HAL
open science

Modélisation thermomécanique des enrobés bitumineux lors de l'essai de flexion sous moment négatif

Laurent Arnaud, Adrien Houel

To cite this version:

Laurent Arnaud, Adrien Houel. Modélisation thermomécanique des enrobés bitumineux lors de l'essai de flexion sous moment négatif. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01509263

HAL Id: hal-01509263

https://hal.science/hal-01509263

Submitted on 16 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Modélisation thermomécanique des enrobés bitumineux lors de l'essai de flexion sous moment négatif

Laurent Arnaud — Adrien Houel

Laboratoire Géomatériaux
Département Génie Civil et Bâtiment URA CNRS 1652
École Nationale des Travaux Publics de l'État
Rue Maurice Audin, F-69518 Vaulx-en-Velin cedex

{arnaud, houel}@entpe.fr

RÉSUMÉ. *Un essai de fatigue, appelé également essai de flexion sous moment négatif permet de caractériser la formulation la plus appropriée. Une modélisation thermomécanique du système est développée à partir d'un logiciel aux éléments finis (COMSOL). Elle tient compte de la viscosité des matériaux bitumineux et de l'échauffement thermique crée par les cycles mécaniques de fatigue. Pour cela, des essais précis sur éprouvettes cylindriques ont été réalisés pour déterminer des grandeurs mécaniques et thermiques caractéristiques des enrobés bitumineux qui sont rares dans la littérature scientifique. Une troisième hypothèse s'appuyant sur la théorie de l'endommagement est abordée en conclusion et s'avère indispensable pour obtenir les résultats proches des expériences.*

ABSTRACT. *A five-point bending under negative moment test makes it possible to characterize the best bituminous mix. A thermomechanical modeling from finite elements software (COMSOL) is proposed. Bituminous concrete viscoelasticity and the dissipation of heat during the tests are taking account. That is why, tests on cylindrical specimens were done to obtain important mechanical and thermal bituminous concrete charateristics, which are rare in scientific literature. A third assumption based on damage theory is essential to obtain correct results near from tests.*

MOTS-CLÉS : *enrobé bitumineux, dalle orthotrope, viscoélasticité, modèle thermomécanique, essai de flexion sous moment négatif, essai de fatigue, endommagement.*

KEYWORDS: *bituminous concrete, steel orthotropic plate, viscoelasticity, thermomechanical modelling, five-point bending fatigue test, damage.*

1. Introduction

La connaissance du comportement des enrobés bitumineux sur dalles orthotropes, i.e sur platelages métalliques orthogonalement anisotropes, est indispensable pour des questions de durabilité des ouvrages d'art comme, par exemple, le viaduc de Millau. Pour de telles structures, l'eau s'infiltrerait alors dans les macro-fissures susceptibles d'apparaître sous sollicitations au droit des raidisseurs sur la partie supérieure de la couche d'enrobé bitumineux puis de se propager jusqu'à la couche d'interface qui sert de couche d'étanchéité. Le platelage métallique, sensible à la corrosion, pourrait finalement perdre ses propriétés mécaniques.

Ce papier permet tout d'abord de présenter les dispositifs expérimentaux de test des enrobés bitumineux puis les résultats obtenus sur divers complexes, enfin, la modélisation conduite est exposée et confrontée aux résultats expérimentaux.

2. Essai de fatigue en laboratoire

2.1. *Principe*

Le comportement in situ des enrobés bitumineux est caractérisé en laboratoire par un essai de fatigue dit de flexion sous moment négatif (cf. figure 1). Cet essai non-homogène a été mis au point au laboratoire des Ponts et Chaussées puis amélioré depuis 2003 au laboratoire Géomatériaux de l'ENTPE. Il s'agit d'un essai de fatigue (sollicitation à 4 Hz) qui dure plusieurs jours car l'échantillon est soumis à plusieurs millions de cycles. Il consiste à reproduire la zone où l'enrobé subit les plus grandes déformations c'est-à-dire de part et d'autre des raidisseurs d'un platelage métallique. Cet essai fait l'objet d'une norme française (AFNOR, 2006). Il conduit à des résultats conformes aux observations in situ (Hameau *et al.*, 1981, Houel, 2004, Arnaud *et al.*, 2006). Cependant, il n'existe pas d'étude qui permette de modéliser le comportement du complexe (métal, couche d'étanchéité et enrobé bitumineux).

Au cours d'un essai de fatigue sur enrobé bitumineux, deux phénomènes principaux interviennent :

– la dissipation thermique liée à la viscosité du matériau qui entraîne une augmentation de la température et en conséquence une diminution du module complexe de l'enrobé,

– le phénomène d'endommagement du matériau avec création de microfissures puis apparition d'une macrofissure se propageant dans le matériau.

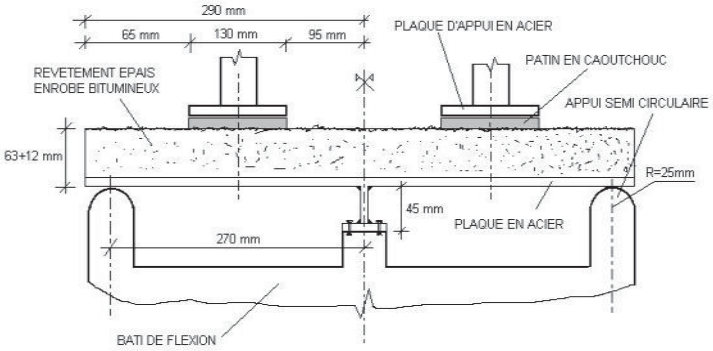

Figure 1. *Dispositif expérimental relatif à l'essai de flexion sous moment négatif (Houel, 2004)*

2.2. *Matériau testé*

Le matériau, fabriqué au centre de recherche d'Eiffage TP, est un enrobé classique, mélange de granulats 2/10, de sable (de diamètre maximal 2 mm), et de fines (diamètre maximal inférieur à 80µm). La teneur en liant est de 6%. La même formulation a été utilisée pour les dalles et les éprouvettes cylindriques.

3. Modélisation thermomécanique des enrobés bitumineux

3.1. *Hypothèses mécaniques*

Bien que l'enrobé bitumineux soit un matériau hétérogène, on considère qu'à l'échelle des éprouvettes cylindriques (diamètre = 75 mm et hauteur = 175 mm), le matériau est homogène, isotrope, viscoélastique et thermosusceptible.

La viscoélasticité du matériau se traduit par une loi élastique usuelle écrite avec un module complexe E* et un coefficient de poisson complexe (pris réel pour les enrobés). E* dépend de la pulsation ω et de la température T. L'essai de module complexe (sollicitations sinusoïdales en petites déformations à fréquences et températures différentes) permet de caractériser le comportement du matériau. Le module complexe peut alors s'écrire :

$E^*(\omega,T) = Ee^{i\varphi}$ avec E, module (réel) et φ, argument de E*. [1]

La partie imaginaire du module correspond au caractère visqueux dissipatif. De plus, pour une fréquence de sollicitation donnée, le module complexe du matériau est défini en fonction de sa température à l'aide de la propriété d'équivalence temps-température des enrobés bitumineux (on a une même valeur de module du matériau pour différents couples fréquence - température) et du modèle 2S2P1D comportant 7 constantes (Olard, 2003).

3.2 *Hypothèses thermiques*

Nous supposons que l'énergie visqueuse dissipée est totalement transformée sous forme de chaleur (Piau, 1989). Ainsi, les effets thermomécaniques sont pris en compte par une élévation de température dans le modèle 2S2P1D.

Les grandeurs caractéristiques des enrobés sont déduites d'essais simples (suivi de mise en température) sur éprouvettes cylindriques. Les grandeurs physiques conductivité thermique, chaleur spécifique et les coefficients d'échange ont été obtenues (cf. tableau 1), grandeurs peu disponibles en bibliographie.

3.3 *Modélisation thermomécanique de l'essai de flexion sous moment négatif*

Le problème est modélisé en deux dimensions à l'aide du logiciel aux éléments finis COMSOL Multiphysics. Il permet de résoudre un problème couplant mécanique et thermique. Le module « Mécaniques des structures » en contraintes planes est utilisé pour le comportement mécanique. La loi de comportement est définie par le module de Young (complexe), le coefficient de Poisson et la masse volumique pour chaque matériau (modèle multicouches).

Pour les transferts de chaleur, le modèle de conduction implémenté est classique :

$$\begin{cases} -\nabla.(k\nabla T) = Q & \text{dans } \Omega\text{, le volume} \\ \mathbf{n}.(k\nabla T) = h(T_{ext} - T) & \text{sur } \Gamma\text{, la frontière} \end{cases} \qquad [2]$$

avec T température des matériaux, et T_{ext} température de l'essai, k conductivité thermique, Q source de chaleur issue du terme de dissipation visqueuse, h coefficient d'échange (différent suivant la nature des surfaces en contact).

4. Résultats

Deux essais expérimentaux et les résultats issus de la modélisation sont présentés en figure 2. Ces deux essais se différentient par la température, laquelle était légèrement plus basse pour le second que pour le premier. La modélisation a été obtenue à partir des paramètres suivants et ceux présentés dans le tableau 1 :

f = fréquence de la sollicitation = 4 Hz

F_{max} = force de compression de sollicitation maximale = 32 kN, $F_{min} = 0{,}1*F_{max}$

T_{ext} = température de l'essai = 10°C

Caractéristiques des matériaux	Acier	Couche d'étanchéité	Enrobé bitumineux
Module de Young (MPa)	200 000	866+500i	E*(ω,T)
Coefficient de poisson	0,33	0,38	0,35
ρ (kg/m^3)	7850	1900	2500
k (W/m.K)	44,5	0,17	1,3
Cp (J/kg.K)	475	2090	880
h (W/m^2.K)			42 (bords libres) 20 (bords en contact)

Tableau 1. *Grandeurs caractéristiques implémentées dans notre modèle*

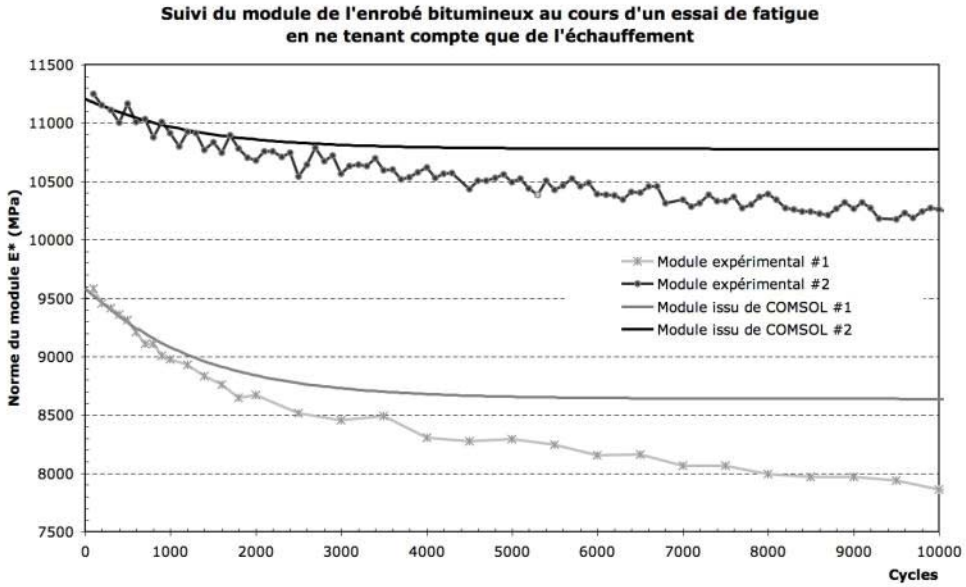

Figure 2. *Normes expérimentales et modélisées du module complexe à partir du modèle thermomécanique, résultats où une fissure est susceptible d'apparaître*

Les résultats montrent que le comportement initial du matériau bitumineux limité à 2000 cycles est correctement modélisé : seules les considérations thermomécaniques suffisent à rendre compte du comportement de l'enrobé. Dans les deux cas, la température est responsable de plus de 6% pour l'éprouvette #1 et de 9% pour l'éprouvette #2 de la chute initiale de la norme du module complexe sur les 2000 premiers cycles. Son angle de phase varie très peu, de l'ordre de 1°. En ce qui concerne le modèle, sur le même nombre de cycles, la baisse de la norme de E* imputable à la température est de l'ordre de 7,5%.

Néanmoins, à partir d'environ 2000 cycles, les effets de la température sont insuffisants pour simuler le comportement réel des enrobés bitumineux. C'est pourquoi, le modèle doit être complété par de l'endommagement qui se traduit par une diminution progressive et irréversible du module complexe. Pour cela, (Piau, 1989), dans le cas d'un état uniaxial de déformation, propose une loi d'évolution de type Woehler-Miner exprimant l'accroissement de l'endommagement δD en fonction du nombre de cycles δN :

$$\delta D = B\varepsilon_{xx}{}^{\beta}\delta N \text{ pour } D \in [0,1[\qquad [3]$$

avec B, ß, deux nouveaux paramètres réels positifs à définir.

Pour prendre en compte ces effets, il suffit de modifier le terme de source de chaleur Q de l'équation [3] en y incluant une loi locale d'évolution du dommage.

5. Conclusions et perspectives

L'essai de fatigue de flexion sous moment négatif est modélisé à partir du comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux. Les résultats montrent que les effets thermiques expliquent l'évolution mécanique initiale du matériau bitumineux lors des essais de fatigue. Néanmoins, cette simulation doit être améliorée en considérant l'endommagement du matériau qui n'est pas présenté dans ce papier. Ce phénomène indispensable pour rendre compte de la réalité se traduit par une diminution irréversible du module complexe de l'enrobé en fonction du nombre de cycles de chargement.

6. Bibliographie

AFNOR, Méthodes d'essai sur banc de fatigue en flexion sous moment négatif. NF P 98-286, 2006.

Arnaud L. & Houel A., « Fatigue damage and cracking of asphalt pavement on orthotropic steel bridge deck », *Transportation Research Board Annual meeting Compendium of Papers CD-ROM*, Washington D.C., 2006.

COMSOL Multiphysics, Comsol Reference manual, 2006.

Hameau G., Puch C. & Ajour A.-M., « Comportement à la fatigue en flexion sous moment négatif », *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées* 111, 1981.

Houel A. Comportement à la fatigue et fissuration mécanique des enrobés bitumineux sur dalle orthotrope, Master recherche GC, Ecole doctorale MEGA-ENTPE, France, 2004.

Olard F., Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures, Thèse de Doctorat, Ecole doctorale MEGA-ENTPE, France, 2003.

Piau J.-M., « Modélisation thermomécanique du comportement des enrobés bitumineux », *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées*, vol. 163, septembre-octobre 1989, p. 41-53.