
Etude de l'évolution de la température locale des matériaux bitumineux due à la dissipation énergétique, par modélisation hétérogène biphasée

E. RIAHI¹, F. ALLOU¹, F. DUBOIS¹, L. ULMET¹, J. ABSI², C. PETIT¹

¹ Université de Limoges, GEMH, EA 3178, F-19300 Egletons, France

² 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 de 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.

MOTS-CLÉS : Enrobé bitumineux, Modélisation hétérogène, Energie dissipée, Echauffement, Fatigue, Viscoélasticité.

KEY WORDS: Asphalt concrete, Heterogeneous simulation, Dissipated energy, Heating, Fatigue, Viscoelasticity.

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. (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. (iii) Enfin, les vides avec un relativement faible pourcentage.

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 locale plus élevé au niveau du film mince dans la matrice lors d'un chargement mécanique [FAK 13b, MO 07, MO 08]. La Densité d'Energie Dissipée (DED) résultant du comportement viscoélastique dans la matrice est une fonction du niveau de déformation et de contrainte [1]. Par conséquent, dans le film mince où ces valeurs sont plus élevées, la quantité d'énergie dissipée sera plus importante. L'énergie dissipée se prend la forme d'une source de chaleur qui augmente la température du matériau.

$$DED = \int_{t_1}^{t_2} \sigma \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad [1]$$

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 [BOD 04, CHA 14], le mastic [VAN 12, 09] et le Béton Bitumineux Semi Grenu (BBSG) [DEL 96, NGU 11].

Etant donné que le résultat de l'essai de fatigue est utilisé dans la méthode française de dimensionnement de chaussée [NOR 11], 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 à 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 termes 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.

$$\lambda \operatorname{div}(\operatorname{grad}(T)) + \operatorname{grad}(\lambda) \cdot \operatorname{grad}(T) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad [2]$$

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 [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 principales de génération d'inclusions ont été utilisées : une génération de formes simplifiées [COL 06], une génération aléatoire [FAK 13a, 13b, LIU 09] ou les techniques basées sur l'imagerie [BAN 08, YOU 14]. Ce travail de modélisation repose sur une génération aléatoire de distribution des granulats à l'aide du logiciel MOA [FAK 13b] 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 aux éléments finis Cast3M [CAS 13].

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 [NGU 11]. Un déplacement sinusoïdal générant une amplitude de déformation de 133 $\mu\text{m}/\text{m}$ est imposé sur un échantillon cylindrique. Les équations [3] et [4] montrent l'expression de la déformation et la réponse en contrainte pour un matériau viscoélastique.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_A \sin(\omega t) \quad [3]$$

$$\sigma(t) = \sigma_A \sin(\omega t + \varphi) \quad [4]$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} \quad [5]$$

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.

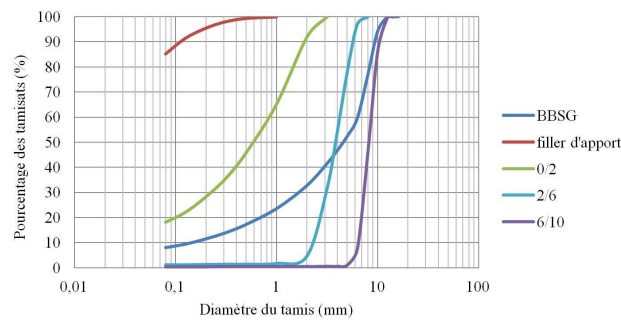


Figure 1. Courbes granulométriques, formulation Béton Bitumineux Semi-Grenu

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 l'hypothèse axisymétrique. Il est à noter que cette hypothèse 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).

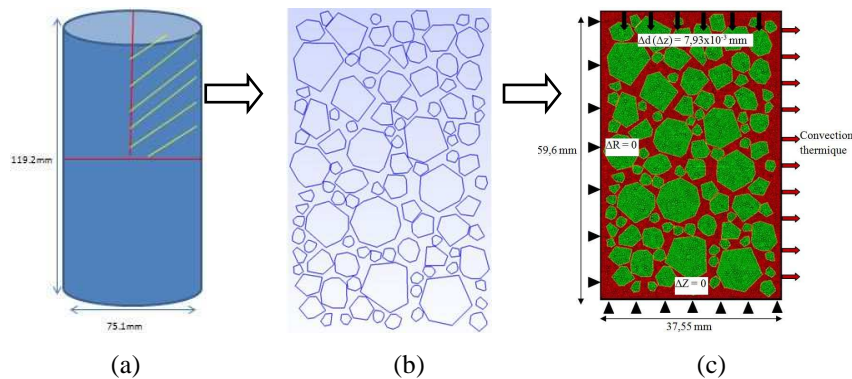


Figure 2. Echantillon (a), Modèle aléatoire généré par MOA (b), et le modèle numérique importé dans Cast3M (c)

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 $133 \mu\text{m/m}$ 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 $32,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ [NGU 11].

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 [FAK 13b]. Les propriétés thermiques des granulats de type diorite « la Noubleau » sont pris de la littérature [SOM 13] 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 [DEL 96]. Le sable bitumineux choisi 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 [OLA 03] 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 :

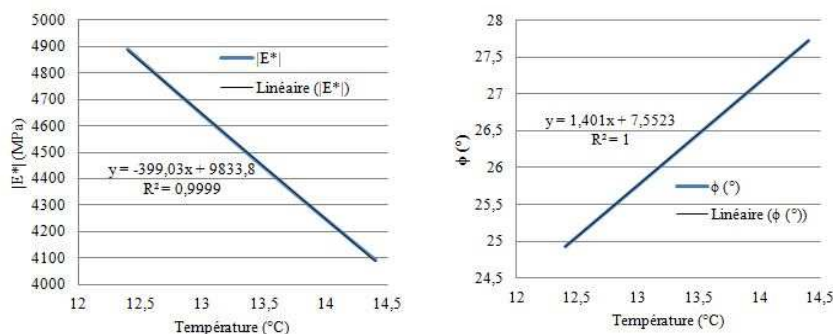


Figure 3. Variation de la norme de module complexe et de l'angle de phase en fonction de la température (Sable bitumineux)

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 [DIB 11]. 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 6, 7 et 8] 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 [SOM 11] et présentées dans le Tableau 2.

$$Cp_{matrice} = (1 - m_{Sable(0-2)}) \cdot Cp_{bitume} + m_{Sable(0-2)} \cdot Cp_{Sable(0-2)} \quad [6]$$

$$\rho_{matrice} = (1 - V_{Sable(0-2)}) \cdot \rho_{bitume} + V_{Sable(0-2)} \cdot \rho_{Sable(0-2)} \quad [7]$$

$$\lambda_{matrice} = \lambda_{bitume} \frac{2\lambda_{bitume} + \lambda_{Sable(0-2)} - 2V_{Sable(0-2)}(\lambda_{bitume} - \lambda_{Sable(0-2)})}{2\lambda_{bitume} + \lambda_{Sable(0-2)} + V_{Sable(0-2)}(\lambda_{bitume} - \lambda_{Sable(0-2)})} \quad [8]$$

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 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 [NGY 11]. 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 [9].

$$DED_{matrice} = \frac{DED_{totale}}{\%V_{matrice}} \quad [9]$$

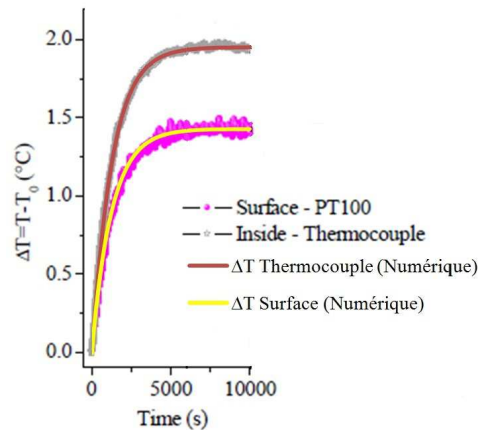


Figure 4. Evolution de la température mesurée et calculée par la modélisation thermique hétérogène

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 [10]. 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.

$$\begin{aligned} |E^*|(T) &= -399,03.T + 9833,8 \\ \varphi(T) &= 1,401.T + 7,55 \end{aligned} \quad [10]$$

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 d'équation [11]. Ensuite le champ d'énergie dissipée est rentré 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).

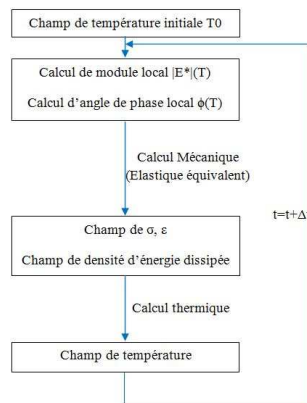


Figure 5. Algorithme de calcul

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 $t=10\text{s}$.

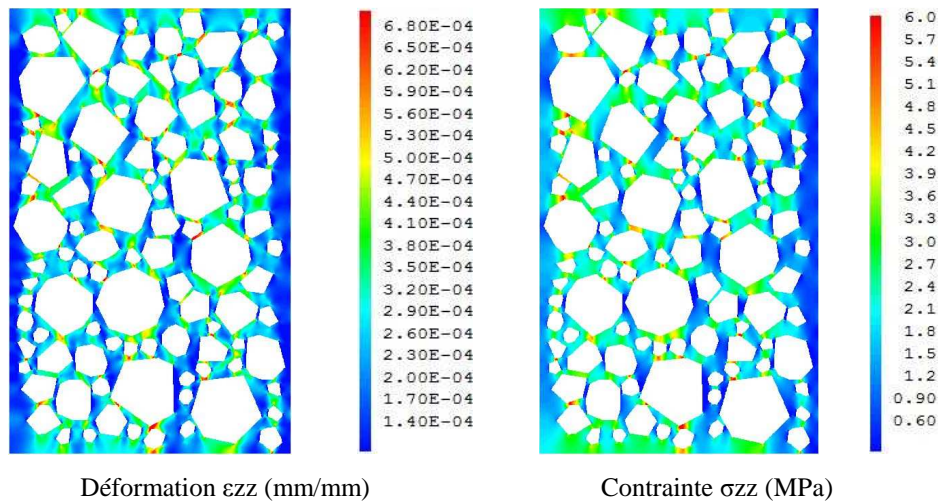


Figure 6. Champ de la contrainte et de la déformation dans la matrice (à $t=10s$)

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 [11]. La cartographie de densité d'énergie dissipée à l'instant $t=10s$ est présentée dans la figure 7.

$$DED_{Cycle} = \pi \cdot \sigma_A \cdot \varepsilon_A \cdot \sin\varphi \quad [11]$$

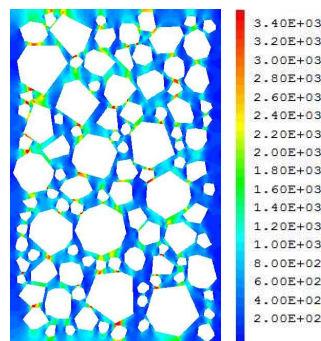


Figure 7. Champ de densité d'énergie dissipée dans la matrice à l'instant $t=10s$ (J/m^3).

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 8). La densité de l'énergie dissipée à ces endroits a été comparée. D'une manière générale, la DED aux endroits avec une épaisseur faible est plus élevée (Figure 9). L'effet de cette différence de la DED sur l'évolution de la température est étudié pour le film mince et le film épais à la position 1.

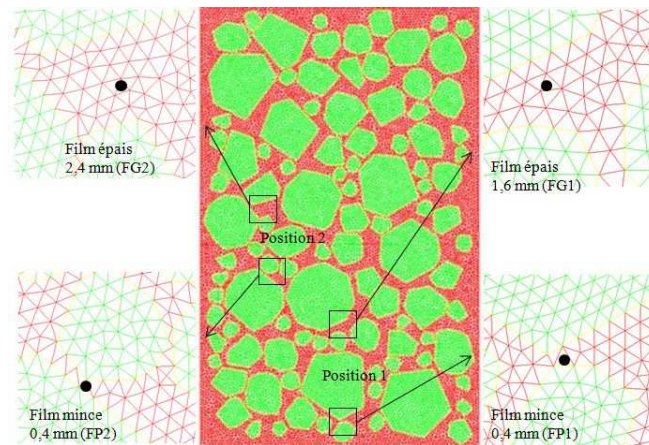


Figure 8. Positions des points d'étude

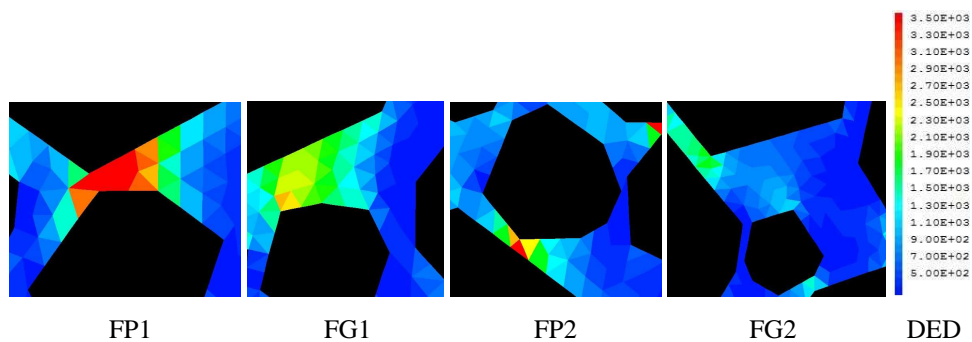


Figure 9. La quantité de DED par cycle dans les 4 zones à l'instant $t=10s$ (DED en J/m^3)

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 10).

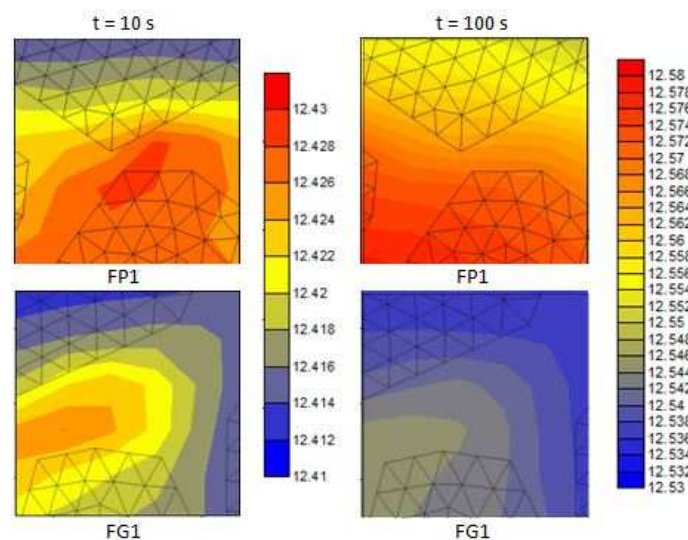


Figure 10. Champ de température ($^{\circ}C$) dans le film mince et le film épais, à $t=10$ et $t=100s$

Le coefficient de conductivité des granules est plus important que celui de la matrice, ce qui cause 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 granulates avec une taille plus petite arrivent plus vite à la température de la matrice alors que des granulates avec une taille plus importante mettent plus de temps pour atteindre la température de la matrice (Figure 11).

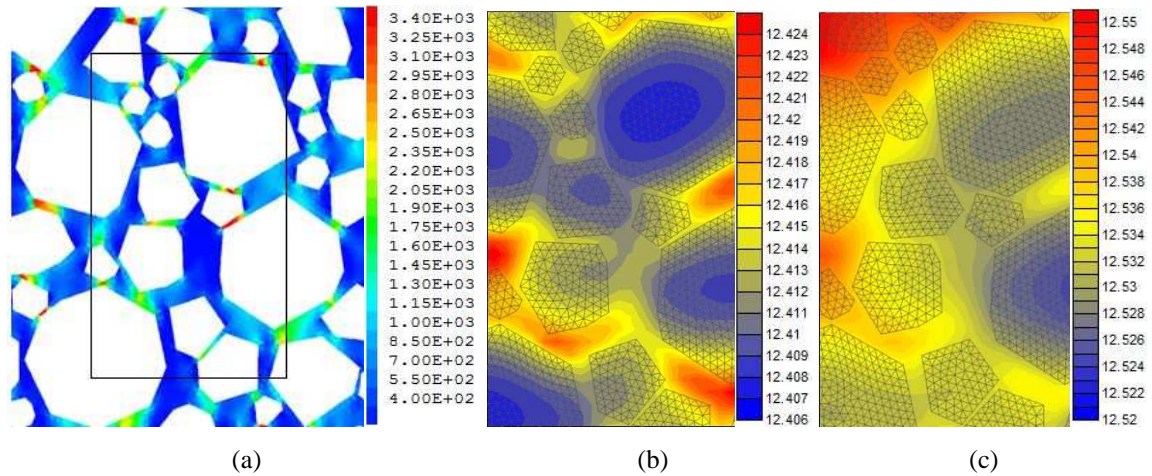


Figure 11. Champ de DED à $t=10s$ (J/m^3) (a), champ de température à $t=10s$ (b), champ de température à $t=100s$ (c)

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 locale et par conséquent la DED. L'évolution de la DED au niveau des 4 films choisis est étudiée (Figure 12). Elle est plus importante dans les films minces (environ 12%) que dans les films épais (environ 2%).

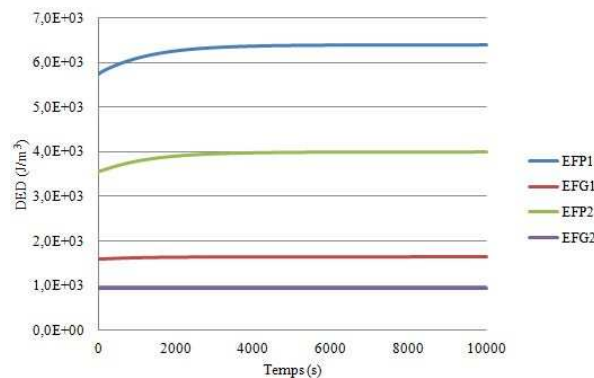


Figure 12. Variation de DED dans les 4 zones en fonction de temps

4.2. Etude sur une ligne

Dans cette partie la variation de la température sur une ligne au cours du temps et en fonction de la DED sont étudiées. Une ligne horizontale (nommée LCH) à mi-hauteur du modèle numérique est choisie. Comme nous l'avons précédemment observé, l'évolution de la DED au cours du temps, dépend de sa valeur initiale. Sur la ligne étudiée, l'évolution maximale de DED (8%) correspond au point avec une dissipation initiale élevée ($2,7 \times 10^3 J/m^3$) (Figure 13).

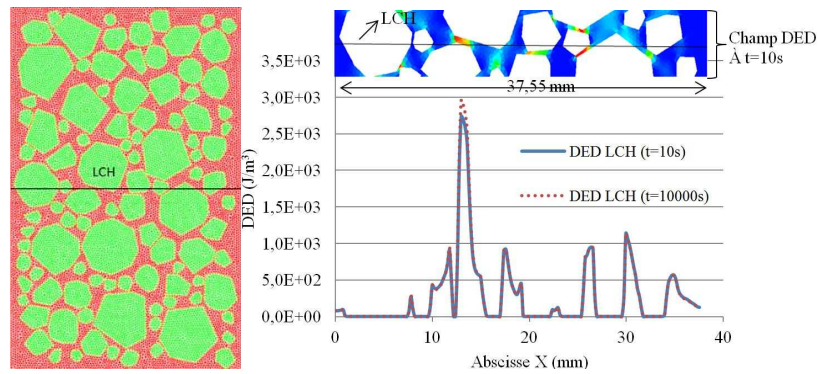


Figure 13. Variation de DED sur la ligne LCH, à l'instant $t=10s$ et $t=10000s$

Au début de l'essai ($t=10s$) l'évolution de la température sur la ligne a la même tendance que la DED. La température maximale se trouve au niveau de la matrice avec une dissipation énergétique plus élevée. Après quelques secondes, et avec le transfert de chaleur vers les granules, la température sur la ligne commence à s'homogénéiser. Après environ 100s du début de l'essai, la différence de température entre la matrice et les granules n'est plus visible. Une température décroissante du centre vers la surface peut être observée et expliquée par le transfert de chaleur par convection vers l'extérieur.

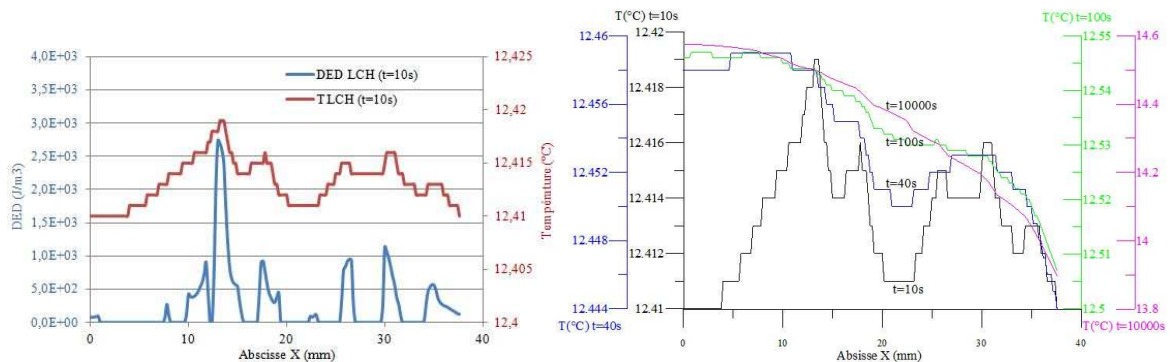


Figure 14. Variation de la DED et la température sur la ligne LCH à $t=10s$, $t=40s$, $t=100s$ et $t=10000s$

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 [NGU 11] 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 granulats. 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 granulats dépend de la taille des granulats, 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°C au centre et 1,5°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 quelque 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.

6. Bibliographie

- [BAN 08] BANDYOPADHYAYA R., DAS A., BASU S., « Numerical Simulation of Mechanical Behaviour of Asphalt Mix », *Construction and Building Materials*, vol. 22, n° 6, 2008, p. 1051-1058.
- [BOD 04] BODIN D., SOENEN H., DE LA ROCHE C., « Temperature Effects in Binder Fatigue and Healing Tests », *Actes des 3rd Eurasphalt Eurobitume Congress*, Vienne, 12-14 mai 2004, Book II, Paper 136.
- [CHA 14] CHAILLEUX E., Contribution À L'étude Des Enrobés Routiers: Des Bitumes Pétroliers Aux Liants Alternatifs, Rapport de HDR, IFSTTAR, 2014.
- [COL 06] COLLOP A., MCDOWELL G., LEE Y., « Modelling Dilation in an Idealised Asphalt Mixture Using Discrete Element Modelling », *Granular Matter*, vol. 8, n° 3-4, 2006, p. 175-184.
- [DEL 96] DE LA ROCHE C., Module de Rigidité et Comportement En Fatigue Des Enrobés Bitumineux, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1996.
- [DIB 11] DI BENEDETO H., NGUYEN Q.T., SAUZEAT C., « Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures », *Road Materials and Pavement Design*, vol. 12, n° 1, 2011, p. 129-158.
- [FAK 13a] FAKHARI TEHRANI F., ABSI J., ALLOU F., PETIT C., « Investigation into the Impact of the Use of 2D/3D Digital Models on the Numerical Calculation of the Bituminous Composites' Complex Modulus », *Computational Materials Science*, vol. 79, 2013, p. 377-389.
- [FAK 13b] FAKHARI TEHRANI F., ABSI J., ALLOU F., PETIT C., « Heterogeneous Numerical Modeling of Asphalt Concrete through Use of a Biphasic Approach: Porous Matrix/inclusions », *Computational Materials Science*, vol. 69, 2013, p. 186-196.
- [LIU 09] LIU Y., YOU Z., « Visualization and Simulation of Asphalt Concrete with Randomly Generated Three-Dimensional Models », *Computing in Civil Engineering*, vol. 23, n° 6, 2009, p. 340-347.
- [MO 07] MO L.T., HUURMAN M., WU S.P., MOLENAAR A., « Investigation into Stress States in Porous Asphalt Concrete on the Basis of FE-Modelling », *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 43, n° 4, 2007, p. 333-343.
- [MO 08] MO L.T., HUURMAN M., WU S.P., MOLENAAR A., « 2D and 3D meso-scale finite element models for ravelling analysis of porous asphalt concrete », *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 44, n° 4, 2008, p. 186-196.
- [NGU 11] NGUYEN Q.T., Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux sous sollicitations cycliques dans les domaines linéaire et non-linéaire, Thèse de doctorat, ENTPE de Lyon, 2011.
- [NOR 11] Norme NFP 98-086, Dimensionnement des structures de chaussées routières, 2011.

- [OLA 03] OLARD F., COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES ENROBES BITUMINEUX A BASSE TEMPERATURE : Relation entre les propriétés du liant et de l'enrobes, Thèse de doctorat, ENTPE de Lyon, 2003.
- [SOM 11] SOME C., GAUDEFROY V., DELAUNAY D., « 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 », *Actes des 20ème Congrès Français de Mécanique*, Besançon, 29-2 septembre 2011.
- [SOM 13] SOME C., GAUDEFROY V., DELAUNAY D., « A new laboratory method to evaluate the influence of aggregate temperature on the binder-aggregate bonding: first results », *Materials and Structures*, vol. 47, n° 6, 2013, p. 963-976.
- [VAN 09] VAN ROMPU J., DI BENEDETTO J., GAUTHIER G., GALLET T., « New fatigue test on bituminous binders and mastics using an annular shear rheometer prototype and waves propagation », *Advanced testing and characterisation of bituminous materials*, Greece, 2009, p. 69-79.
- [VAN 12] VAN ROMPU J., DI BENEDETTO J., BUANNIC M., GALLET T., RUOT C., « New fatigue test on bituminous binders: Experimental results and modeling », *Construction and Building Materials*, vol. 37, 2012, p. 197-208.
- [YOU 14] YOU T., AL-RUB R., MASSAD A., KASSEM E., LITTLE D., « Three-Dimensional Microstructural Modeling Framework for Dense-Graded Asphalt Concrete Using a Coupled Viscoelastic, Viscoplastic, and Viscodamage Model », *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, n° 4, 2014, p. 607-621.
- [CAS 13] <http://www-cast3m.cea.fr/>