

Etude de la variation du module complexe des enrobés bitumineux sous chargement cyclique

Ebrahim RIAHI¹, Fatima ALLOU², Ramon BOTELLA³, Laurent ULMET⁴, Fateh TEHRANI⁵, Joseph ABSI⁶, Frédéric DUBOIS⁷, Christophe PETIT⁸, Félix E PEREZ-JIMENEZ⁹

¹ Université de Limoges, GEMH, EA 3178, 19300 Egletons, France. ebrahim.riahi@unilim.fr

² Université de Limoges, GEMH, EA 3178, 19300 Egletons, France. fatima.allou@unilim.fr

³ Technical University of Catalonia, Department of Transport and Regional Planning, C/Jordi, Girona 1-3, B1 215, 08034 Barcelona, Spain. ramon.botella@upc.edu

⁴ Université de Limoges, GEMH, EA 3178, 19300 Egletons, France. laurent.ulmet@unilim.fr

⁵ Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), 75141 Paris, France. fateh.fakhari-tehrani@unilim.fr

⁶ Université de Limoges, SPCTS, 87068 Limoges, France. joseph.absi@unilim.fr

⁷ Université de Limoges, GEMH, EA 3178, 19300 Egletons, France. frederic.dubois@unilim.fr

⁸ Université de Limoges, GEMH, EA 3178, 19300 Egletons, France. christophe.petit@unilim.fr

⁹ Technical University of Catalonia, Department of Transport and Regional Planning, C/Jordi, Girona 1-3, B1 215, 08034 Barcelona, Spain.

RÉSUMÉ. Ce travail s'intéresse à l'étude des phénomènes secondaires tels que l'auto-échauffement et la thixotropie lors de l'essai de fatigue en traction-compression sur les matériaux bitumineux. Une modélisation thermomécanique hétérogène est utilisée pour quantifier la variation du module complexe du béton bitumineux due à l'auto-échauffement. Les résultats de la modélisation aux différentes températures montrent que l'auto-échauffement peut expliquer une partie de la variation réversible du module complexe lors de la première phase de l'essai de fatigue. L'existence d'autres phénomènes réversibles tels que la thixotropie ou l'auto-réparation peuvent être à l'origine de cet écart. Étant donné que le comportement du bitume est à l'origine de ces phénomènes, la même étude a été réalisée sur le bitume pur. Les résultats obtenus montrent que, contrairement au béton bitumineux, l'échauffement peut expliquer la variation du module complexe avec une bonne précision. Il semble que les variations du module complexe du béton bitumineux sont plus liées à l'hétérogénéité du matériau.

ABSTRACT. In this paper we study the biasing effects such as self-heating and thixotropy during tension-compression fatigue test on bituminous materials. A heterogeneous thermomechanical simulation is employed to quantify complex modulus variation because of self-heating. The results show that self-heating can explain a part of complex modulus decrease during the first phase of fatigue test. Existence of other reversible phenomena such as self-healing and thixotropy can be the origin of the other unexplained part. As the bituminous binder is the origin of such phenomena, the same study is performed on bituminous binder. The results on bitumen show that contrary to asphalt concert, self-heating can explain the bitumen complex modulus variation with a good precision. It seems that the asphalt concert complex modulus variation is mostly linked to material heterogeneity.

MOTS-CLÉS : auto-échauffement, béton bitumineux, énergie dissipée, fatigue, bitume, thixotropie.

KEY WORDS: self-heating, asphalt concrete, dissipated energy, fatigue, bitumen, thixotropy.

1. Introduction

Le dimensionnement et l'estimation de la durée de vie des chaussées bitumineuses sont basés sur les résultats d'essai de fatigue. Lors d'un essai de fatigue sur les matériaux bitumineux, les effets secondaires (tels que l'échauffement et la thixotropie) influencent les résultats d'essai en causant une diminution rapide du module complexe au début d'essai [DIB 97; GAU 10; TAP 15]. Ces variations réversibles, qui ne sont pas liées à la fatigue, doivent être quantifiées et séparées des résultats d'essai de fatigue. L'origine de l'auto-échauffement est l'énergie dissipée par le comportement viscoélastique du liant bitumineux sous un chargement mécanique. Différents travaux sur les matériaux bitumineux (liant bitumineux pur, mastic, béton bitumineux) ont confirmé l'existence de ce phénomène en mesurant la température de l'échantillon lors d'un essai de fatigue [BOD 04; VAN 12; NGU 12]. Cette augmentation de température modifie les propriétés mécaniques du bitume qui est un matériau thermosensible et cause la diminution du module complexe.

L'augmentation de la température due à l'auto-échauffement peut être quantifiée à l'aide d'une simulation numérique en considérant l'énergie dissipée en tant que source de chaleur [RIT 00; BAN 12; PIC 12]. Dans notre étude, une modélisation thermomécanique hétérogène [RIA 16] est utilisée pour quantifier l'évolution de la température et la variation du module complexe des bétons bitumineux. En utilisant ce modèle, les propriétés mécaniques et thermiques des granulats et de la matrice bitumineuse sont modélisées séparément. La rigidité du liant bitumineux est plus faible par rapport à celle des agrégats et par conséquent, sous un chargement mécanique, le niveau des déformations locales dans les films minces de la matrice bitumineuse (entre deux agrégats) sera plus élevé [BAH 99; FAK 13a]. L'énergie dissipée est elle-même fonction du niveau de déformation et sera plus élevée dans ces zones. Elle est une source de chaleur hétérogène dans la matrice. Par conséquent, le champ de température sera influencé par l'hétérogénéité de la source de chaleur et par la différence entre les propriétés thermiques de chaque phase (Granulats /Matrice).

Dans le présent papier, deux essais de fatigue sur un béton bitumineux à différentes températures sont modélisés en utilisant le modèle thermomécanique hétérogène développé [RIA 16]. L'effet de la variation de la température sur la quantité d'énergie dissipée, l'évolution de la température et la variation du module sont étudiées. La comparaison entre les résultats de calcul et expérimentaux montre que l'échauffement ne peut pas expliquer la totalité de la diminution du module. Selon la bibliographie, le reste de la diminution du module est expliqué par le comportement thixotrope du bitume. Pour vérifier si le bitume seul se comporte de la même façon, un essai de fatigue en traction-compression sur un liant bitumineux à différentes températures est réalisé. Les résultats numériques sont en concordance avec les résultats expérimentaux. Ces résultats montrent que la diminution du module est due seulement à l'échauffement, auquel cas la thixotropie du bitume en traction-compression uniaxiale n'existerait pas.

2. Matériaux et essais

2.1. Béton bitumineux (BBSG)

L'essai étudié est un essai cyclique en traction-compression en mode déformation contrôlée réalisé sur un béton bitumineux de type BBSG (Béton Bitumineux Semi Grenu) [NGU 11]. Le BBSG est composé de granulats de type diorite avec une formule granulaire continue de 0-10 mm et une teneur en liant de 6 ppc. L'échantillon cylindrique de BBSG a un rayon de 37,55 mm et une hauteur de 119,2 mm. Il est équipé de deux capteurs de température : un placé à l'intérieur (à 11,05 mm du centre) et l'autre à la surface afin de mesurer les variations de température de l'éprouvette lors de l'essai. Deux essais sont modélisés et comparés aux résultats expérimentaux. Deux températures d'essais avec deux niveaux de déformation ont été choisies : 12,4°C à 108 µdef et 21,4°C à 96 µdef. La fréquence de chargement est maintenue constante à 10Hz.

2.2. Bitume

Le liant bitumineux utilisé pour l'essai est un bitume pur de grade 50/70. Les essais cycliques de traction-compression à déformation contrôlée par palier (EBADE, acronyme espagnole) [BOT 12; PER 12] sont réalisés au laboratoire de l'Université Technique Catalane (Espagne). Ces essais sont réalisés à différentes températures afin de pouvoir étudier l'effet de la température sur l'échauffement et le module complexe. L'éprouvette est un échantillon cylindrique avec un rayon de 10 mm et une hauteur de 39,5 mm (Figure 1(b)). Les essais sont réalisés à 3 températures différentes (-5, 3 et 10°C) avec une fréquence de 10Hz. L'essai consiste à soumettre l'éprouvette à différents niveaux de déformations cycliques successifs à amplitudes constantes (700 et 1400 µdef) par palier de 5000 cycles (500 seconds). L'identification expérimentale des modules complexes est comparée aux résultats issus de la modélisation.

3. Modélisation numérique

3.1. Conditions aux limites et maillage

Un maillage hétérogène, séparant les granulats de la matrice bitumineuse est utilisé pour modéliser le BBSG. Dans le modèle numérique, les granulats ayant un diamètre entre 2 à 10 mm sont modélisés en respectant la courbe granulométrique du mélange et les granulats de diamètre inférieur à 2 mm sont considérés dans la matrice bitumineuse afin de réaliser un sable bitumineux (l'indice de vide du matériau n'est pas pris en compte dans le modèle numérique). Les simulations numériques sont réalisées avec l'hypothèse d'axisymétrie. Il est à noter que cette hypothèse n'est pas à 100% réaliste étant donné que les granulats représentent une forme toroïdale, cependant elle a été choisie comme une première approche. Par symétrie et afin de diminuer le temps de calcul, seulement la moitié de l'éprouvette de BBSG (en hauteur) a été modélisée. L'échantillon de bitume pur est modélisé en tant qu'un matériau homogène. Un déplacement vertical est imposé sur le côté supérieur du modèle. La valeur de déplacement 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 $32,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ pour le BBSG [NGU 12]. Pour le liant bitumineux, ce coefficient est choisi égal à $30 \text{ W/m}^2\text{°C}$ pour les faces en contact avec l'air. Le transfert de chaleur pour les faces en contact avec la machine est modélisé avec un coefficient de convection de $50 \text{ W/m}^2\text{°C}$ [BOD 04]. Le maillage ainsi que les conditions aux limites thermiques et mécaniques pour les deux matériaux sont présentés dans la Figure 1.

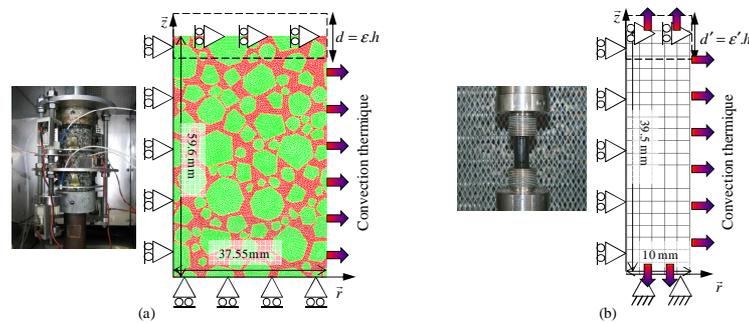


Figure 1. (a) Maillage hétérogène et conditions aux limites de BBSG, (b) Maillage et conditions aux limites du liant bitumineux.

3.2. Propriétés mécaniques et thermiques

3.2.1. BBSG

Le BBSG est composé de granulats 2-10mm et un sable bitumineux en tant que matrice bitumineuse. Les propriétés thermiques des granulats et du bitume sont prises de la littérature [SOM 13]. Les propriétés thermiques de la matrice bitumineuse, qui est constituée de bitume et de granulats 0-2 mm, sont définies par la loi de mélange [RIA 16]. 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]. Pour modéliser le comportement viscoélastique de la matrice, les propriétés du sable bitumineux sont choisies dans la littérature [DEL 96]. La Figure 2 montre les variations de la norme du module complexe, de l'angle de phase et du module de perte (la partie imaginaire du module complexe, E2) en fonction de la température.

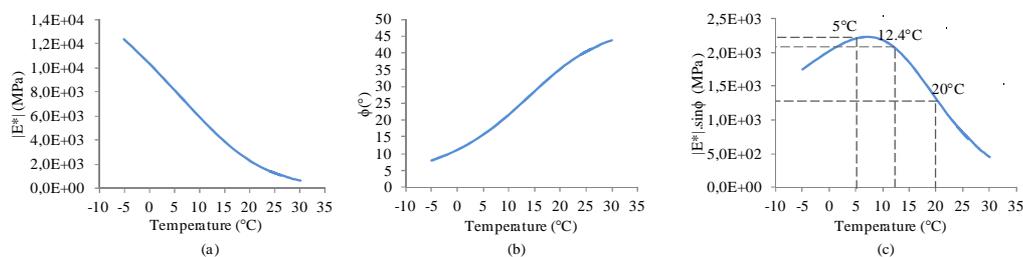


Figure 2. Variation des propriétés mécanique de la matrice en fonction de la température : (a) la norme du module complexe, (b) l'angle de phase, (c) le module de perte.

Comme il est montré dans la Figure 2(c), le module de perte augmente avec la température jusqu'à une certaine température, il décroît ensuite pour les températures plus élevées.

L'expression de la Densité d'Energie Dissipée par cycle (DEDc) lors d'un chargement cyclique en traction compression est donnée par l'équation [1].

$$DED_C = \pi \cdot \epsilon_0^2 \cdot |E^*| \cdot \sin(\phi) \quad [1]$$

Où ϵ_0 est l'amplitude de déformation, $|E^*|$ est la norme du module complexe et ϕ est l'angle de phase. Pour un niveau de déformation donné, l'énergie dissipée peut augmenter ou diminuer en fonction de la température à laquelle l'essai est réalisé. Cet aspect est étudié par la suite pour différentes températures d'essai (5, 12,4 et 20°C).

3.2.2. Liant bitumineux

Pour modéliser le comportement du liant bitumineux, les propriétés d'un bitume 50/70 sont choisies de la littérature [DEL 05]. La Figure 3 montre les variations de la norme du module complexe, de l'angle de phase et du module de perte en fonction de la température pour ce bitume. On remarque les mêmes variations pour les propriétés du bitume que pour celle du béton bitumineux. On remarque aussi que la température de transition vitreuse (température pour laquelle la partie imaginaire du module complexe est maximale) pour le bitume est autour de -10°C alors que pour le sable bitumineux elle est entre 5 et 10°C.

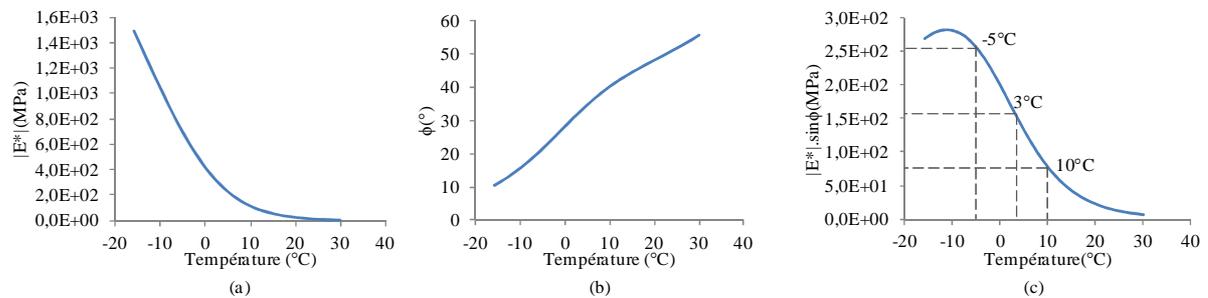


Figure 3. Variation des propriétés mécanique du liant bitumineux en fonction de la température : (a) la norme de module complexe, (b) l'angle de phase, (c) le module de perte.

4. Résultats

4.1. BBSG

Dans cette partie, les résultats obtenus par la modélisation hétérogène du BBSG à différentes températures sont présentés. La même amplitude de déformation globale (133 μ def) est imposée pour les trois températures (5 °C, 12,4°C et 20°C). Dans le modèle numérique, la matrice bitumineuse (sable bitumineux) avec un comportement viscoélastique est la seule source de dissipation. La DEDc pour le BBSG, dans le modèle total (matrice + granulats 2-10mm), est calculée par l'intégration de la DEDc locale sur le volume de la matrice et est divisée par le volume total de l'échantillon. La Figure 4 représente les variations de la DEDc totale et de la température à 11 mm du centre de l'échantillon, pour les 3 températures.

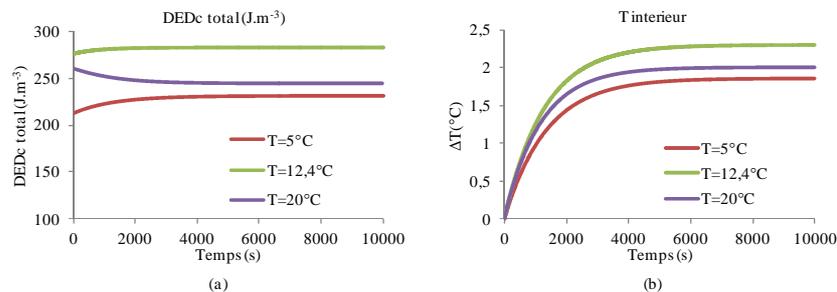


Figure 4. Résultats de modélisation de BBSG pour différentes températures (a) l'énergie dissipée par cycle, (b) variation de la température à l'intérieur de l'échantillon.

La Figure 4 montre que pour le même niveau de déformation globale, la DEDc totale est maximale à 12,4°C et minimale à 5°C. En revanche, il est montré dans la Figure 2 que le module de perte est maximum pour 5°C et minimum pour 20°C. Cette différence peut être expliquée par l'effet de l'hétérogénéité du matériau. Dans le modèle hétérogène, le niveau de déformation globale est maintenu constant pour tous les essais aux différentes températures. Cependant, le niveau de la déformation locale dans la matrice varie en fonction du contraste de rigidité matrice/granulat. Par conséquent, dans l'équation [1], le niveau de ϵ_0 dans la matrice est différent pour chaque point.

La Figure 5 représente le niveau de déformation locale, le module de perte et la DEDc locale pour un point dans la matrice. Il peut être observé que le module de perte est maximum pour 5°C et minimum pour 20°C. En revanche, le niveau de la déformation locale est maximum pour 20°C et minimum pour 5°C. Par conséquent, la DEDc locale, qui est une fonction de la déformation et du module de perte local, est maximale à 12°C et minimale à 5°C.

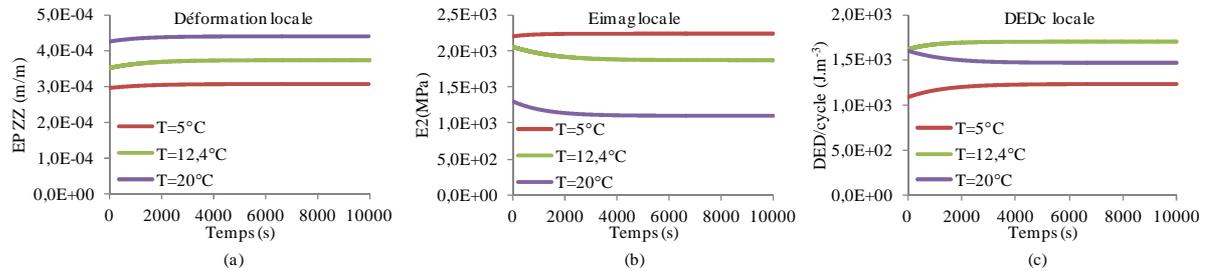


Figure 5. Etude sur un point dans la matrice bitumineuse du modèle BBSG pour différentes températures (a) déformation locale, (b) module de perte local, (c) l'énergie dissipée par cycle locale

Pour étudier l'effet de la température sur la variation du module de BBSG sous le chargement cyclique, deux essais à 12,4°C et 21,4°C sont modélisés et les résultats de modélisation sont comparés avec les résultats expérimentaux obtenus par Nguyen [NGU 11]. L'amplitude de déformation est de 108 μ def pour l'essai réalisé à 12,4°C et de 96 μ def pour l'essai réalisé à 21,4°C. Les résultats expérimentaux ainsi que la modélisation sont présentés dans la Figure 6.

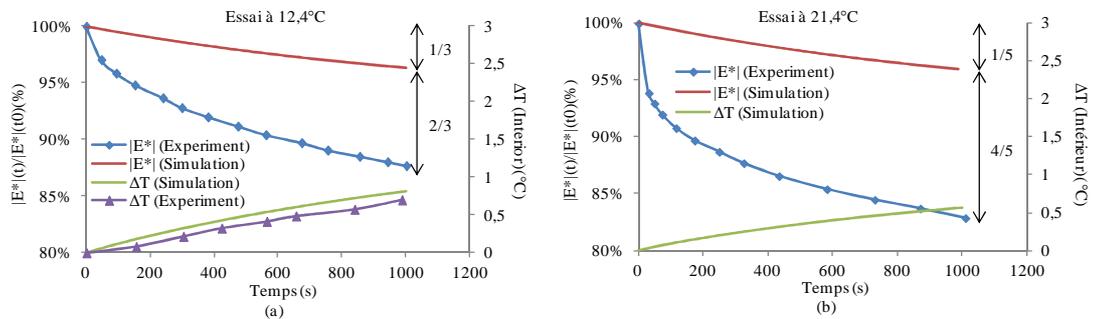


Figure 6. Comparaison des variations de module et la température BBSG : simulation/expérimental (a) l'essai à 12,4°C, (b) l'essai à 21,4°C.

En comparant les résultats de la modélisation numérique avec les résultats expérimentaux, il est observé que l'auto-échauffement ne peut pas expliquer la totalité de la diminution du module. Pour l'essai réalisé à 12,4°C l'auto-échauffement peut expliquer seulement le tiers de la totalité de la diminution du module complexe du BBSG mesuré lors de l'essai expérimental. Dans le cas de l'essai réalisé à 21,4°C, l'échauffement peut expliquer seulement le cinquième de la diminution totale du module. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats expérimentaux [NGU 11] et confirment l'existence d'autres phénomènes qui causent la diminution du module. Dans la littérature, cette différence est expliquée par le comportement thixotrope du liant bitumineux [NGU 11].

Étant donné que l'origine de tel comportement est attribuée au liant bitumineux, des essais de traction-compression sur le bitume pur à différentes températures ont été modélisés. La partie de la variation du module liée à l'échauffement est quantifiée par la modélisation et les résultats de simulation sont comparés avec les résultats expérimentaux afin de vérifier l'existence de ce phénomène dans le bitume.

4.2. Liant bitumineux

Les essais sur le liant bitumineux sont réalisés à trois températures (-5°C, 3°C et 10°C). L'amplitude de déformation est constante pour les premiers 5000 cycles (0,07%), ensuite elle augmente à un niveau 2 fois plus élevé (0,14%). Les variations du module sont suivies durant l'essai pour une durée de 1000 secondes. Les essais sont modélisés et les variations du module complexe dues à l'auto-échauffement sont quantifiées. La Figure 7 montre la variation du module complexe mesurée lors de l'essai et celle obtenue par le calcul en considérant seulement l'effet de l'auto-échauffement. Les variations de la température estimées par le calcul au centre et à la surface du modèle numérique sont également présentées dans cette figure.

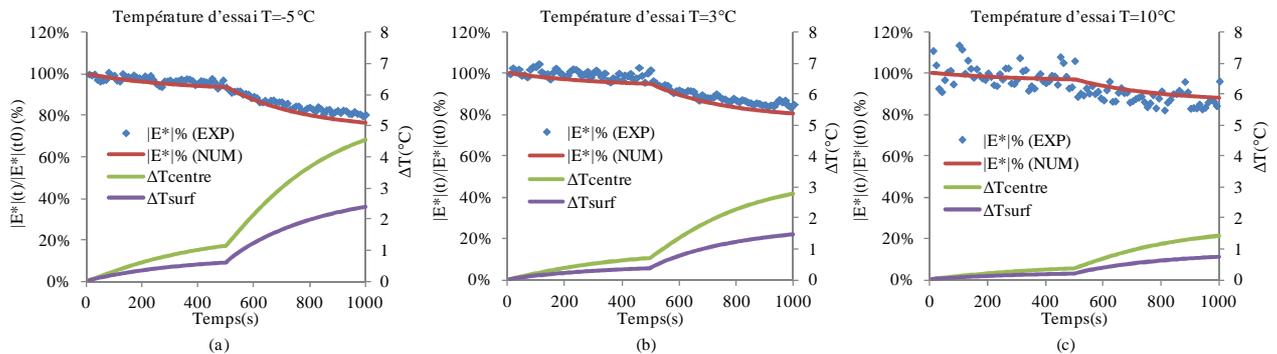


Figure 7. Comparaison entre les résultats de simulations et expérimentaux des variations du module du liant bitumineux (a) l'essai à -5°C, (b) l'essai à 3°C, (c) l'essai à 10°C.

L'effet de la température de l'essai sur l'auto-échauffement est visible dans la Figure 7. Comme l'amplitude de déformation est la même pour les trois essais (dans chaque partie de chargement), le paramètre ϵ_0 dans l'équation [1] sera le même. Donc en comparant les trois essais, la quantité de l'énergie dissipée varie en fonction de la variation du module de perte. Il est montré dans la Figure 3(c), que parmi les trois températures testées, le module de perte a une valeur maximale à -5°C, et une valeur minimale à 10°C. Les variations de la température présentées dans la Figure 7 confirment cet effet. L'évolution de la température est maximale pour l'essai à -5°C et minimale pour l'essai à 10°C.

La variation du module complexe estimée par le modèle numérique est en concordance avec le module mesuré. Finalement pour ces essais, l'auto-échauffement peut expliquer la totalité de la diminution du module complexe sous chargement cyclique en traction-compression avec une bonne précision. Une comparaison entre la DEDc quantifiée lors de l'essai et celle estimée par le modèle numérique est présentée dans la Figure 8.

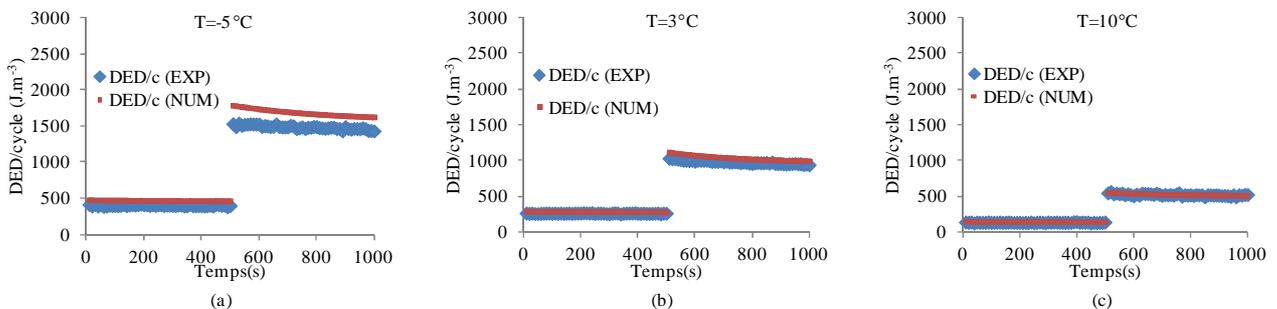


Figure 8. Comparaison entre les résultats de simulations et expérimentaux de la DEDc du liant bitumineux (a) l'essai à -5°C, (b) l'essai à 3°C, (c) l'essai à 10°C.

La Figure 8 montre l'effet des variations de l'amplitude de déformation sur l'énergie dissipée par un saut lors du changement de l'amplitude ϵ_0 (500^{ème} secondes). L'effet de la température de l'essai sur l'énergie dissipée est également visible sur ces graphes avec une diminution de l'énergie dissipée avec l'augmentation de la température.

5. Conclusion

Des essais cycliques de traction-compression en mode déformation contrôlée sont modélisés afin d'étudier l'effet de la température sur la variation du module complexe des matériaux bitumineux. En utilisant le modèle thermomécanique développé dans ce travail, la diminution du module liée à l'auto-échauffement est quantifiée.

Les résultats de modélisation à différentes températures avec une amplitude globale de déformation constante montrent que dans un modèle hétérogène 2D avec une matrice viscoélastique l'énergie dissipée est fonction de la partie imaginaire du module complexe E_2 et du niveau de déformation local qui augmente avec la température.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques du BBSG, montre que la diminution du module complexe estimée par le modèle numérique en considérant seulement l'auto-échauffement sous-estime la vraie variation du module mesurée expérimentalement. Il est également observé que cet écart augmente avec l'augmentation de la température de l'essai. Dans la littérature cet écart est expliqué par la présence d'autres phénomènes tels que la thixotropie.

Par ailleurs, pour essayer de mieux comprendre ces phénomènes, des essais de traction-compression à différentes températures ont été réalisés sur bitume pur, afin de comprendre le comportement du bitume sous des niveaux de chargement similaires mais très largement simplifiés car uniaxiaux. Les phénomènes observés sur le bitume sont différents du BBSG. On constate pour le bitume que seul l'échauffement explique la totalité de la diminution du module complexe avec une bonne précision. D'autres essais sont en cours afin de confirmer ces constatations. Ces différences sont-elles dues au caractère triaxial des sollicitations de la matrice dans le BBSG ? Sous sollicitation uniaxiale la thixotropie ne serait-elle pas activée ? Ou bien encore l'association bitume-granulat ne serait-elle pas responsable ? Les analyses physicochimiques montrent une transition bitume-granulat mais ne confirme pas encore cette différence ?

6. Références

- [BAN 12] BANIC M., STAMENKOVIC D., MILTENOVIC V., MILOSEVIC M., MILTENOVIC A., DJEKIC P., "Prediction of Heat Generation in Rubber or Rubber-Metal Springs." *Thermal Science*, Vol. 16(suppl. 2), 2012, p.527–539.
- [BAH 99] BAHIA H., ZHAI H., BONNETTI K., KOSE S., "Non-Linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders." *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 68, 1999, p.1–34.
- [BOD 04] BODIN D., SOENEN H., DE LA ROCHE C., "Temperature Effects in Binder Fatigue and Healing Tests." P. Book II Paper 136 in *3rd Eurasphalt Eurobitume Congress*, Vienna, Austria, 12-14 May 2004.
- [BOT 12] BOTELLA R., PEREZ-JIMENEZ F.E., MIRO R., "Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders", *Construction and Building Materials*, Vol. 36, 2012, p.906–912.
- [DEL 96] DE LA ROCHE C., Module de Rigidité et Comportement En Fatigue Des Enrobés Bitumineux, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1996.
- [DEL 05] DELAPORTE B., DI BENEDETTO H., SAUZEAT C., CHAVEROT P., "Linear Viscoelastic Properties of Mastics : Results from a New Annular Shearing Rheometer , and Modelling ." *Int. Conf. on Bearing Capacity of Roads Railways and Airfields*. Norway, 2005.
- [DIB 97] DI BENEDETTO H., ASHAYER SOLTANI M., CHAVEROT P., "Fatigue Damage for Bituminous Mixtures: A Pertinent Approach." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 65, 1997, p. 142–158.
- [FAK 13a] 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.
- [FAK 13b] 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.

- [GAU 10] GAUTHIER G., BODIN D., CHAILLEUX E., GALLET T., "Non Linearity in Bituminous Materials during Cyclic Tests." *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 11, 2010, p. 379–410.
- [NGU 11] NGUYEN Q., Comportement Thermomécanique Des Enrobés Bitumineux Sous Sollicitations Cycliques Dans Les Domaines Linéaire et Non-Linéaire, Thèse de doctorat, ENTPE de LYON, 2011.
- [NGU 12] NGUYEN Q., DI BENEDETTO H., SAUZEAT C., "Determination of Thermal Properties of Asphalt Mixtures as Another Output from Cyclic Tension-Compression Test." *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 13(1), 2012, p. 85–103.
- [PER 12] PEREZ-JIMENEZ F.E., BOTELLA R., MIRO R., "Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests". *Construction and Building Materials*, Vol. 31, 2012, p.212–219.
- [PIC 12] PICHON P., BOUTAOUS M., MECHIN F., SAUTEREAU H., "Measurement and Numerical Simulation of the Self Heating of Cross-Linked Segmented Polyurethanes under Cyclic Loading." *European Polymer Journal*, Vol. 48(4), 2012, p. 684–695.
- [RIA 16] RIAHI E., ALLOU F., ULMET L., ABSI J., PETIT C., "Numerical Simulation of Local Temperature Evolution in Bituminous Materials under Cyclic Loading." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016.
- [RIT 00] RITTEL D., RABIN Y., "An Investigation of the Heat Generated during Cyclic Loading of Two Glassy Polymers. Part II: Thermal Analysis." *Mechanics of Materials*, Vol. 32(3), 2000, p. 149–159.
- [SOM 13] SOME S., 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(6), 2013, p. 963–976.
- [TAP 15] TAPSOBA N., SAUZEAT C., DI BENEDETTO H., BAAJ H., ECH M., "Three-Dimensional Analysis of Fatigue Tests on Bituminous Mixtures." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 38(6), 2015, p. 730–741.
- [VAN 12] VAN ROMPU J., DI BENEDETTO H., 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.