
Phénomènes réversibles lors de chargement cyclique des liants bitumineux

Ebrahim RIAHI¹, Fatima ALLOU², Ramon BOTELLA³, Joseph ABSI⁴, Frédéric DUBOIS⁵, Christophe PETIT⁶

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, SPCTS, 87068 Limoges, France. joseph.absi@unilim.fr

⁵ Université de Limoges, GEMH, EA 3178, 19300 Egletons, France. frederic.dubois@unilim.fr

⁶ Université de Limoges, GEMH, EA 3178, 19300 Egletons, France. christophe.petit@unilim.fr

RÉSUMÉ. Ce travail a pour objectif d'évaluer et quantifier les phénomènes réversibles qui se produisent lors de chargement cyclique uni-axial en traction-compression sur des matériaux bitumineux. La littérature indique que les variations réversibles du module complexe sous le chargement cyclique, sont liées à l'auto-échauffement du matériau viscoélastique provenant de sa dissipation énergétique, ainsi que son comportement thixotrope. Un essai cyclique en traction-compression avec balayage en déformation a été employé pour capturer la variation de rigidité des liants bitumineux en fonction de l'amplitude de déformation appliquée. Cet essai permet de quantifier la diminution et la récupération de module pour chaque phase de chargement. En intégrant un thermocouple à l'intérieur de l'échantillon lors de sa fabrication, l'évolution de la température interne du liant bitumineux pendant l'essai a été mesurée. Les résultats montrent que pour les conditions d'essai employé ici, la température peut augmenter jusqu'à 10 °C à l'intérieure de l'échantillon pendant les essais cycliques. Cette augmentation de température peut justifier en moyenne 88% de la diminution de rigidité capturée pendant l'essai à différentes amplitudes de déformation.

ABSTRACT. The aim of this work is to evaluate and quantify the reversible phenomena that occur during uni-axial tensile-compressive loading on bituminous materials. The literature indicates that the reversible variations of the complex modulus under the cyclic loading are related to the self-heating of the viscoelastic material resulting from its energy dissipation, as well as its thixotropic behavior. A cyclic tensile-compression test in strain sweep mode was used to capture the stiffness variation of the bituminous binders as a function of the applied strain amplitude. This test allows to quantify the decrease and the recovery of complex modulus for each loading phase. By integrating a thermocouple inside the sample during its fabrication, the internal temperature evolution of the bituminous binder during the test was measured. The results show that for the test conditions used here, the temperature can increase up to 10 °C inside the sample during the cyclical tests. This increase in temperature can justify on average 88% of the decrease in rigidity captured during the test at different strain amplitudes.

MOTS-CLÉS : auto-échauffement, thermoviscoélasticité, essai fatigue, énergie dissipée, liant bitumineux.

KEY WORDS: self-heating, thermoviscoelasticity, fatigue test, dissipated energy, bituminous binder.

1. Introduction

Le comportement en fatigue des matériaux bitumineux est un paramètre important pour déterminer la durée de vie des chaussées bitumineuses. Le comportement en fatigue de tel matériau, dépend de plusieurs propriétés du mélange, dont l'une des plus importantes est la propriété du liant bitumineux utilisée pour la fabrication du mélange. Pour cette raison, plusieurs chercheurs ont développé différentes méthodes pour caractériser le comportement en fatigue des liants bitumineux sous chargement cyclique [LUN 04, VAN 12].

Cependant, les matériaux bitumineux présentent un comportement complexe lorsqu'ils sont exposés à des charges cycliques, ce qui conduit à des interprétations différentes des résultats de ces types de tests. L'évolution de la rigidité des matériaux bitumineux lors des essais cycliques peut être séparée en trois phases. La phase I correspond au stade initial dans lequel on observe une perte de rigidité rapide et non linéaire. L'explication de ce phénomène est normalement attribuée aux effets de l'auto-échauffement et de la thixotropie [DIB 04, MAN 15]. La phase II correspond à une diminution linéaire de la rigidité qui est associée à l'endommagement irréversible produits par la répétition de chargement. La phase III correspond à une perte de rigidité rapide, considérée comme l'étape de défaillance de l'échantillon. Lors de cette phase des microfissures formées pendant la phase II créent des macros-fissures qui provoquent la défaillance complète du matériau.

Afin de séparer l'effet de chaque phénomène sur la variation du module complexe, Di Benedetto et al [DIB 11] ont mesuré l'augmentation de la température interne d'un échantillon de béton bitumineux lors d'essais cycliques. A l'aide de mesures de température et en connaissant la thermo-sensibilité du matériau, la quantité de diminution de module liée à l'échauffement peut être déterminée. La partie réversible de diminution peut être séparé en deux phénomènes principaux : l'auto-échauffement et la thixotropie, comme il est présenté dans la Figure 1.

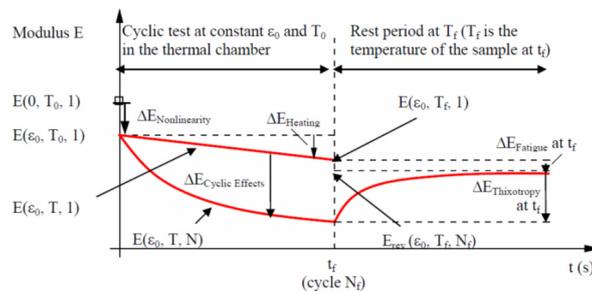


Figure 1. Séparation des différents phénomènes lors d'essais cycliques proposés par Di Benedetto et al. [DIB 11].

Ce travail présente les résultats obtenus lors d'un test cyclique réalisé afin d'analyser l'effet de la thixotropie et de l'auto-échauffement dans les liants bitumineux. La procédure d'essai consiste à appliquer plusieurs phases de chargement à différentes amplitudes de déformation, suivie par une phase de repos (chargement à faible amplitude) afin de pouvoir suivre la diminution et la récupération du module pour chaque niveau de déformation. En intégrant un thermocouple à l'intérieur de l'échantillon lors de sa fabrication, l'évolution de la température interne du liant bitumineux a été mesurée pendant l'essai. En connaissant la relation entre la température et le module du liant, la part de l'auto-échauffement en diminution réversible du module de liant peut être déterminée.

2. Matériau et l'essai

L'essai est réalisé sur un bitume pur de grade 35/50 avec un point de ramollissement de 53 °C. L'échantillon cylindrique a un diamètre de 20 mm et une hauteur de 40 mm. L'échantillon est équipé d'un thermocouple à l'intérieur et au centre et 1 thermocouple sur la surface à mi-hauteur.

L'essai cyclique en traction-compression est réalisé en mode déformation contrôlée avec une fréquence de 10Hz dans une enceinte thermique contrôlée à 10,5 °C. La procédure d'essai consiste à appliquer une amplitude de déformation initiale de 650 $\mu\text{m/m}$ pendant 5000 cycles pour obtenir une valeur initiale de référence pour le module complexe. Ensuite, l'amplitude de la déformation a été doublée (1300 $\mu\text{m/m}$), pendant 15000 cycles, puis retournée à 650 micromètres/m après 15000 cycles. Dans l'étape suivante, l'amplitude de déformation a été triplée (1950 $\mu\text{m/m}$) pour la même quantité de cycles, pour revenir ensuite à l'amplitude de déformation initiale. Ce processus a été répété jusqu'à ce que l'amplitude de la déformation appliquée soit suffisamment élevée pour arriver à la rupture. La durée de chaque étape (15000 cycles) a été choisie pour arriver à une stabilisation de la température

et en tenant compte des résultats de simulation numérique par le modèle thermoviscoélastique développé par Riahi et al. [RIA 16].

Afin de connaître la thermo-sensibilité du liant et la relation entre le module complexe et la température les résultats d'essais du module complexe sur le même liant sont utilisés. Ces essais sont réalisés à trois températures différentes : 1,8, 10,5 et 19,7 °C. Pour chaque température, l'essai est réalisé avec une fréquence de 0,1, 1, 5, 10, 15, 20, 25 et 30 Hz.

3. Résultats

Les résultats d'essai de module complexe à 10 Hz à différentes températures sont utilisés pour modéliser la thermo-sensibilité du liant. Les variations du module complexe en fonction de la température sont approximé en utilisant un polynôme de second degré pour une plage de température de 0 à 20 °C, présenté par l'équation [1].

$$|E^*|(MPa) = 0,9017.T^2 - 47,417.T + 706,09 \quad [1]$$

La température à l'intérieur de l'échantillon varie d'une valeur maximum au centre et diminue jusqu'à une valeur minimum à la surface due au transfert de chaleur par convection avec l'aire ambiante. En prenant hypothèse d'un cylindre infinie, la variation de température en fonction du rayon peut être présentée par l'équation [2] :

$$T(r) = \frac{Q}{4.\lambda} .(R^2 - r^2) + T(R) \quad [2]$$

Où Q est la source de chaleur interne (énergie dissipée), λ est la conductivité thermique, R est le rayon de l'échantillon et $T(r)$ est la température à une distance r du centre de cylindre.

En connaissant la fonction de variation de la température à l'intérieur de l'échantillon et la température au centre et à la surface mesurée par les thermocouples, une température moyenne de l'échantillon peut être calculée. En considérant la température moyenne de l'échantillon et en connaissant la relation entre la température et le module complexe (équation [1]), la variation du module due à l'auto-échauffement peut être quantifiée.

La figure 2 représente une comparaison entre la variation du module complexe observée lors d'essai avec celle calculée à l'aide des mesures de température et l'équation [1].

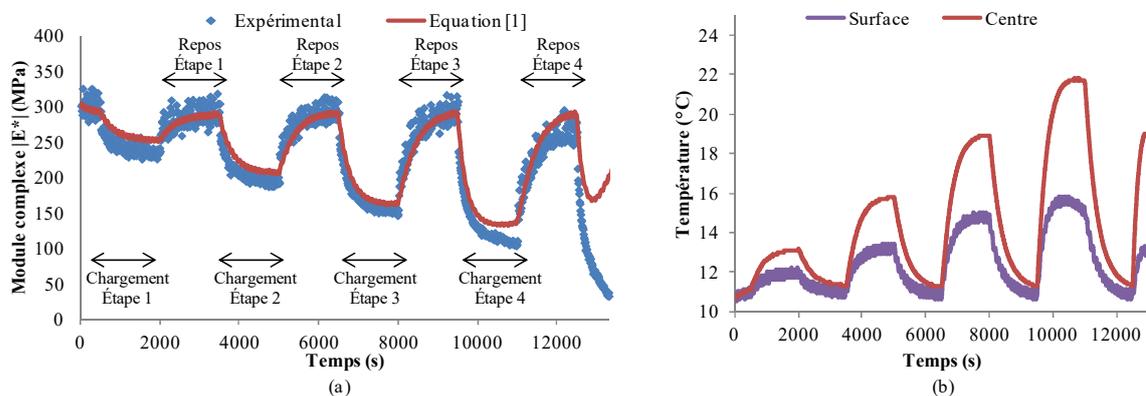


Figure 2. (a) : Comparaison de variation du module complexe : expérimental et la partie liée à l'échauffement; (b) : Evolution de la température mesurée lors d'essai

Pour chaque phase de chargement, la courbe expérimentale de variation de module complexe montre une diminution rapide du module au début qui se stabilise dans le temps. Le taux de cette diminution est directement liée à l'amplitude de déformation appliquée dans chaque étape, autant l'amplitude est plus élevée la diminution du module est plus grande. Dans chaque phase de repos (sauf l'étape 4) la perte de module est récupérée complètement et le liant arrive à son module initial. Lors de la phase 4 de chargement, le matériau est endommagé et il n'arrive pas à son module initial. Lors de la 5ème phase de chargement l'échantillon arrive à la rupture.

La courbe rouge représente la partie de variation de module liée à l'auto-échauffement. La comparaison entre les deux courbes montre que pour le liant bitumineux, l'auto-échauffement peut expliquer avec une bonne précision la perte et la récupération du module lors de phases de chargement et de repos. Lors de la 4ème phase de chargement, le décalage entre les deux courbes traduit la présence d'endommagement qui n'est pas pris en compte dans l'équation [1].

4. Conclusion

Le travail réalisé sur le liant bitumineux montre que l'auto-échauffement peut expliquer les variations réversibles du module complexe avec une bonne précision. L'augmentation de la température lors d'essais cycliques est normalement négligée, alors que le résultat de cet essai montre que la température peut augmenter jusqu'à 10 °C au centre du matériau. En mesurant l'évolution de la température et en reliant cette évolution à la variation de module complexe, la présence de l'endommagement peut être observée.

La majorité des travaux sur la variation de module complexe des enrobés bitumineux montre qu'environ un tiers de variation réversible du module peut être expliquée par l'échauffement et le reste est due à d'autres phénomènes réversibles, tel que la thixotropie. En revanche, l'essai réalisé sur le liant pur ne confirme pas tel résultat.

Bibliographie

- [DIB 04] DI BENEDETTO H., DE LA ROCHE C., BAAJ H., PRONK A., LUNDSTRÖM R. « FATIGUE OF BITUMINOUS MIXTURES », *MATERIALS AND STRUCTURES/MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS*, vol. 37, n° 267, 2004, p. 202-216.
- [DIB 11] DI BENEDETTO H., NGUYEN Q., SAUZÉAT 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.
- [LUN 04] LUNDSTROM R., ISACSSON U. « An investigation of the applicability of Schapery's work potential model for characterization of asphalt fatigue behavior », *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, vol. 73, 2004, p. 657-695.
- [MAN 15] MANGIAFICO S., SAUZÉAT C., DI BENEDETTO H., POUGET S., OLARD F., PLANQUE L. « Quantification of biasing effects during fatigue tests on asphalt mixes: Non-linearity, self-heating and thixotropy », *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, vol. 84, 2015, p. 143-180.
- [RIA 16] RIAHI, E., ALLOU, F., ULMET, L., ABSI, J., DUBOIS, F., PETIT, C. « Numerical simulation of local temperature evolution in bituminous materials under cyclic loading », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 20, 2016, n° 10, p. 1214-1232.
- [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.