
Dépendance thermique des performances en fatigue des enrobés bitumineux

Ktari Rahma¹, Hornych Pierre², Ferhat Hammoum³, Paul Marsac⁴, Mai lan Nguyen⁵, Jean Michel Piau⁶

¹IFSTTAR, MAST, MIT, F-44344 Bouguenais, France, rahma.ktari@ifsttar.fr

²IFSTTAR, MAST, LAMES, F-44344 Bouguenais, France, pierre.hornych@ifsttar.fr

³IFSTTAR, MAST, MIT, F-44344 Bouguenais, France, ferhat.hammoum@ifsttar.fr

⁴IFSTTAR, MAST, MIT, F-44344 Bouguenais, France, paul.marsac@ifsttar.fr

⁵IFSTTAR, MAST, LAMES, F-44344 Bouguenais, France, mai-lan.nguyen@ifsttar.fr

⁶IFSTTAR, MAST, LAMES, F-44344 Bouguenais, France, jean-michel.piau@ifsttar.fr

RÉSUMÉ. Les niveaux de sollicitation et d'endommagement de la chaussée fluctuent en cours d'année. Le comportement en déformation et à la fatigue des matériaux bitumineux varient avec les cycles de la température. Cet article vise à traiter brièvement les résultats tirés de la bibliographie afin de déduire une loi d'évolution des performances en fatigue en fonction de la température. Une étude expérimentale sur une Grave Bitume de classe 3 (GB3), à des différentes températures a été réalisée avec des essais de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales, en déformation imposée. Dans cette étude, la durée de vie en fatigue est évaluée par trois approches différentes : la première basée sur le critère classique de rupture (50% de chute de module initial), la deuxième sur une analyse de l'énergie dissipée et la troisième sur une analyse à partir d'une variable d'endommagement. L'analyse classique de la durée de vie en fatigue permet d'obtenir le paramètre de performance ε_6 (à 1 million de cycles). Les résultats ont permis de valider une loi d'évolution ces performances en fonction de la température en comparaison avec les résultats de la bibliographie.

ABSTRACT. Pavement strain and damage levels fluctuate during the year. The deformation and fatigue behavior of bituminous materials vary with temperature cycles. The goal of this paper is to present and discuss the influence of temperature on fatigue performance on asphaltic materials from experimental results. The paper discusses the results of a laboratory evaluation on the fatigue behavior of bituminous Mixtures. Fatigue tests had been performed at 4 temperatures, from 0°C to 30°C. The experimental investigation was performed with the two point bending test in displacement controlled. The fatigue life has been evaluated by three different approaches, based on the classical analysis 50% reduction of the initial stiffness modulus, the dissipated energy and the damage analysis. Classical analysis of the fatigue life versus the loading levels allows obtaining the performance parameter ε_6 (loading level leading statistically to a failure at 1 million cycles). Given that few studies have examined this issue, this research has focused on analyzing the influence of the temperature on the fatigue performance.

MOTS-CLÉS : fatigue, température, rupture, raideur, échauffement, approche énergétique

KEYWORDS : fatigue, temperature, failure, stiffness, healing, energetic approaches

1. Introduction

Les matériaux bitumineux étant thermosusceptibles, leurs propriétés varient avec la température. Or la température dans la chaussée subit des variations importantes au fil des saisons. Selon la saison, le matériau s'endommage plus ou moins rapidement. Il est donc nécessaire d'intégrer l'impact de ces variations saisonnières dans le guide de dimensionnement de chaussées. Plusieurs travaux de recherches ont réalisés des essais de fatigue sur les enrobés bitumineux à l'aide des essais non-homogènes (flexion deux et quatre points) afin d'étudier l'effet de la température sur la durée de vie en fatigue. D'ailleurs les normes française et américaine sont fondées sur ce type d'essai. En France, le choix est porté de tester le comportement des enrobés bitumineux en fatigue par les essais de flexion « deux points » sur des éprouvettes consoles trapézoïdales (NF EN 12697-24(Annexe A)). Cependant, aux Etats Unis, l'essai de fatigue en flexion 4 points (4PB) est normalisé dans AASHTO T 321¹. De nombreux travaux par des essais de flexion deux points [MOU 91]; [DOM 05]; [BOD 10] et par des essais de flexion quatre points [TAY 94] ; [DOU 99] ont étudié l'effet de la température sur le comportement en fatigue

¹ AASHTO T 321: Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending.

des enrobés bitumineux. Les travaux de [MOU 91] ; [TAY 94] ; [DOM 05];[BOD 10] ont montré par l'analyse classique de la durée de vie en fatigue (critère classique de rupture de 50% de chute de module initiale) que le paramètre de performance ε_6 (à 1 million de cycles) est d'autant meilleure que la température est élevée. Une autre approche concerne l'évolution des dommages avec la pente de la courbe de réduction de rigidité lors des essais de fatigue uniaxiale [BEN 04]. Dans le présent papier, d'abord une synthèse sur le principe de calcul des déformations admissibles par la loi de fatigue dans la méthode française de dimensionnement est présentée. Ensuite, l'analyse des résultats de l'essai de fatigue sur une Grave Bitume GB3 en flexion deux points à des différentes températures issues d'une précédente étude [MAR 10] est proposée. Puis, trois méthodes d'analyse d'essais de fatigue sont comparées notamment : le critère de 50% de chute de module, la méthode d'analyse à partir d'une variable d'endommagement (la pente de la phase II) qui permet de corriger les courbes de fatigue par rapport l'échauffement et le critère amélioré de l'énergie dissipée par [ROW 00]. Enfin, une synthèse bibliographique de l'effet de la température sur le paramètre de performance ε_6 est proposée.

2. Méthode française de dimensionnement : Loi de fatigue des enrobés bitumineux

La méthode française de dimensionnement de chaussée [LCP 94], mécaniste empirique est basée sur un modèle multicouche élastique linéaire isotrope. Actuellement, cette méthode prend en compte pour les chaussées bitumineuses, les variations de modules liés aux variations de températures auxquelles sont soumis les matériaux, dans le but de calculer les allongements à la base de ces chaussées. Ces allongements sont calculés à la température équivalente, θ_{eq} , de 15°C et sont ensuite comparés aux allongements admissibles $\varepsilon_{t,ad}$, (Eq 1) eux-mêmes calculés par la loi de fatigue des matériaux bitumineux à la température équivalente θ_{eq} , en corrigeant la valeur d'epsilon 6 à 10°C via l'utilisation de la loi de susceptibilité thermique d'epsilon6 (Eq 2) par une relation du type :

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz}) \left(\text{NE} / 10^6 \right)^b \left[E(10^\circ\text{C}) / E(\theta_{eq}) \right]^{0.5} k_r k_c k_s \quad [1]$$

$$\varepsilon_6(\theta) E(\theta)^{0.5} = \text{contante} \quad [2]$$

- NE : Nombre d'essieu équivalent au trafic de poids lourds cumulés,
- ε_6 : Déformation à 1 millions de cycle de chargement,
- E : Module de rigidité des couches d'enrobé à une température donnée,
- k_r : Coefficient de risque de variation des épaisseurs et de dispersion des essais de fatigue,
- k_c : Coefficient de calage manège de fatigue/essais en laboratoire,
- k_s : Coefficient qui dépend du type de la plateforme support.

3. Matériau testé

Pour le matériau testé [MAR 10], il s'agit d'une grave bitume 0/14 de type 3 avec 4,3 ppc de bitume pur 35/50 fabriquée et compactée en laboratoire avec une teneur en vides de 9%. Les éprouvettes d'essai ont été découpées par le Laboratoire Régional d'Angers. Des essais de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdale ont été effectués selon un mode de sollicitation à déformation imposée en tête de l'éprouvette, et ce, pour différents niveaux d'amplitudes à des différentes températures (0°, 10°, 20° et 30°C) à la fréquence 25 Hz, 18 éprouvettes par température.

4. Analyse des résultats de l'essai de fatigue

Trois méthodes de détermination de la durée de vie par fatigue N_f ont été sélectionnées dans cette étude, et ils sont présentés ci-dessous.

- Méthode classique – critère de rupture : Un critère arbitraire de durée de vie en fatigue des éprouvettes a été défini, il correspond à la chute de moitié de la raideur de l'éprouvette (Figure 1-a).
- Correction des courbes de fatigue par rapport l'échauffement : La courbe classique de variation de module complexe pendant un essai de fatigue présente généralement trois phases (Figure 1-b). La phase I est caractérisée par une décroissance rapide du module. La phase II présente une décroissance lente et continue du module. Et enfin la phase III présente une chute brutale du module par l'apparition des macro-fissures. La diminution importante de la norme du module complexe dans les premiers cycles de sollicitation (phase I) ne peut pas être totalement justifiée par la fatigue et l'influence de l'échauffement produit par le caractère visqueux du matériau. [BEN 04] ont suggéré une approche d'endommagement pour déterminer la rigidité initiale de l'enrobé. Ils proposent d'extrapoler la section linéaire de l'évolution de la rigidité lors de la phase II jusqu'à l'origine. Cette procédure d'étude de la résistance à la fatigue des matériaux bitumineux mettant en application l'approche d'analyse par endommagement a été développée

à l'ENTPE. Pour un intervalle choisi dans la phase II, la loi de fatigue, définie par l'évolution de la norme du module complexe en fonction du nombre de cycles, est considérée linéaire. Pour un intervalle considéré, le taux d'endommagement par cycle, $D(N)$, peut être déduit de la pente expérimentale, a_T , (Figure 1-b) de la relation entre le module normalisé et le nombre de cycles par l'équation 3 :

$$D(N) = \frac{|E_0^*| - |E_N^*|}{|E_0^*|} \quad [3]$$

- Analyse à partir de l'énergie dissipée : Rowe en 1993 propose d'utiliser un rapport d'énergie R_n (energy ratio) défini pour un nombre n de cycle de sollicitations par le rapport entre l'énergie dissipée au 1^{er} cycle et énergie totale dissipée au cycle n . [ROW 00] a démontré mathématiquement que le produit simple des nombre de cycles et du module complexe ($n \cdot E^*$) est valable quel que soit le mode de chargement des essais de fatigue en contrainte ou en déformation imposée. Le maximum résultant (Figure 1-c) indique le point de transition entre la formation de micro-fissures et la propagation d'une fissure macroscopique. Ce point est approximativement compatible avec les résultats de 50 % de chute de module. Ce nouveau critère d'énergie dissipée montre un pic clairement défini qui donne une simple définition de la rupture. Il a été intégré récemment dans les normes ASTM pour les essais de fatigue et plus récemment appliqué dans la version AASTHO T321 2014.

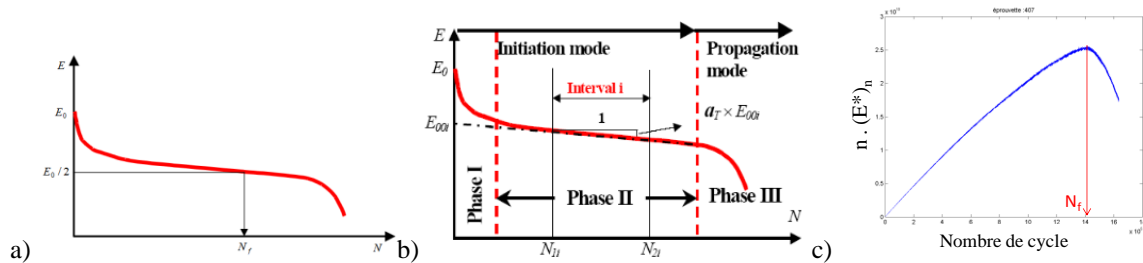


Figure 1.a) critère de 50% de module initial b) correction de l'échauffement [BEN 04] c) critère de l'énergie dissipée

Sur la figure 2-a, la comparaison entre le paramètre de performance ϵ_6 obtenus par les trois critères de rupture présentés ci-dessus, conduit à une évaluation de qualité similaire. Mais, à hautes températures (30°C), le critère énergétique a montré des augmentations de la durée de fatigue en comparaison avec l'approche classique, basée sur une réduction de 50% de la rigidité initiale. A basse température 0°C, le critère de correction du module initial par la pente de la phase II est quasi-identique au critère classique de 50% de chute de module. Cependant à haute température 30°C, il coïncide avec le nouveau critère défini par l'énergie dissipée. La durée de vie déterminée avec le critère classique de 50% de chute de module initial est utilisée pour le dimensionnement des chaussées routières en France. Cette approche de la fatigue classique utilisée concerne uniquement le nombre de cycles à la rupture. Par conséquent, pour des mélanges différents peuvent présenter des combinaisons de raideur initiale, de cinétique de fatigue différentes et de point de rupture différents mais donnent encore l'impression d'exprimer des propriétés de fatigue similaires lorsqu'on n'utilise qu'un critère de rupture en fatigue. Il est donc suggéré qu'au moins trois propriétés soient prises en compte lors de la caractérisation de la fatigue: raideur initiale, évolution de l'endommagement, ainsi que point de rupture défini par l'approche de l'énergie dissipée. Sur la figure 2-b, les résultats de cette étude sont comparée aux résultats de [MOU 91]; [DOM 05] sur la plage de température (-10°C, 30°C), ϵ_6 n'est pas constant et suit une tendance parabolique avec un minimum à température qui dépend du type de bitume. Néanmoins, la méthode française de dimensionnement considère une augmentation monotone des performances en fatigue en fonction de la température. Ce qui n'est pas vérifié à partir des données expérimentaux étudiées. Une correction par la moyenne donne des résultats similaires (figure 2-b). Cependant, l'impact de cette approximation sur la durée de vie doit être étudié avec plus de détails.

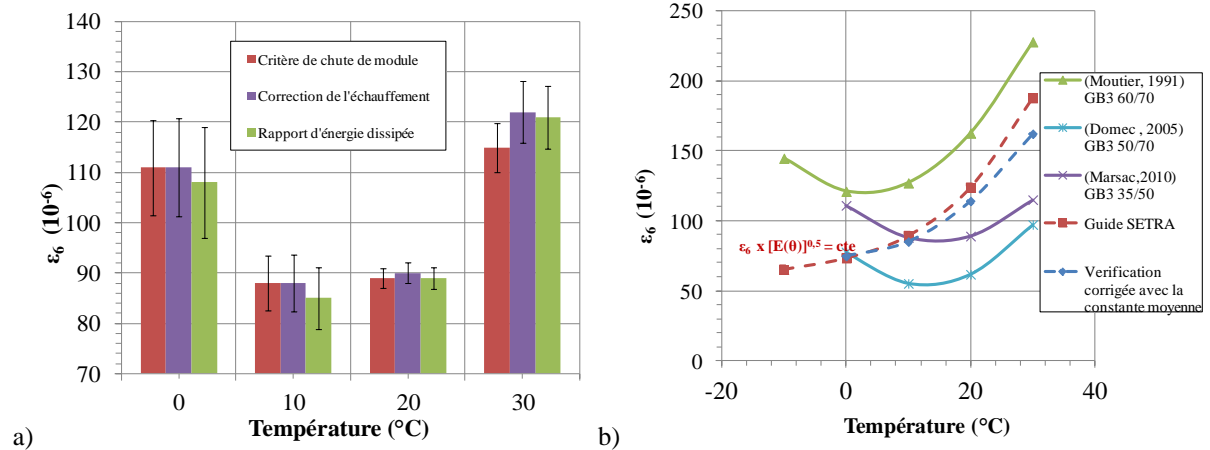


Figure 2.a) Variation expérimentale du paramètre de dimensionnement ε_6 en fonction de la température
 b) Comparaison avec les résultats de la bibliographie (GB3, essai de flexion 2 points)

5. Conclusion

Les résultats avec différents critères de rupture, à des différentes températures, ont montré la validité du critère de l'énergie dissipée en comparaison avec le critère classique et celui de correction de l'échauffement. Cependant, il est judicieux de calculer la durée de vie en fatigue par différentes méthodes dans le cas de comparaison des différentes compositions. L'évaluation de la dépendance thermique du paramètre de performance ε_6 permettra à étendre la méthode de dimensionnement française basée sur une température équivalente constante à d'autres climats plus chauds ou plus froids. A l'issue de cette étude, la prise en compte de l'effet de la température dans la méthode de dimensionnement est une piste de recherche à explorer avec les différentes lois d'évolution en fonction de la température.

6. Bibliographie

- [BEN 04] Di Benedetto, H., De La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., Lundström, R., « Fatigue of bituminous mixtures». Mater. Struct. 37, 2004, p 202–216.
- [BOD] Bodin, D., Terrier, J.-P., Perroteau, C., Hornych, P., Marsac, P., « Effect of temperature on fatigue performances of asphalt mixes», 11th International Conference on Asphalt Pavements, Nagoya, Japan, 2010.
- [DOM 05] Domec, V., Breyse, D., Roche, C. de L., Yotte, S., « Caractérisation de la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux en conditions de « trafic simulé » et de température », Rev. Eur. Génie Civ. 9, 2005, p 385–400.
- [DOU 99] Doucet, F., Caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés, Mémoire de maîtrise Université de Sherbrooke, 1999.
- [LCP 94] LCPC–SETRA, Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide technique, Décembre 1994.
- [MAR 10] Marsac, P., El-Bedoui, S., Lariere, A., Influence de la température sur la caractérisation en fatigue d'un enrobé bitumineux, Opération de recherche No. 11P063, 2010.
- [MOU 91] Moutier, F., Etude statistique de l'effet de la composition des enrobés bitumineux sur leur comportement en fatigue et leur module complexe, Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées n°172, p71-79, 1991.
- [ROW 00] Rowe, G.M., Bouldin, M.G., « Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures », 2nd Eur Asphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, 2000.
- [TAY 94] Tayebali, A.A., Deacon, J.A., Coplantz, J.S., Finn, F.N., Monismith, C.L., Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes. Part II- Extended Test Program. Asphalt Research Program. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, Rapport SHRP-A-404. Washington, D.C, 1994.