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

Libasse Sow, Fabrice Bernard, Siham Kamali-Bernard, Cheikh Mouhamed Fadel Kébé

▶ **To cite this version:**

Libasse Sow, Fabrice Bernard, Siham Kamali-Bernard, Cheikh Mouhamed Fadel Kébé. Détermination du comportement visco-élastique d'une grave routière à base de MIOM traitée au bitume par modélisation numérique 3D hiérarchique multi-échelle. 35èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, AUGC, May 2017, Nantes, France. hal-01579074

HAL Id: hal-01579074
https://hal.science/hal-01579074

Submitted on 30 Aug 2017

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.

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[1,2], Fabrice BERNARD[2], Siham KAMALI-BERNARD[2], Cheikh Mouhamed Fadel KEBE[1]
[1]*Ecole Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar - Sénégal*
[2]*Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM), INSA de Rennes - France*
Corresponding author: libasse.sow@esp.sn / 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^{-1} 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 modelling 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^{-1} 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 modelling, 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 repartir 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 autorisés 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'Incinération 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 maitresse, 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 ($\varepsilon_{max} \leq 10^{-4}$). 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

expérimentalement dans la thèse de Frédéric Becquart en 2007 [BEC 07].

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 recomposition 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.

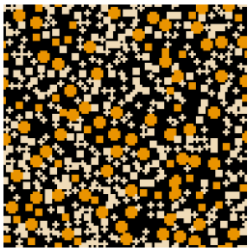

Figure 2. *Image 2D de la MGB générée avec la méthode du « Take and place »*

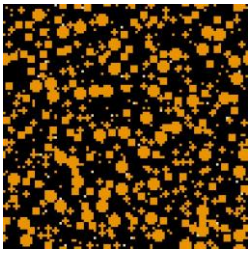

Figure 3. *Image 2D de la GB générée avec la méthode du « Take and place »*

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 :

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

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

Ces expressions montrent que le comportement du matériau peut être phénoménologiquement reproduit par des associations en parallèle de ressorts et d'amortissements 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 °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 :

Simulations sur VER sub-mesoscopique : MGB (0/6)
→ Tests de relation de contraintes en fonction du temps

Détermination des propriétés thermo-rhéologiques de la MGB :
- Constantes de la loi WLF
- Modules de cisaillement normalisés
- Modules volumiques normalisés
- Paramètres de la série de Prony

Simulations sur VER mesoscopique : MGB (0/6) + MIOM (6/25)
→ Tests de relation de contraintes en fonction du temps

Détermination des propriétés thermo-rhéologiques de la GB :
- Constantes de la loi WLF
- Modules de cisaillement normalisés
- Modules volumiques normalisés
- Paramètres de la série de Prony

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.

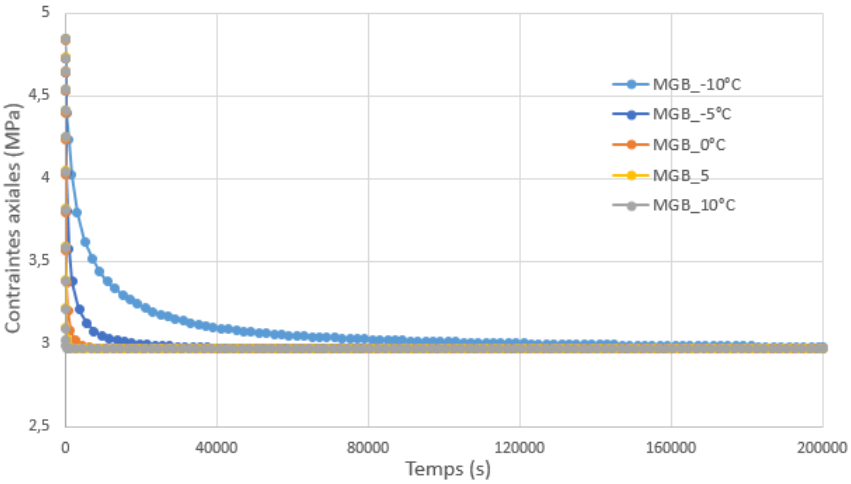

Figure 3. *Courbes de relaxation de contraintes de la MGB en fonction du temps*

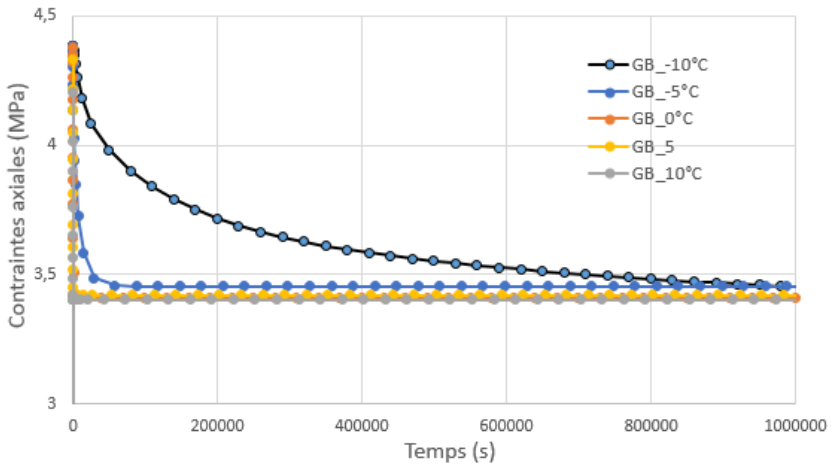

Figure 4. *Courbes de relaxation de contraintes de la GB en fonction du temps*

4. Propriétés thermo-rhéologiques obtenues aux deux échelles d'étude

Les constantes de la loi WLF obtenues sont données au tableau 1. Les tableaux 2 et 3 donnent respectivement les paramètres des séries de Prony de la MGB et de la GB à une température de référence de 0 °C.

Tableau 1. *Constantes de la loi WLF de la MGB et de la GB à une température de référence de 0 °C*

C_1 (°C^{-1})	C_2 (°C)
20	130

Tableau 2. *Série de Prony de la MGB à une température de référence de 0 °C*

i	g_i	k_i	τ_i (s)
1	0,22105	0	13,671
2	0	5,054E-02	132,05
3	0,24879	0	315,54

Tableau 3. *Série de Prony de la GB à une température de référence de 0 °C*

i	g_i	k_i	τ_i (s)
1	0,11265	0	16,367
2	0	2,546E-02	124,28
3	0,14593	0	357,97

5. Validation de la méthodologie de détermination des propriétés thermo-rhéologiques

Afin de vérifier et valider la méthodologie d'identification des paramètres thermo-rhéologiques obtenus aux deux échelles d'étude, 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 4 et 5 donnent les écarts relatifs moyens entre la réponde du VER hétérogène et celle du VER homogène.

Tableau 4. *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 (%)	3,14	2,16	1,05	2,44	2,68

Tableau 5. *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 (%)	1,35	1,21	0,91	1,03	1,29

6. Conclusions et perspectives

En partant d'une granulométrie de MIOM, nous avons mis en place un modèle numérique de modélisation multi-échelles hiérarchique représentant la grave de MIOM traitée 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 traitée à 3 % de bitume ont ainsi été déterminées. Nous sommes parvenus à déterminer : les séries de Prony par l'intermédiaire de modules élastiques normalisés et les constantes de la loi WLF par le biais de la relaxation de contraintes en fonction du temps.

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.