

---

# Modélisation numérique des enrobés bitumineux en tant que biphasés matrice-inclusions

**F. Fakhari Tehrani<sup>1</sup>, F. Allou<sup>2</sup>, J. Absi<sup>1</sup>, C. Petit<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Groupe d'Étude des Matériaux Hétérogènes – Équipe Matériaux minéraux de grande diffusion. ENSCI, 47 à 73 avenue Albert Thomas, 87065 Limoges Cedex, France.

<sup>2</sup> Groupe d'Étude des Matériaux Hétérogènes – Équipe Génie Civil et Durabilité. Université de Limoges, boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France.

[fatehftehrani@yahoo.com](mailto:fatehftehrani@yahoo.com), [fatima.allou@unilim.fr](mailto:fatima.allou@unilim.fr), [joseph.absi@unilim.fr](mailto:joseph.absi@unilim.fr),  
[christophe.petit@unilim.fr](mailto:christophe.petit@unilim.fr).

---

*RÉSUMÉ.* Cet article présente un modèle numérique 2D capable de prédire le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux. Le matériau a été modélisé en tant qu'un milieu biphasé contenant des inclusions (granulats) à propriétés élastiques linéaires et une matrice (le mastic) ayant un comportement viscoélastique linéaire limité aux petites déformations. Le modèle rhéologique de Maxwell généralisé a été utilisé pour exprimer le comportement viscoélastique du mastic. Dans ce modèle, nous avons généré d'une façon aléatoire des inclusions de différentes tailles et différentes formes qui représentent le squelette granulaire des enrobés bitumineux. La taille et la forme des granulats sont choisies de façon à s'approcher du cas réel. Le modèle est soumis à un déplacement constant dans le domaine temporel.

*ABSTRACT.* This paper presents 2D numerical finite element (FE) model for predicting the viscoelastic behavior of asphalt mixes. In this work asphalt mix are modeled as a biphasic material containing inclusions (granular) with elastic linear properties and matrix (bituminous mastics) who has viscoelastic behavior at small strain. The generated Maxwell was used to express viscoelastic behavior of bituminous matrix. In this model, we generated random inclusions of different sizes and different shape which represents aggregate skeleton of asphalt mix. The size and shape of aggregates are chosen to approach a granulometric curve of asphalt mixes. This model is subjected to a line load at constant displacement rate who can explain time domain solicitation.

*MOTS-CLÉS:* Simulation numérique, Matériau bitumineux, Comportement élastique ou viscoélastique.

*KEY WORDS:* Numerical simulation, Bituminous material, Elastic or Viscoelastic properties.

---

## 1 Introduction

L'enrobé bitumineux est un matériau très hétérogène, complexe et contient plusieurs phases : une matrice viscoélastique (mastic), un squelette rigide de granulats et un faible pourcentage de vides. Dans ce milieu, les granulats ont des formes très irrégulières et des angularités complexes de différentes tailles. Le diamètre des plus petits grains est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres alors que les plus gros grains peuvent atteindre quelques dizaines de millimètres. Ceci nous amène à distinguer trois classes d'inclusions : une première classe dans laquelle les grains ont un très petit diamètre équivalent (le diamètre de la sphère ayant le même volume), une seconde classe où les grains présentent une taille moyenne (les sables) et, une dernière classe pour les plus gros grains (les gravillons)[Lech.04]. Dans notre travail, nous considérons que la matrice (mastic) est constituée du liant et d'inclusions de petites tailles de diamètre inférieur ou égal à 2 mm (les grains appartenant à la première et à la deuxième classe) ayant un comportement viscoélastique. Quant aux inclusions, ils sont constitués de granulats élastiques linéaires infiniment rigides de diamètre supérieur à 2 mm (voir figure 1).

La prédiction du comportement mécanique de tel matériau hétérogène est très complexe et demande une attention particulière à l'étude de la microstructure et du comportement mécanique des différentes phases. Des études récentes ont été réalisées afin de modéliser ce matériau hétérogène par imagerie (X-ray computed tomography images) à partir d'un échantillon réel [DAI 10, BAN 08]. Pour étudier l'effet de l'hétérogénéité de la composition, ce concept nécessite l'utilisation de plusieurs échantillons à différentes compositions.

L'objectif de notre travail est de proposer un modèle numérique simple afin de simuler le comportement mécanique de ce milieu hétérogène. La stratégie adoptée est basée sur une génération de modèles numérique comportant deux phases : la matrice et les inclusions. Grâce aux outils informatiques développés dans notre laboratoire, nous pouvons ainsi maîtriser la forme, la taille et le pourcentage des constituants de ce milieu hétérogène sans avoir recours à une étape expérimentale de préparation et de caractérisation, longue et coûteuse. Ainsi, cette maîtrise nous permettra d'étudier l'effet de plusieurs paramètres sur le comportement mécanique global du matériau : la composition, le taux de remplissage de chaque phase, l'introduction des vides. L'intérêt majeur de notre approche réside dans le fait d'une possible génération de modèles aléatoires rapide, simple et complémentaire à l'incontournable phase expérimentale de validation.

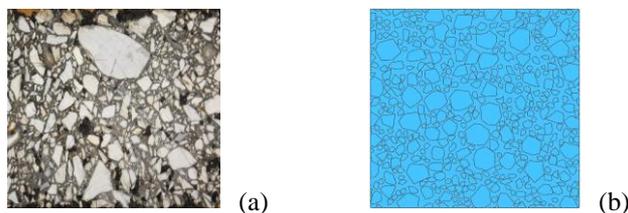


Figure 1 : Enrobé bitumineux: (a) réel, (b) modèle numérique.

## 2 Identification du modèle rhéologique de la matrice

Le mastic bitumineux (liants bitumineux) est un matériau viscoélastique, c'est à dire que ses propriétés mécaniques dépendent de la durée de sollicitation (ou de sa fréquence) et de la température. On considère qu'un enrobé bitumineux présente un domaine de sollicitation pour lequel son comportement est linéaire. Ceci nécessite d'appliquer des petites déformations dans les mesures du module des liants bitumineux [MAI 05].

Dans cet article, le modèle de Maxwell généralisé est utilisé pour modéliser le comportement viscoélastique linéaire du mastic.

Ce modèle est constitué par l'association en parallèle de  $n$  éléments de Maxwell. Chaque élément est défini par un module de rigidité  $E_j$  et par un coefficient de viscosité  $\tau_j$ . Un groupe d'éléments de Maxwell en parallèle représente un spectre discret de temps de relaxation. chaque temps  $\tau_j$  étant associé à une rigidité spectrale  $E_j(\tau_j = \frac{\eta_j}{E_j})$ . Un ressort est placé en parallèle au groupe de  $n$  éléments de Maxwell. La fonction de relaxation de ce modèle s'écrit :

$$R(t) = E_{\infty} + \sum E_j e^{-t/\tau_j} \quad [1]$$

Ce comportement est modélisé sous la forme de séries de Prony dont le modèle rhéologique est composé de 13 éléments de Maxwell en parallèle.

Les paramètres  $E_{\infty}$ ,  $E_j$  et  $\tau_j$  sont déterminés à partir des résultats expérimentaux de module complexe d'un bitume 50/70 à 0°C [Hoa 08] (tableau 1).

0°C	$E_i$ (Mpa)	$\mu_i$ (Mpa.s)	$\tau_i$ (s)
i=0	6,24E-02	0	0
i=1	2,10E+02	9,46974E-05	4,52E-07
i=2	1,70E+02	0,000470485	2,77E-06
i=3	2,42E+02	0,005464977	2,26E-05
i=4	1,82E+02	0,015724295	8,65E-05
i=5	3,61E+02	0,17688768	4,89E-04
i=6	2,64E+02	1,00450338	3,81E-03
i=7	2,17E+02	5,62012215	2,60E-02
i=8	1,53E+02	25,9172525	1,69E-01
i=9	8,22E+01	98,26693632	1,20E+00
i=10	3,21E+01	332,83748	1,04E+01
i=11	8,70E+00	343,768672	3,95E+01
i=12	3,89E+00	860,99888	221,2
i=13	5,45E+00	8996,79	1650

Tableau 1: Paramètres du modèle de Maxwell généralisé pour un bitume à 0° [Hoa 08]

## 3 Modélisation par éléments finis : ABAQUS

### 3.1 Définition des inclusions

La taille et la forme des granulats dans le matériau sont choisies de façon à s'approcher du cas réel. Dans cette étude, nous simulons un béton bitumineux semi grenu BBSG 0/10[Zem 08]. On considère dans cette simulation que la plus petite taille des granulats est de 2 mm. Pour créer un modèle numérique du béton

bitumineux en respectant les données granulométrique du tableau 2, nous plaçons aléatoirement des granulats selon leur taille minimale, leur taille maximale et leur taux de remplissage. Le pourcentage surfacique total des granulats étant de 56%.

Diamètre (mm)	% des passants
10	97
6.3	57
4	52
2	34
0.063	6.7

Tableau 2 : Répartition granulométrique d'un BBSG 0/10.

On considère que les granulats ont un comportement élastique linéaire isotrope dont les caractéristiques sont :  $E = 70 \text{ GPa}$  et  $\nu = 0,30$ .

### 3.2 Définition du VER des Enrobés bitumineux:

Dans un premier temps, nous avons réalisé une recherche du volume élémentaire représentatif (VER) du comportement de l'enrobé bitumineux. Le nombre d'inclusions dans le VER en 2D a été défini de telle sorte que la réponse du modèle numérique ne soit pas influencée par la morphologie et le nombre d'inclusions placés à l'horizontale et à la verticale. Ce travail de réglage du modèle a été basé sur celui développé par Bing [Bin 09].

Finalement, notre choix s'est fixé sur un domaine carré de  $(16*16) \text{ cm}^2$  contenant plus d'une dizaine de gros grains au niveau de chaque éventuelle section verticale et/ou horizontale et approximativement aux alentours de cinq cent grains dans le modèles complet.

### 3.2 Modèle matrice –inclusions :

L'évaluation du comportement du béton bitumineux au niveau mésoscopique nécessite la génération de modèle numérique de béton avec une structure granulaire et une distribution aléatoire des grains en forme et en position. Le mastic assure la cohésion des granulats et le bon enrobage de tous les grains du mélange. La matrice (le mastic) contient les plus petits granulats et dépend de la finesse de la représentation géométrique des granulats. Sa position dépend entièrement de la distribution spatiale des particules (granulats).

### 3.3 Modeleur d'objets aléatoire :

Pour générer la structure granulaire du béton bitumineux numérique, nous avons écrit un logiciel MOA : « Modeleur d'Objets Aléatoires » en langage C++. Cette application est capable de distribuer d'une façon aléatoire des inclusions de différentes formes, différents pourcentage de remplissage en 2D et en 3D et selon une granulométrie donnée. Le fichier de sortie (nom.igs) comporte la géométrie des inclusions et leurs coordonnées. Ce fichier est utilisé ensuite par le code de calcul Abaqus pour construire le maillage de l'échantillon (voir figure 2).

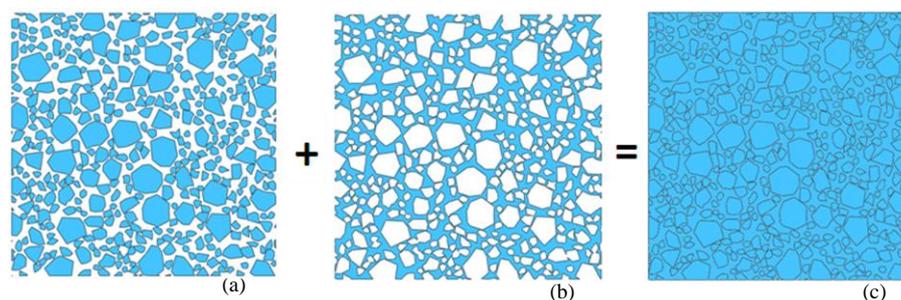


Figure 2 : Génération de l'échantillon numérique : (a) Inclusions, (b) matrice et (c) modèle final

### 3.4 Maillage :

Le maillage se compose d'éléments triangulaires à 3 nœuds (TRI3). La taille des éléments utilisés pour le maillage des inclusions est de 2 mm, ce qui permet de décomposer le plus petit granulat avec assez d'éléments.

Afin d'avoir accès à plus d'informations (l'état de contrainte et de déformation) dans la matrice, nous avons raffiné le maillage de la matrice par rapport à celui des inclusions. La taille des éléments de la matrice est de 0,2 mm. Ceci correspond à une dizaine d'éléments par rapport à la taille du plus petit granulat. La figure 3 représente le maillage du modèle numérique.

À l'interface matrice/inclusions le contact est « parfaitement collé ». Dans le logiciel ABAQUS, ce type de contact permanent est créé grâce à la fonction « tied : liaison complète » [ABA 04]. Durant le calcul, les nœuds en vis à vis vont assurer la continuité des déplacements et la transmission des contraintes [JOL 06].

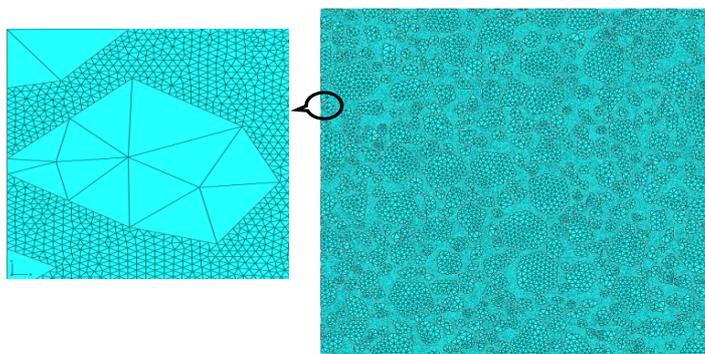


Figure 3 : Le maillage du modèle numérique.

### 3.5 Condition aux limites:

Le calcul par élément finis est réalisé en contrainte plane. Les conditions aux limites imposées à notre modèle sont :

- ✓ sur le côté inférieur, le déplacement vertical est annulé ;
- ✓ sur le côté gauche latéral, le déplacement horizontal est annulé.

### 3.6 Chargement appliqué:

Deux cas de charges peuvent être appliqués dans le domaine temporel : chargement de fluage (contrainte constante) et chargement de relaxation (déformation constante). Afin de respecter la limite de la déformation acceptée dans le domaine de viscoélasticité linéaire ( $\epsilon < 10^{-4}$ )[Ola 03], le modèle est soumis à un déplacement vertical constant de 0,016 mm appliqué sur sa surface pendant 100s.

## 4 Résultats

### 4.1 Etat de la contrainte:

Les figures 4a et 4b montrent les cartographies des contraintes verticales dans la matrice et dans les inclusions à  $t=10^{-2}$ s, respectivement. On remarque deux zones critiques :

la première se trouve autour des granulats de formes coniques ;

la deuxième se trouve dans le film mince, notamment celui qui se situe dans la direction perpendiculaire au chargement imposé.

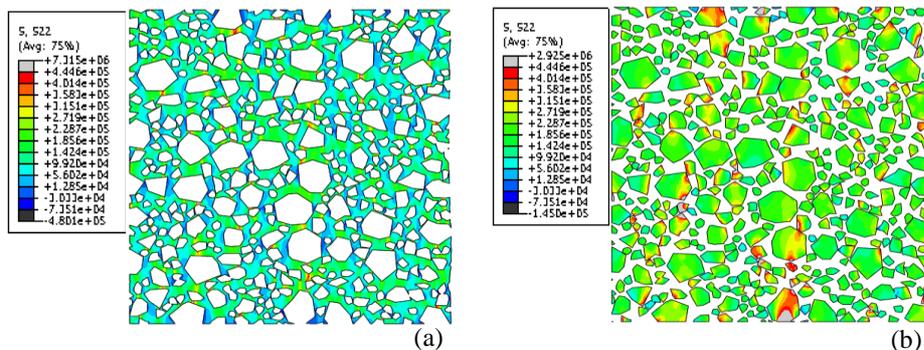


Figure 4 : La contrainte verticale pour  $t=10^{-2}$ s, (a) dans la matrice, (b) dans des granulats

On constate aussi, que le niveau de contrainte dans le mastic est au dessus de celui obtenu pour les granulats pendant les premiers pas de temps (phase instantanée), étant donné que le module instantané du mastic est 37 fois plus faible que celui des inclusions.

#### 4.2 Etat de la déformée:

Les cartographies de déplacement et de déformation verticale dans la matrice sont présentées dans les figures 5a et 5b, respectivement.

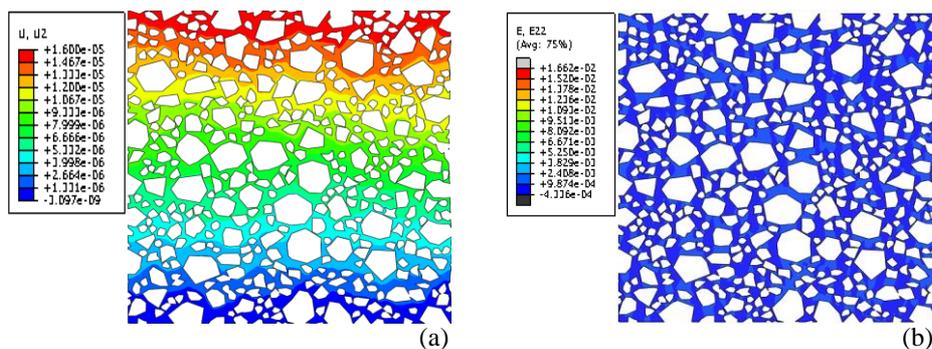


Figure 5 : Comparaison entre le déplacement verticale(a) et la déformation locale (b) dans la matrice,  $t=100s$

On remarque que le niveau de déformation est plus élevé dans la matrice que dans les granules. Comme le mastic est un matériau viscoélastique déformable par rapport aux granules élastiques rigides, son niveau de déformations est plus élevé que celui des granules. Avec l'augmentation du temps de simulation, la valeur de cette différence de déformation augmente. Ceci peut exprimer la perte de rigidité de la matrice avec le temps.

On constate que la déformation locale maximale ( $\epsilon=1,66*10^{-2}$ ) est 160 fois plus élevée par rapport à la déformation appliquée ( $\epsilon=10^{-4}$ ). Cette augmentation peut être expliquée par la forte hétérogénéité du modèle et par l'effet visqueux de la matrice, en opposition à un modèle homogène élastique.

#### 4.2. État des contraintes et de déformations à l'interface granulat/Matrice:

Afin de visualiser l'état de contrainte et de déformation locale aux interfaces inclusions/ matrice, trois zones ont été choisie, voir figure 6, en fonction de l'épaisseur de la matrice. En traversant le modèle verticalement, du haut en bas :

- ✓ la zone 1 est constituée d'une matrice de 3mm d'épaisseur, d'un granulat de 8mm d'épaisseur et d'un film mince de 600 $\mu$ m d'épaisseur. nous avons choisi 8 éléments: trois dans la matrice, deux dans le granulat et finalement trois éléments dans le film mince ;
- ✓ la zone 2 est constituée d'une matrice de 2,4 mm d'épaisseur, d'un granulat de 10 mm d'épaisseur et d'un film mince de 400  $\mu$ m d'épaisseur. nous avons choisi 7 éléments: trois dans la matrice, deux dans le granulat et finalement deux éléments dans le film mince ;

- ✓ la zone 3 est constituée d'un film mince de  $400\mu\text{m}$  d'épaisseur, d'un granulat de  $6\text{mm}$  d'épaisseur et d'une matrice de  $1,6\text{mm}$  d'épaisseur. nous avons choisi 7 éléments: deux dans le film mince, deux dans le granulat et finalement trois éléments dans la matrice.

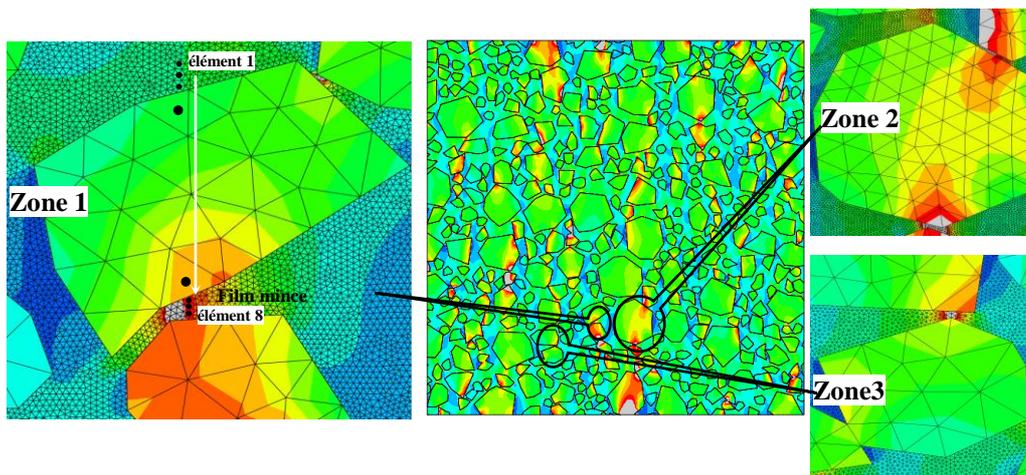


Figure 6 : les trois zones choisies à l'interface matrice-inclusions

La figure 7 représente la contrainte verticale dans la matrice et dans le granulat de la zone 1. Dans cette zone et au début de la simulation, on constate que la contrainte dans les éléments du film mince (éléments 6, 7 et 8) est 1,9 fois plus élevée que celle de l'élément dans le granulat au voisinage du film mince (élément 5). Le niveau de contrainte dans la matrice à faible épaisseur (film mince) est 3 fois plus élevé que dans la matrice épaisse (éléments 1, 2 et 3).

Les figures 8a et 8b représentent, respectivement, les déformations verticales de la matrice et du granulat dans la zone 1. On trouve, une grande différence entre les deux milieux (granulat et matrice). Le niveau de déformation dans la matrice est beaucoup plus important due à l'influence de son comportement viscoélastique dissipatif.

Il reste à signaler que les phénomènes remarqués dans la zone 1 sont valables aussi pour les zones 2 et 3.

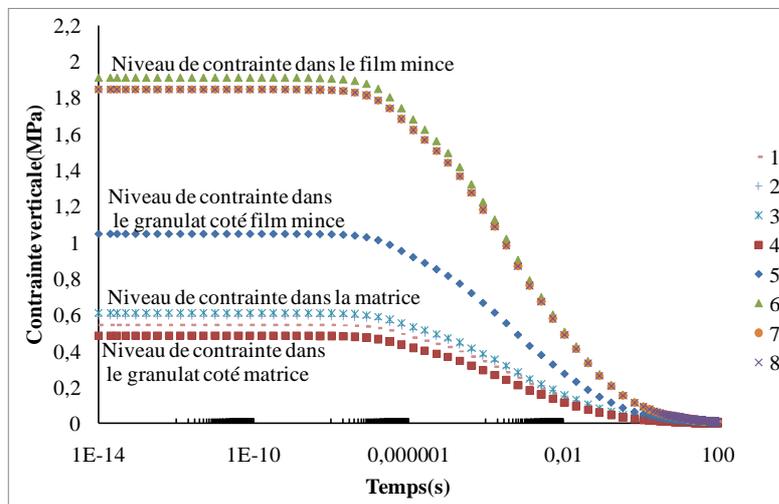


Figure 7: Contrainte en fonction du temps dans le film mince, granulat et la matrice.

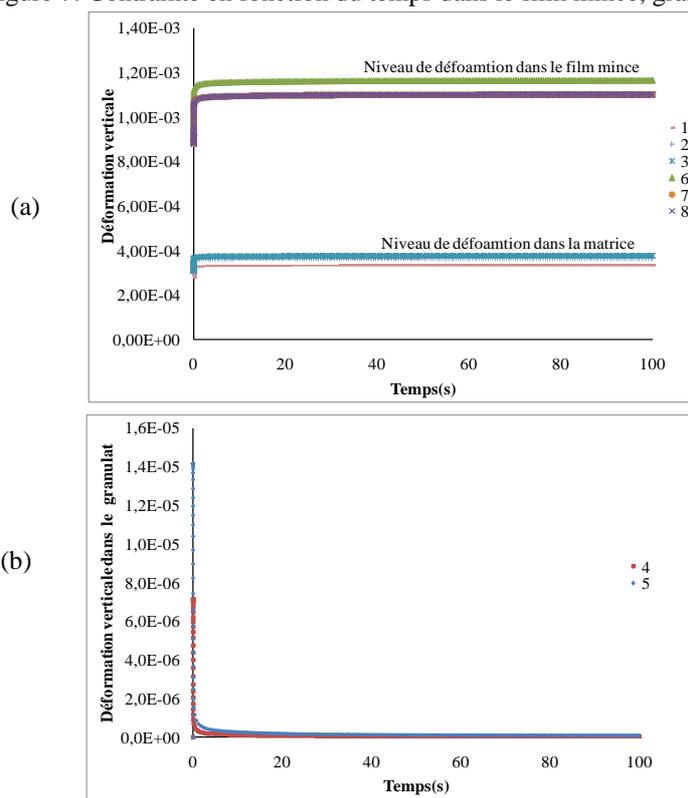


Figure 8 : Déformation verticale en fonction du temps : (a) dans la matrice, (b) dans le granulat.

## 5 Conclusion

Pour prédire le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux, nous avons proposé dans cette étude la faisabilité d'un modèle élément finis 2D matrice-inclusions. Ce modèle est capable de décrire la réponse de ce milieu extrêmement hétérogène à une excitation temporelle.

En premier lieu, une modélisation analytique des propriétés viscoélastiques linéaires a été réalisée grâce au modèle de Maxwell généralisé.

Le modèle numérique 2D utilisé, considère un comportement élastique linéaire pour les inclusions et un comportement viscoélastique pour la matrice basé sur la modélisation analytique citée ci-dessus. La génération du modèle a été rendu possible grâce à un logiciel écrit au sein de notre laboratoire en langage C++. La rapidité de génération et la facilité de transfert des modèles sous le logiciel de calcul numérique par éléments finis Abaqus, laisse présager une possible optimisation de la composition en grain des matériaux bitumineux sans avoir forcément recours à une grande campagne de validation expérimentale accompagnons chaque étape de l'étude. En considérant plusieurs formes de granulats, différents pourcentages de remplissages des différentes phases, différents taux et formes de vides, on peut proposer des prédictions de niveaux de contraintes et de déformations dans la matrice viscoélastique et dans les granulats capable de préserver le matériaux bitumineux d'une détérioration rapide et prématurée. Ce résultat est difficilement envisageable par une modélisation rhéologique globalisée.

### 1. Bibliographie

- [Lac 04] Lechihab A., un modèle numérique pour les composites biphasés matrice-inclusions rigides : Application à la détermination des propriétés élastiques et en fatigue des enrobés bitumineux, Thèse de doctorat, ENPC, 2004
- [DAI 10] Dai Q., Two and three-dimensional micromechanical viscoelastic finite element modeling of stone-based materials with X-ray computed tomography images, Article, Construction and building materials, 2010
- [BAN 08] Bandyopadhyaya R., Numerical simulation of mechanical behavior of asphalt mix, Article, Construction and building materials, 2008
- [MAI 05] Maillard S., Fissuration et autoréparation des liants bitumineux apports de l'essai de rupture locale répétée sur bitume, Thèse de doctorat, LCPC de Nantes, 2005.
- [HOA 08] Hoai Nam N., Etude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : analyse de l'essai de rupture sur Bitume, Thèse de doctorat, ENPC, 2008.
- [ZEM 08] Zemmiri A., Comparaison des formulations d'enrobés à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point vue sécurité (glissance) et orniérage, Certificat d'études supérieur

- [Bin 09] Bing Qi., Influence de l'endommagement sur les propriétés d'élasticité de matériaux modèles, approche numérique et expérimentale, Thèse de doctorant, Université de Limoges, 2009.
- [ABA 04] ABAQUS Theory Manual, Version 6.4 Dassault système, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 2004.
- [JOL 06] Joliff Y., Etude expérimentale et numérique des propriétés d'élasticité de matériaux modèles hétérogène, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2006.
- [OLA 03] Olard F., Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basse température relation entre les propriétés du liant et de l'enrobé, Thèse de doctorat, ENTPE, INSA de Lyon, 2003.