** Courbes de relaxation de contraintes de la GB en fonction du temps

#### 4. Validation des caractéristiques thermo-rhéologiques de la grave-bitume

Afin de vérifier et valider la méthodologie d'identification des paramètres thermo-rhéologiques de la micro-grave-bitume, une comparaison est faite entre la réponse du VER hétérogène et celle d'un VER homogène de même dimension. Nous avons donné au VER homogène les caractéristiques obtenues par le biais de la stratégie de modélisation sur VER hétérogène. Les tableaux 1 et 2 donnent les écarts relatifs moyens entre la réponse du VER hétérogène et celle du VER homogène.

**Tableau 1.** Ecarts relatifs moyens pour les différentes températures d'essai entre réponse VER homogène de MGB et VER hétérogène de MGB

Température d'essai (°C)	-10	-5	0	5	10
Ecart relatif moyen (%)	16,62	6,27	3,94	3,26	2,45

**Tableau 2.** Ecarts relatifs moyens pour les différentes températures d'essai entre réponse VER homogène de grave-bitume et VER hétérogène de grave-bitume

Température d'essai (°C)	-10	-5	0	5	10
Ecart relatif moyen (%)	12,06	2,28	1,73	1,38	1,61

#### 5. Conclusions et perspectives

En partant d'une granulométrie de MIOM, nous avons mis en place un modèle numérique de modélisation multi-échelles représentant la grave de MIOM traités à 3% de bitume. La formulation sur laquelle nous sommes partis correspond à la courbe granulométrique moyenne du fuseau retenu pour les graves routières.

Avec ce modèle numérique 3D, une stratégie de changement d'échelles avec une méthode de détermination des paramètres thermo-rhéologiques a pu être testée et validée. Les propriétés thermo-rhéologiques de la micro-grave-bitume ainsi que celles de la grave de MIOM traitées à 3 % de bitume ont ainsi été déterminées. Nous sommes parvenus à déterminer : la série de Prony de la grave-bitume par l'intermédiaire des modules de cisaillement normalisés en fonction du temps et les constantes de la loi WLF par le biais de la relaxation de contraintes en fonction du temps. Les constantes de la loi WLF obtenues aussi bien pour la micro-grave que la grave-bitume sont :  $C_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  et  $C_2 = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ce modèle numérique 3D ouvre des perspectives d'application pour étudier les problèmes courants en techniques routières tels que l'orniérage, la fissuration, ainsi tous les autres types de dégradations de chaussée.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [APP 04] Rapport APPIA. Valorisation des MIOM dans les infrastructures routières. Ecole des mines de Doua, Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lille. Avril 2004.
- [BAN 08] R. Bandyopadhyaya, A. Das, S. Basu, Constr. Build. Mater. 22 (2008) 1051– 1058.
- [BEC 07] Frédéric Becquart. Première approche du comportement mécanique d'un milieu granulaire issu d'un mâchefer d'incinération d'ordures ménagères : valorisation en technique routière. PhD thesis. Université des sciences et technologies de Lille. Mars 2007.
- [BUT 99] W.G. Buttlar, D. Bouzkurt, G. Al-khateeb, A.S. Waldhoff, Trans. Res. Rec. 1681 (1999) 157–169.
- [DAI 11] Q. Dai, Constr. Build. Mater. 25 (2011) 1102–1114.
- [KIM 08] Y. Kim, D.N. Little, J. Mater. Civil Eng. 16 (2) (2004).
- [LYT 90] R. Lytton. Strategy High. Resolution Progress, Washington, DC, 1990.
- [MET 99] G. Li, Y. Li, J.B. Metcalf, S.S. Pang, J. Mater. Civil Eng. 11 (3) (1999) 236–241.
- [NGU 08] Hoai Nam Nguyen. Etude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume. PhD thesis. Ecole Nationale des Ponts et Chaussée. Décembre 2008.
- [SHA 02] N. Shashidhar, A. Shenoy, Mech. Mater. 34 (2002) 657–669.
- [SHU 08] X. Shu, B. Huang, J. Mater. Civil. Eng. 20 (8) (2008) 530–538.
- [TEH 12] F. Fakhari Tehrani, J. Absi, F. Allou, Ch. Petit. Heterogeneous numerical modeling of asphalt concrete through use of a biphasic approach: Porous matrix/inclusions. Computational Materials Science. Juin 2012.