

Etude de la variation des champs mécaniques et thermique dans le béton bitumineux lors de chargement cyclique

E. RIAHI^a, F. ALLOU^a, F. DUBOIS^a, L. ULMET^a, J. ABSI^b, C. PETIT^a

a. Université de Limoges, GEMH, EA 3178, F-19300 Egletons, France

b. A Université de Limoges, SPCTS, F-87068 Limoges, France

ebrahim.riahi@unilim.fr, fatima.allou@unilim.fr, frederic.dubois@unilim.fr, laurent.ulmet@unilim.fr, joseph.absi@unilim.fr, christophe.petit@unilim.fr

Résumé :

Les enrobés bitumineux sont des matériaux hétérogènes composés d'une matrice bitumineuse, ayant un comportement viscoélastique, et des granulats possédant un comportement élastique. Le comportement du mélange final est influencé par le comportement du liant bitumineux qui est un matériau fortement thermosensible. Lors d'un essai de fatigue, les sollicitations cycliques font apparaître des dissipations énergétiques, ce qui cause une production de chaleur et par conséquent une diminution de module de rigidité du liant. Dans ce travail, à l'aide d'une modélisation numérique hétérogène par la méthode des éléments finis, la densité d'énergie dissipée localement dans la matrice ainsi que l'échauffement local, lors d'un essai de fatigue, sont calculés. Le résultat de cette modélisation montre que la densité d'énergie dissipée dans le film mince peut être jusqu'à 30 fois plus élevée que la valeur moyenne homogénéisée. Une évolution de la température plus importante à cet endroit peut être observée au début de l'essai et qui disparaîtra au cours de temps grâce au transfert de chaleur vers les granulats.

Abstract :

The asphalt concrete is a heterogeneous material containing a bituminous matrix with viscoelastic properties and aggregates with elastic behavior. Mechanical behavior of the final mixture is strongly dependent to the behavior of bituminous matrix which is a thermo-sensitive material. During the fatigue test, cyclic solicitations create dissipated energy which is the source of auto-heating of material and consequently the decrease of binder rigidity. In this paper, local dissipated energy density in the bituminous matrix as well as temperature evolution, under a fatigue test loading, is calculated using a heterogeneous simulation by finite element method. The results of the numerical simulation at thin film of matrix show a dissipated energy density until 30 times higher than the homogenized average value. Temperature evolution at this level is higher at first, but it disappears over time by effect of heat transfer to the aggregates of economical and safer societies requires to improve the means of transport and of energy production.

Mots clefs : Modélisation hétérogène, Energie dissipée, Echauffement, Viscoélasticité, Fatigue, Enrobé bitumineux.

1 Introduction

Les enrobés bitumineux sont des matériaux fortement hétérogènes contenant trois phases principales.

(i) La matrice, composée de bitume, présentant un comportement viscoélastique thermo-activé dit thermodynamiquement simple avec des conductivités thermiques relativement faibles (dans l'ordre de 0,1 W/m.°C) ; (ii) Les granulats, de quelques dixièmes de millimètres à quelques dizaines de millimètres et pouvant avoir une angularité complexe, ayant un comportement élastique et une conductivité thermique plus élevée (dans l'ordre de 2 W/m.°C) ; (iii) Enfin, les vides avec un faible pourcentage de l'ordre de 5% en volume.

Dans la plupart des travaux de modélisation, les enrobés bitumineux sont considérés comme un matériau homogène. L'inconvénient de cette hypothèse simplificatrice est qu'elle ne permet pas d'étudier les phénomènes locaux produits dans le matériau à cause de son hétérogénéité (tels que l'état de contrainte et de déformation dans le film mince). En utilisant une approche hétérogène, de nombreux auteurs ont observé un niveau de déformation et de contrainte local plus élevé au niveau du film mince dans la matrice lors d'un chargement mécanique [1]–[3]. La Densité d'Énergie Dissipée (DED) résultant du comportement viscoélastique dans la matrice est une fonction du niveau de déformation et de contrainte (1.1). Par conséquent, dans le film mince où ces valeurs sont plus élevées, la quantité d'énergie dissipée sera plus importante. L'énergie dissipée prend la forme d'une source de chaleur qui augmente la température du matériau.

$$DED = \int_{t_1}^{t_2} \sigma \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (1.1)$$

Cet effet est plus visible lors d'un essai de fatigue où un nombre important de cycles de chargement est appliqué au matériau. L'échauffement cause une diminution du module de la matrice thermosensible. De nombreux travaux sur les matériaux bitumineux ont mis en évidence le phénomène d'auto-échauffement pour les différentes échelles, tels que le liant pur [4], [5], le mastic [6], [7] et le Béton Bitumineux Semi Grenu (BBSG) [8], [9].

Etant donné que le résultat de l'essai de fatigue est utilisé dans la méthode française de dimensionnement de chaussée [10], il est important de connaître et de quantifier les phénomènes existants durant cet essai et spécialement de séparer les phénomènes réversibles non liés à la fatigue. La diminution de module due à l'échauffement est une diminution réversible, qui ne peut pas être considérée comme l'endommagement par fatigue. Afin de pouvoir quantifier la diminution de module due à l'auto-échauffement, il est indispensable de déterminer le champ de température dans le matériau.

Ce travail propose une approche alternative reposant sur la prise en compte à la fois de l'hétérogénéité géométrique, et d'une hétérogénéité en terme de lois de comportement, de dissipation énergétique et de transfert de chaleur. Seule la matrice, ayant un comportement viscoélastique, est considérée comme le siège d'une dissipation visqueuse.

$$\lambda \operatorname{div}(\operatorname{grad}(T)) + \operatorname{grad}(\lambda) \cdot \operatorname{grad}(T) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.2)$$

Une modélisation thermomécanique incrémentale est utilisée pour calculer le champ d'énergie dissipée et le champ de température. Pour chaque incrément de temps i , les propriétés viscoélastiques de la matrice (la norme de module complexe et l'angle de phase) sont déterminées à partir du champ de température obtenu dans l'incrément $(i-1)$. Les champs de contrainte et de déformation sont obtenus en appliquant un chargement mécanique sur le matériau. La DED locale, calculée à partir des champs de déformation et de contrainte est intégrée en tant que source de chaleur dans la loi de transfert de chaleur (1.2) permettant de calculer l'évolution de la température dans l'incrément de temps i .

Dans les travaux de modélisation hétérogène réalisés sur les enrobés bitumineux, 3 méthodes de génération d'inclusions ont été utilisées : une génération de formes simplifiées [11], une génération aléatoire [1], [12], [13] ou les techniques basées sur l'imagerie [14], [15]. Ce travail de modélisation repose sur une génération aléatoire de distribution des granulats à l'aide du logiciel MOA [1] tout en respectant la courbe granulométrique du squelette granulaire. Ensuite, afin de réaliser le calcul thermomécanique, le modèle généré par MOA est importé dans le code de calcul par éléments finis Cast3M [20].

2 Présentation du matériau et de l'essai

Ce travail a pour but de modéliser l'essai de fatigue en traction-compression centré à zéro en mode déformation contrôlée, réalisé sur un enrobé bitumineux par Nguyen [9]. Un déplacement sinusoïdal générant une amplitude de déformation de 133 $\mu\text{m}/\text{m}$ est imposé sur un échantillon cylindrique. Les équations (2.1) et (2.2) montrent l'expression de la déformation et la réponse en contrainte pour un matériau viscoélastique.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_A \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

$$\sigma(t) = \sigma_A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.2)$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} \quad (2.3)$$

Dans ces équations, ε_A est l'amplitude de déformation, σ_A est l'amplitude de contrainte, φ est l'angle de phase et $|E^*|$ est la norme du module complexe. La fréquence d'essai est de 10Hz. Le matériau utilisé est un enrobé bitumineux de type BBSG avec une teneur en liant de 6 ppc. Le liant utilisé est un bitume pur de grade initial 50/70 modifié par le dosage à 1,2% d'acide polyphosphorique pour atteindre le grade final 35/50. La formule granulométrique continue 0/10 utilisée est composée de granulats concassés de diorite « Moreau » et de fines d'apport calcaires. La courbe granulométrique est présentée dans la Figure 1.

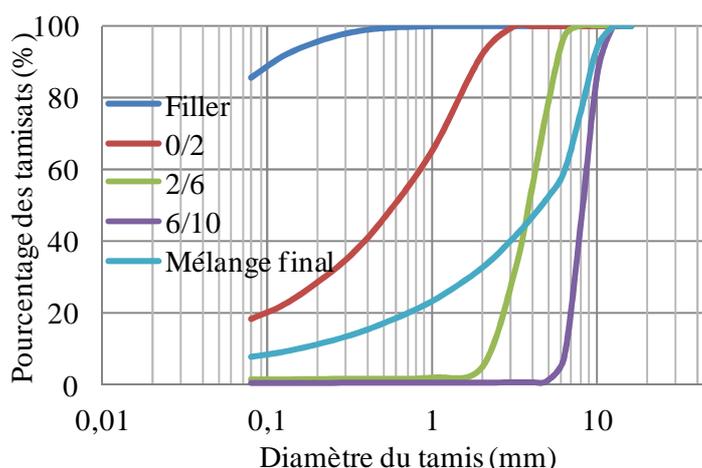


Figure 1. Courbes granulométriques, formulation Béton Bitumineux Semi-Grenu

L'échantillon utilisé pour l'essai est de forme cylindrique, avec un diamètre de 75,1 mm et une hauteur de 119,2 mm. Il est équipé d'un capteur de température sur la surface et un autre à l'intérieur (à 11,05mm du centre de cylindre). Ces capteurs sont placés à mi-hauteur de l'échantillon. L'essai est

réalisé dans une enceinte thermique à une température de 12,4°C. La température de l'enceinte est maintenue constante lors de l'essai.

3 Modèle numérique

La modélisation numérique est réalisée avec la prise en compte d'un axe de symétrie (l'hypothèse axisymétrique). Il est à noter que cette configuration n'est pas à 100% réaliste pour une modélisation hétérogène étant donné que les granulats font un tour autour de l'échantillon et créent des tubes. Malgré ce problème, l'hypothèse d'axisymétrie est préférable à une modélisation 2D (en contrainte plane ou déformation plane) pour modéliser un échantillon cylindrique à cause des conditions aux limites plus réalistes, notamment dans le cas du calcul thermique. Par symétrie, seulement le quart de l'échantillon a été modélisé (Figure 2).

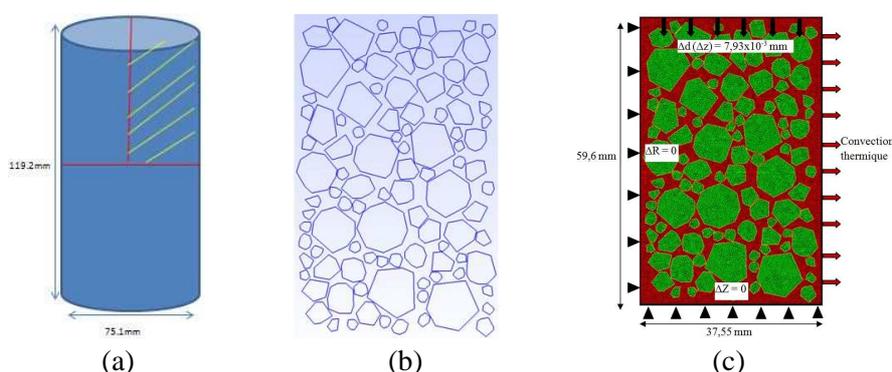


Figure 2. Echantillon (a), Modèle aléatoire généré par MOA (b), et le modèle numérique importé dans Cast3M (c)

La génération aléatoire de granulats en 2D est réalisée avec le logiciel MOA en respectant la courbe granulométrique présentée dans la figure 1. Le modèle généré est importé dans Cast3M et maillé avec des éléments de type TRI6 (triangle à 6 nœuds). A cause des limites du logiciel en pourcentage de génération d'inclusions, un diamètre de coupure égal à 2 mm a été choisi. Les granulats avec un diamètre supérieur à 2mm (2-10mm) ont été modélisés en respectant leur pourcentage volumique dans l'enrobé. Les granulats ayant un diamètre inférieur à 2 mm (0-2 mm) sont considérés comme faisant partie de la matrice, fabriquant ainsi une phase homogène de sable bitumineux. Le pourcentage volumique dans le mélange final pour les granulats ayant un diamètre entre 2 et 10 mm, le sable (0 à 2 mm) et le bitume sont présentés dans le tableau 1. La fraction volumique des inclusions utilisées pour les calculs numériques (le modèle généré par MOA) est de 57,5% (Figure 2).

Tableau 1. Pourcentage volumique dans l'enrobé

	Granulat (2/10 mm)	Sable (0/2 mm)	Bitume	Sable Bitumineux
% Volumique	57,4%	28,6%	14%	42,6%

3.1 Conditions aux limites, chargement

Le déplacement vertical du côté inférieur ainsi que le déplacement horizontal du côté gauche sont bloqués. Un déplacement vertical ($7,9 \times 10^{-3}$ mm) générant une déformation homogène de $133 \mu\text{m}/\text{m}$ est imposé sur le côté supérieur du modèle. Ce niveau de déformation correspond à l'amplitude de déformation (déformation maximale) de chaque cycle de chargement. Le transfert de chaleur par

convection entre la surface de l'échantillon et l'air est modélisé sur le côté droit de l'échantillon avec un coefficient d'échange surfacique de 32,8 W/m²°C [9].

3.2 Propriétés mécaniques et thermiques des granulats

Le comportement mécanique des granulats est modélisé par un comportement élastique avec un module de Young de 60 GPa et un coefficient de poisson de 0,2 [1]. Les propriétés thermiques des granulats de type diorite « la Noubleau » sont pris de la littérature [16] et sont présentées dans le Tableau 2.

3.3 Propriétés mécaniques et thermiques de la matrice

La matrice est composée de sable (granulat de 0-2 mm) avec un pourcentage volumique de 67% et de bitume avec un pourcentage volumique de 33%. Pour modéliser le comportement viscoélastique de la matrice, le sable bitumineux utilisé dans le cadre de la thèse de De La Roche (avec des propriétés proches de notre matrice) est choisi [8]. Ce sable bitumineux (utilisé par De La Roche) est composé de granulats de 0/2 mm (75,5% en volume) et de bitume de classe 40/50 (24,5% en volume).

Les paramètres du modèle de 2S2P1D [17] sont déterminés pour la matrice en fonction des résultats d'un essai de module complexe réalisé sur le matériau. Les variations de la norme de module complexe et de l'angle de phase sont tracées pour une variation de température de 12,4 à 14,4 °C :

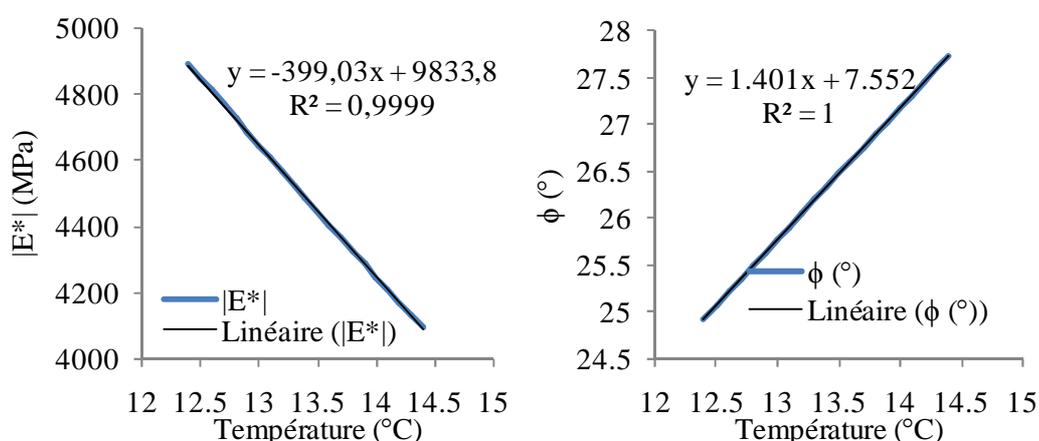


Figure 3. Variation de la norme de module complexe et de l'angle de phase en fonction de la température (Sable bitumineux)

On peut considérer que les variations de la norme de module et de l'angle de phase en fonction de la température pour les petites variations de température sont linéaires [18]. Pour la simulation, étant donné que la variation de la température dans l'échantillon est au maximum de 2°C, la variation de module de la matrice et de l'angle de phase est modélisée avec une fonction linéaire (Figure 3).

Les propriétés thermiques de la matrice sont calculées à l'aide de la loi de mélange [équations (3.1) (3.2)(3.3)] et à partir des propriétés thermiques des inclusions (ici sable 0-2) et de bitume. Les propriétés thermiques du bitume sont prises dans la littérature [19] et présentées dans le Tableau 2.

$$Cp_{matrice} = (1 - m_{Sable(0-2)}) \cdot Cp_{bitume} + m_{Sable(0-2)} \cdot Cp_{Sable(0-2)} \quad (3.1)$$

$$\rho_{matrice} = (1 - V_{Sable(0-2)}) \cdot \rho_{bitume} + V_{Sable(0-2)} \cdot \rho_{Sable(0-2)} \quad (3.2)$$

$$\lambda_{matrice} = \lambda_{bitume} \frac{2\lambda_{bitume} + \lambda_{Sable(0-2)} - 2V_{Sable(0-2)}(\lambda_{bitume} - \lambda_{Sable(0-2)})}{2\lambda_{bitume} + \lambda_{Sable(0-2)} + V_{Sable(0-2)}(\lambda_{bitume} - \lambda_{Sable(0-2)})} \quad (3.3)$$

Tableau 2. Propriétés thermiques des matériaux

	Conductivité (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	Chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	Masse volumique (kg/m ³)
Bitume	0,162	1557,8	1030
Sable-Granulat	2,59	650	2751
Matrice (Sable bitumineux)	0,795	786,55	2198

3.4 Validation des propriétés thermiques

Afin de valider les valeurs obtenues par la loi de mélange, une modélisation thermique hétérogène est réalisée. Dans le modèle numérique, le même taux de dissipation que celui de l'essai de fatigue de Nguyen est injecté dans la matrice. Ensuite les variations de température à l'endroit du thermocouple et à la surface sont comparées aux valeurs expérimentales. Selon les résultats expérimentaux, un taux de densité d'énergie dissipée de 254 J/m³ a été produit par cycle, sur le volume total de l'échantillon [9]. Dans le modèle numérique hétérogène, la matrice avec un comportement viscoélastique est considérée comme la source de dissipation. La quantité de densité d'énergie dissipée correspondante, produite par la matrice, est calculée pour être injectée dans le modèle hétérogène (3.4).

$$DED_{matrice} = \frac{DED_{totale}}{\%V_{matrice}} \quad (3.4)$$

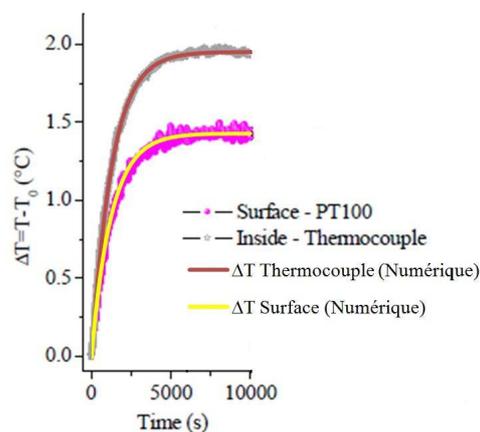


Figure 4. Evolution de la température mesurée et calculée par la modélisation thermique hétérogène

Le résultat de comparaison montre un bon calage entre l'évolution de la température mesurée et celle calculée numériquement. Ainsi, on peut conclure que les propriétés thermiques de la matrice, calculées par la loi de mélange, et les conditions aux limites thermiques imposées, sont validées.

3.5 Procédure de calcul

Le comportement viscoélastique de la matrice est modélisé par un comportement élastique équivalent via la norme du module complexe et l'angle de phase corrigés en fonction de la fréquence de

sollicitation et de la température. Une modélisation thermomécanique incrémentale est utilisée pour calculer le champ d'énergie dissipée et le champ de température. Pour chaque incrément de temps (ici 10s), l'énergie dissipée dans la matrice bitumineuse est calculée en fonction du champ de déformation et des propriétés viscoélastiques (norme du module complexe et angle de phase), mises à jour, à chaque pas de temps, en fonction du champ de température. Dans un second temps, cette énergie est intégrée en tant que source de chaleur dans la loi de transfert de chaleur permettant de calculer l'évolution de la température.

Au début de l'essai (le premier pas de calcul), le champ de température est constant (12,4°C). Le module complexe ainsi que l'angle de phase locaux dans la matrice viscoélastique sont calculés en fonction de la température locale dans la matrice et à l'aide de l'équation (3.5). Après avoir défini le module local, un calcul mécanique est réalisé en appliquant le déplacement vertical ($7,9 \times 10^{-3}$ mm) sur la face supérieure du modèle.

$$\begin{aligned} |E^*|(T) &= -399,03.T + 9833,8 \\ \varphi(T) &= 1,401.T + 7,55 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Les champs de contrainte et de déformation obtenus à partir du calcul mécanique (élastique équivalent) sont utilisés pour calculer le champ de DED à l'aide de l'équation (4.1). Ensuite le champ d'énergie dissipée est injecté dans le calcul thermique pour calculer l'évolution de la température dans l'incrément de temps. Une fois le champ de température calculé pour le premier incrément de temps, le module complexe et l'angle de phase de la matrice sont de nouveau calculés pour l'incrément suivant (Figure 5).

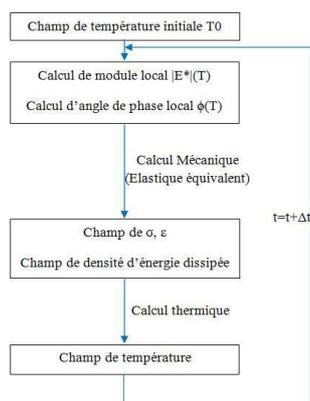


Figure 5. Algorithme de calcul

4 Résultats et discussions

Le résultat obtenu par la modélisation numérique est présenté dans ce paragraphe. Une modélisation hétérogène nous permet d'étudier l'état de contrainte et de déformation local. Le niveau de la déformation homogène est de $133 \mu\text{m}/\text{m}$, alors que dans une échelle locale et au niveau du film mince, un niveau de déformation plus élevé (jusqu'à 8 fois plus grand) peut être constaté. Le même phénomène peut être observé pour l'état de contrainte locale dans la matrice (jusqu'à 4 fois plus grand). Ce phénomène cause une densité d'énergie dissipée plus élevée au niveau du film mince de la matrice. La figure 6 représente le champ de déformation et de contrainte à l'instant $t=10\text{s}$.

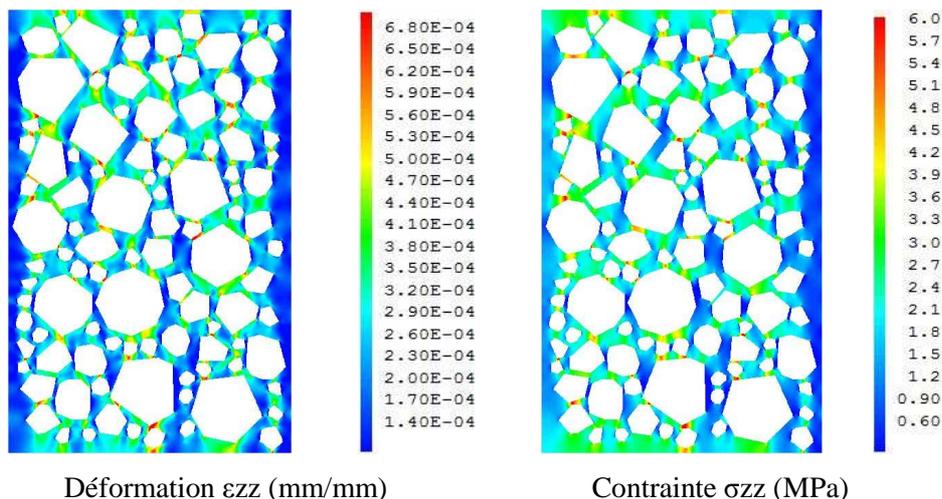


Figure 6. Champ de la contrainte et de la déformation dans la matrice (à $t=10s$)

La densité d'énergie dissipée par cycle est calculée à partir de la déformation et la contrainte locales à chaque pas de temps à l'aide d'équation (4.1). La cartographie de densité d'énergie dissipée à l'instant $t=10s$ est présentée dans la Figure 7.

$$DED_{Cycle} = \pi \cdot \sigma_A \cdot \varepsilon_A \cdot \sin\varphi \quad (4.1)$$

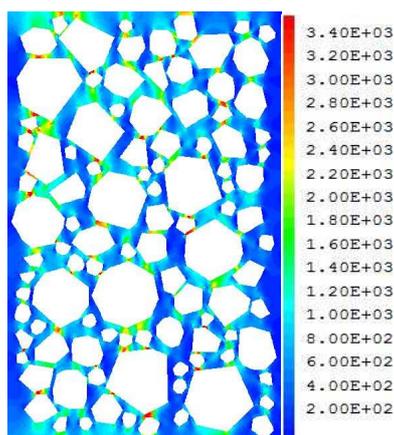


Figure 7. Champ de densité d'énergie dissipée dans la matrice à l'instant $t=10s$ (J/m^3).

La valeur maximale de la densité d'énergie dissipée dans la matrice est de $7,5 \times 10^3 J/m^3$. La quantité d'énergie dissipée par le modèle numérique est obtenue par l'intégration de la densité d'énergie dissipée sur le volume de la matrice. Ensuite, la densité d'énergie dissipée homogénéisée est obtenue en divisant l'énergie dissipée totale par le volume total du modèle numérique ($257 J/m^3$). La valeur de la densité d'énergie dissipée locale (maximale) est d'environ 30 fois plus importante que celle homogénéisée.

Par la suite, l'effet de cette dissipation hétérogène sur l'évolution de la température est étudié. Pour cela, 4 points dans la matrice avec différentes épaisseurs de film à deux positions radiales différentes sont choisis.

4.1 Cas de film mince et film épais

Afin de réaliser une étude à l'échelle locale, deux points dans le film mince et deux points dans le film épais sont choisis (Figure 12). L'état de la contrainte et de la déformation locales au niveau de ces

films est étudié et comparé (Figure 8). Le niveau de déformation homogénéisé est de $133\mu\text{def}$, alors que dans la matrice (et spécialement au niveau du film mince) ce niveau est dépassé. L'hétérogénéité du matériau cause un niveau de déformation plus élevé dans le film mince de matrice. Au cours d'essai et avec l'évolution de la température et diminution du module de la matrice, le niveau de déformation augmente. Cette augmentation est plus remarquable dans les films minces que dans les films épais.

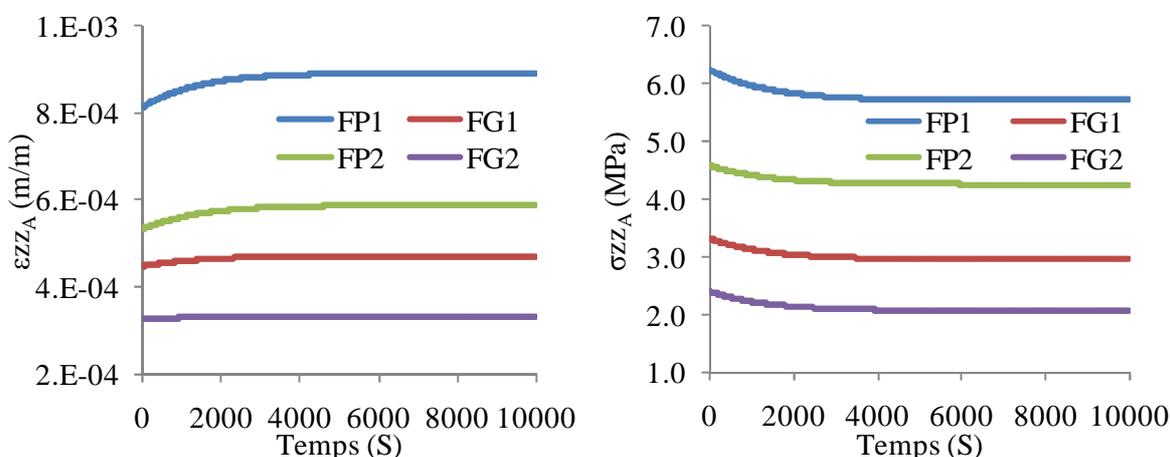


Figure 8. Variation de la contrainte et de la déformation dans les films minces et épais

Le niveau de la contrainte locale est également plus élevé dans les films minces (le niveau de la contrainte homogénéisée est de 1,8 MPa). Au cours de l'essai et avec la diminution de module de la matrice, le niveau de la contrainte dans les films diminue.

La DED dans chaque élément de la matrice est calculée à partir de l'équation (4.1). Le niveau de DED dans les films minces, où le niveau de contrainte et de la déformation est plus important, est plus élevé par rapport aux films épais. Au cours de l'essai, les propriétés mécaniques de la matrice varient en fonction de la température. Ces variations causent la variation de l'état de contrainte et de déformation locales et par conséquent la DED. L'évolution de la DED au niveau des 4 films choisis est étudiée (Figure 9). Cette évolution est plus importante dans les films minces (environ 12%) que dans les films épais (environ 2%).

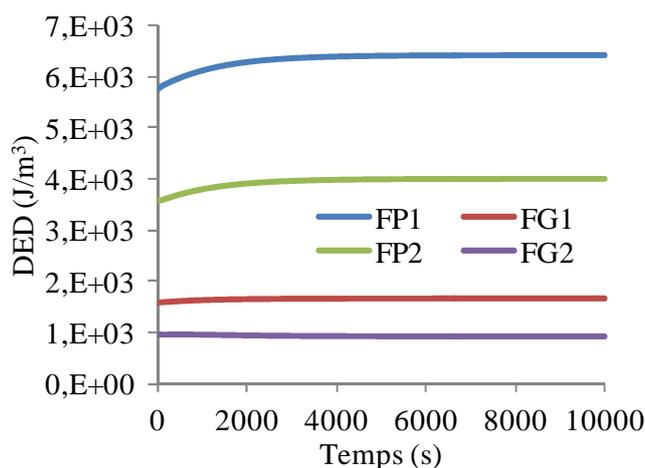


Figure 9. Variation de DED dans les 4 zones en fonction de temps

L'évolution de la température en utilisant la DED locale comme source de chaleur est calculée pour ces films (Figure 10). Malgré une source de chaleur plus élevée au niveau du film mince, l'évolution de la température pour le film mince et épais reste très proche (ce phénomène est étudié plus en

détaille par la suite). Cependant l'évolution de la température pour les films à la position 2 est plus élevée. Les conditions aux limites thermique imposées et le transfert de chaleur par la convection à la surface est à l'origine de cette différence d'évolution de la température entre la position 1 (proche de surface) et la position 2 (proche du centre).

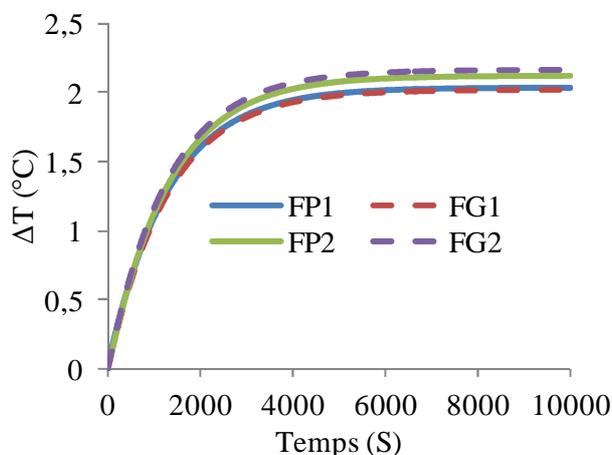


Figure 10. Evolution de la température en fonction de temps dans les films

L'effet de variation de la température locale sur la variation de la norme du module complexe locale et l'angle de phase local de la matrice sont présentés dans la Figure 11. La variation du module et de l'angle de phase est calculée à l'aide de l'équation (3.5) et en fonction de la température au niveau des films. Avec l'évolution de la température le module diminue (environ 17%) et l'angle de phase augmente (environ 12%).

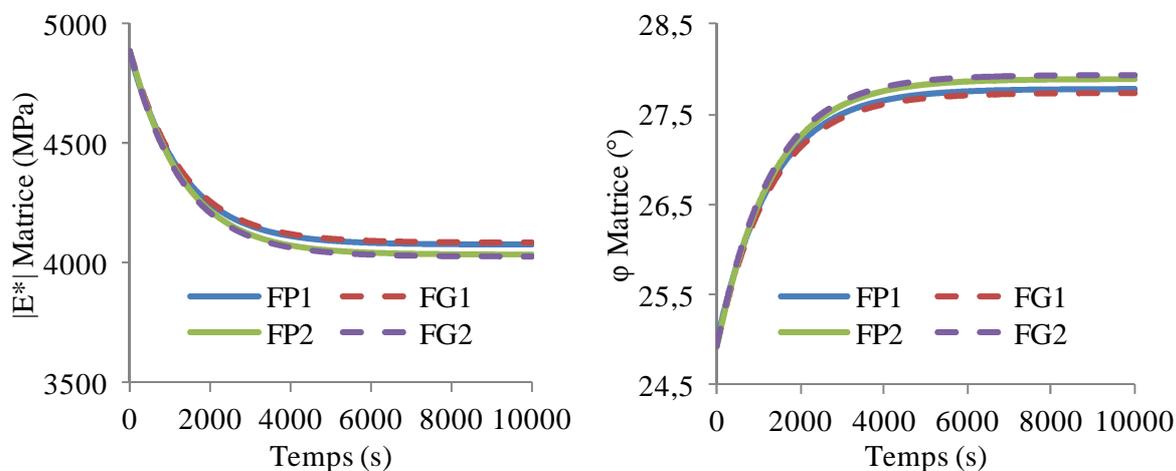


Figure 11. Variation de la norme de module complexe et l'angle de phase dans les 4 films

D'une manière générale, la DED dans les films avec une épaisseur faible est plus élevée. L'effet de cette différence sur l'évolution de la température est étudié pour le film mince et le film épais à la position 1 (Figure 13).

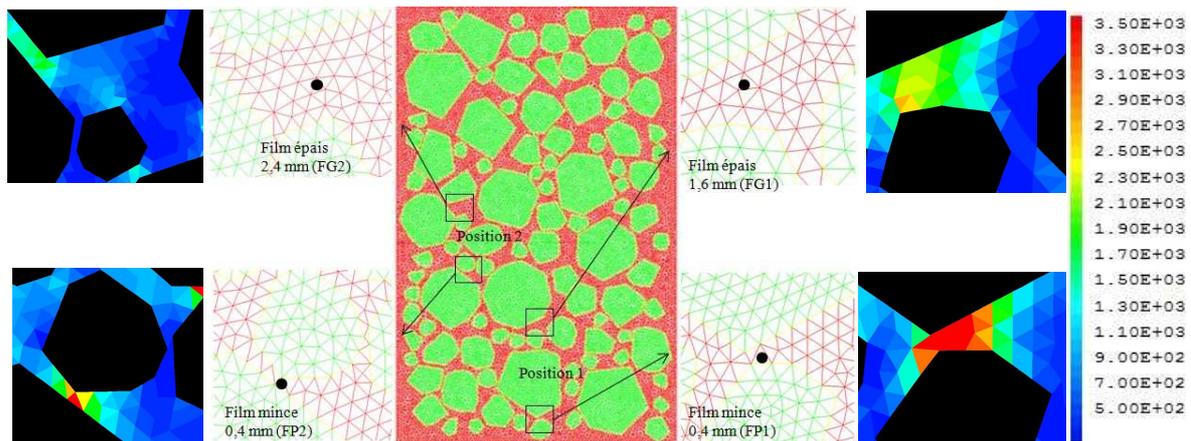


Figure 12. Positions des points d'étude, La quantité de DED par cycle dans les 4 zones à l'instant $t=10s$ (DED en J/m^3)

La température au niveau du film mince, dans le premier pas de calcul ($t=10s$) est plus élevée que la température au niveau de film épais. Après quelques secondes du début de l'essai (environ 100s) et avec le commencement du transfert de chaleur dans le matériau, le point le plus chaud ne se trouve plus forcément au niveau de la dissipation maximale (Figure 13).

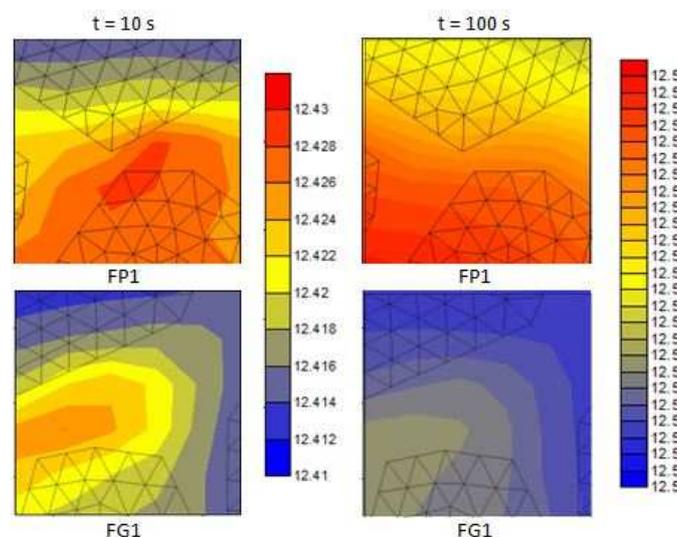


Figure 13. Champ de température ($^{\circ}C$) dans le film mince et le film épais, à $t=10$ et $t=100s$

La conductivité thermique des granulats est plus importante que celle de la matrice, ce qui favorise une diffusion rapide de la chaleur produite dans la matrice.

Au niveau du film épais, les propriétés isolantes de la matrice causent une augmentation de la température. En effet la température dans la matrice est une fonction de la quantité d'énergie dissipée locale, de l'épaisseur de la matrice et de la taille de granulats au voisinage. Des granulats avec une taille plus petite arrivent plus vite à la température de la matrice alors que des granulats avec une taille plus importante mettent plus de temps pour atteindre la température de la matrice (Figure 14).

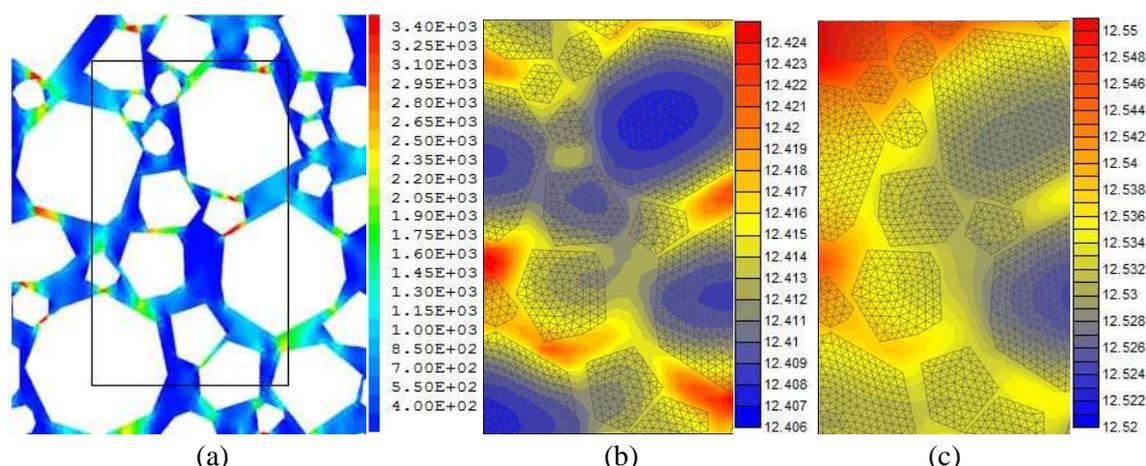


Figure 14. Champ de DED à $t=10s$ (J/m^3) (a), champ de température à $t=10s$ (b), champ de température à $t=100s$ (c)

5 Conclusion

Dans ce travail, les variations du champ de la DED et du champ de la température pendant l'essai de fatigue sont étudiées, par une modélisation hétérogène incrémentale. Les propriétés thermiques des granules et de la matrice sont déterminées à partir de la littérature. Ces propriétés thermiques ont été validées via une modélisation thermique hétérogène et en injectant la DED mesurée expérimentalement par Nguyen [9] en tant que source de chaleur dans la matrice du modèle numérique. Le résultat numérique de l'évolution de la température montre un bon calage avec les résultats expérimentaux.

Par une approche hétérogène, il est montré que les niveaux de déformation et de contrainte locaux dans la matrice sont plus élevés que la valeur moyenne homogénéisée. En utilisant un sable bitumineux 0-2 mm en tant que matrice et des granules 2-10 mm en tant qu'inclusions, les niveaux de déformation et de contrainte locaux maximales dans le film mince (0,4mm d'épaisseur) sont respectivement 8 fois et 4 fois plus élevés que la valeur moyenne homogénéisée. Par conséquent, la quantité de la DED locale est d'environ 30 fois plus élevée que la valeur homogénéisée. L'évolution de la DED locale dans le film mince au cours de l'essai est plus importante (environ 12%) par rapport à celle dans le film épais (environ 2%).

Le champ hétérogène de la DED est injecté dans le calcul thermique afin d'étudier les variations de température dans le modèle. L'évolution de la température (à un endroit donné) dépend de la DED locale, de l'épaisseur de la matrice et de la taille des granules au voisinage. Dans le film mince une source de chaleur importante est produite dans la matrice. Au cours du temps, les granules ayant un coefficient de conductivité élevé récupèrent rapidement par conduction la chaleur produite dans la matrice et la température entre la matrice et granules devient progressivement homogène. Dans un film épais, la quantité de source de chaleur est moins importante. En revanche, les propriétés isolantes de la matrice ne permettent pas un transfert de chaleur rapide vers les granules. En effet, la température dans la matrice est une fonction du rapport entre la quantité de la DED et l'épaisseur de la matrice.

Le temps d'homogénéisation de la température entre la matrice et les granules dépend de la taille des granules, mais d'une façon générale, une homogénéisation de la température peut être observée après 100s. Le temps de variation de la température de l'échantillon est d'environ 5000s (régime transitoire) et au-delà elle reste constante (le régime permanent). L'élévation maximale de la température est d'environ $2^{\circ}C$ au centre et $1,5^{\circ}C$ à la surface. Cette évolution de la température est le résultat de la

quantité d'énergie dissipée ainsi que les conditions aux limites thermique d'essai (convection forcée, puissance de l'enceinte, ...). Cependant, dans le cas de matériau viscoélastique-thermosensible, comme l'enrobé bitumineux, une augmentation de température de quelques degrés peut générer une diminution de module importante (environ 10% ici).

Ce travail est une première étape afin d'étudier les phénomènes existants, lors d'un essai de fatigue. Le champ temporel de la température nous permettra d'étudier les variations du module local de la matrice dues à l'auto-échauffement et l'influence de celles-ci sur le module du mélange final.

Références

- [1] F. Fakhari Tehrani, J. Absi, F. Allou, and C. Petit, Heterogeneous numerical modeling of asphalt concrete through use of a biphasic approach: Porous matrix/inclusions, *Comput. Mater. Sci* 69 (2013) 186–196.
- [2] L. T. Mo, M. Huurman, S. P. Wu, and A. A. A. Molenaar, Investigation into stress states in porous asphalt concrete on the basis of FE-modelling, *Finite Elem. Anal. Des* 43 (2007) 333–343.
- [3] L. T. Mo, M. Huurman, S. P. Wu, and A. A. A. Molenaar, 2D and 3D meso-scale finite element models for ravelling analysis of porous asphalt concrete, *Finite Elem. Anal. Des* 44 (2008) 186–196.
- [4] D. BODIN, H. SOENEN, and C. DE LA ROCHE, Temperature effects in binder fatigue and healing tests, in 3rd Eurasphalt Eurobitume Congress, Book II (2004), Paper 136.
- [5] E. Chailleux, "Contribution à l'étude des enrobés routiers: des bitumes pétroliers aux liants alternatifs, Rapport HDR, IFSTTAR, 2014.
- [6] J. Van Rompu, H. Di Benedetto, M. Buannic, T. Gallet, and C. Ruot, New fatigue test on bituminous binders: Experimental results and modeling, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 197–208.
- [7] J. Van Rompu, H. Di Benedetto, G. Gauthier, and T. Gallet, New fatigue test on bituminous binders and mastics using an annular shear rheometer prototype and waves propagation, in *Advanced testing and characterisation of bituminous materials* (2009) 69–79.
- [8] C. De La Roche, *Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux*, Thèse, Ecole Centrale Paris, 1996.
- [9] Q. T. NGUYEN, *Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux sous sollicitations cycliques dans les domaines linéaire et non-linéaire*, Thèse, ENTPE de LYON, 2011.
- [10] NF P 98-086, Dimensionnement des structures de chaussées routières. 2011.
- [11] A. C. Collop, G. R. McDowell, and Y. W. Lee, Modelling dilation in an idealised asphalt mixture using discrete element modelling, *Granul. Matter* 8 (2006) 175–184.
- [12] F. Fakhari Tehrani, J. Absi, F. Allou, and C. Petit, Investigation into the impact of the use of 2D/3D digital models on the numerical calculation of the bituminous composites' complex modulus, *Comput. Mater. Sci* 79 (2013) 377–389.
- [13] Y. Liu and Z. You, Visualization and Simulation of Asphalt Concrete with Randomly Generated Three-Dimensional Models, *J. Comput. Civ. Eng.* 23 (2009) 340–347.
- [14] R. Bandyopadhyaya, A. Das, and S. Basu, Numerical simulation of mechanical behaviour of asphalt mix, *Constr. Build. Mater* 22, no. 6 (2008) 1051–1058.
- [15] T. You, R. K. A. Al-Rub, E. A. Masad, E. Kassem, and D. N. Little, Three-Dimensional Microstructural Modeling Framework for Dense-Graded Asphalt Concrete Using a Coupled Viscoelastic, Viscoplastic, and Viscodamage Model, *J. Mater. Civ. Eng* 26, no. 4 (2014) 607–621.
- [16] S. C. Somé, V. Gaudefroy, and D. Delaunay, A new laboratory method to evaluate the influence of aggregate temperature on the binder-aggregate bonding: first results, *Mater. Struct* 47, no. 6 (2013) 963–976.

- [17] F. Olard, COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES ENROBES BITUMINEUX A BASSE TEMPERATURE : Relation entre les propriétés du liant et de l'enrobés, Thèse, ENTPE de Lyon, 2003.
- [18] H. Di Benedetto, Q. T. Nguyen, and C. Sauzéat, Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures, *Road Mater. Pavement Des.* 12, no. 1 (2011) 129–158.
- [19] S. C. Some, V. Gaudefroy, and D. Delaunay, Méthode thermique d'évaluation de la qualité du collage bitume sur granulat par mesure de la résistance thermique de contact dans les conditions de fabrication d'enrobé bitumineux, *Proceedings of 20^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Besançon, France, 2011, pp. 1–6.
- [20] <http://www-cast3m.cea.fr/>