



HAL
open science

Une nouvelle loi pour l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux

Didier Bodin, Armelle Chabot, Chantal de La Roche, Gilles Pijaudier-Cabot

► To cite this version:

Didier Bodin, Armelle Chabot, Chantal de La Roche, Gilles Pijaudier-Cabot. Une nouvelle loi pour l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux. 16ème Congrès Français de Mécanique, Sep 2003, Nice, France. pp.1-6. hal-04699959

HAL Id: hal-04699959

<https://hal.science/hal-04699959v1>

Submitted on 17 Sep 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Une nouvelle loi pour l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux

Didier BODIN¹, Armelle CHABOT¹, Chantal de LA ROCHE¹, Gilles PIJAUDIER-CABOT²

² Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Division Matériaux et Structures de Chaussées
Route de Bouaye - BP 4129, F-44341 Bouguenais Cedex
Didier.Bodin@lcpc.fr

² Laboratoire de Génie Civil de Nantes - S^t Nazaire
École Centrale de Nantes
Rue de la Noë - BP 92101, F-44321 NANTES Cedex 3

Résumé :

Afin de limiter la fissuration des chaussées bitumineuses engendrée par le passage répété de poids lourds la résistance à la rupture en fatigue de leurs matériaux est prise en compte. Sur l'essai français normalisé de poutre console trapézoïdale soumise à une flexion sinusoïdale. Le critère utilisé pour le dimensionnement des chaussées n'intègre pas la vitesse de micro et macro fissuration observée. Pour prendre en compte la cinétique de dégradation un modèle nonlocal d'endommagement en fatigue est proposé. La loi d'évolution de l'endommagement présentée permet d'améliorer la prédiction la description du processus fatigue vis à vis de lois d'évolution classiques. Les résultats montrent la possibilité de décrire les essais effectués en laboratoire. Ces validations sont une première étape avant d'aborder des simulations de structures de chaussées réelles.

Abstract :

To forecast pavement fatigue cracking, fatigue performances of asphalt mixtures are assessed using laboratory cyclic fatigue tests. The classical approach is based on a sample failure criterion and does not take the damage rate into account. A damage model is implemented to predict the behavior of asphalt mixtures during these tests. The damage evolution law proposed here leads to a better prediction of the whole fatigue damage process than classical fatigue approaches. The model results point out the ability to predict laboratory fatigue tests. This encouraging step allows to plan real pavement structure simulations in the future.

Mots-clefs :

Endommagement, Fatigue, Enrobés Bitumineux

1 Introduction

La fatigue par endommagement des enrobés bitumineux routier est un problème important dont la prédiction reste un enjeu important pour estimer la durabilité des chaussées. Le passage répété de charges roulantes de poids lourds sur les chaussées entraîne des dégradations progressives des matériaux des différentes couches de la structure. Le dimensionnement des chaussées bitumineuses est déterminé, en partie, en fonction des caractéristiques de fatigue évaluées en laboratoire sur l'essai français normalisé de poutre console trapézoïdale soumise à une flexion sinusoïdale (norme NF P 98-261-1). Lors de ces essais, la raideur suit une évolution typique en trois phases (Piau, 1987; Lefevre, 2001). La première phase (I) correspond à une décroissance rapide de la raideur. Elle est suivie d'une phase plus régulière (II). La rupture intervient par localisation et création d'une fissure macroscopique (phase III). Afin de prédire les durées de vie des enrobés bitumineux en laboratoire, une modélisation par la mécanique de l'endommagement est proposée (Bodin *et al.*, 2001, 2002; Bodin, 2002). Le cadre de modélisation adopté permet d'identifier les paramètres du modèle sur les données expérimentales obtenues en la-

boratoire. La forme originale de la loi d'évolution de l'endommagement retenue pour décrire la fatigue des matériaux bitumineux est présentée. Les résultats de l'identification du modèle et des premières validations, sur des essais de laboratoire illustrent le caractère prédictifs du modèle ainsi construit.

2 Modèle d'endommagement

La dégradation du matériau est modélisé par une variable d'endommagement D supposée scalaire. Au cours du processus la réduction du tenseur d'élasticité est isotrope et la relation contrainte déformation données par (Eq. 1).

$$\sigma_{ij} = (1 - D)C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (1)$$

où σ_{ij} et ε_{kl} sont respectivement les composantes des tenseurs des contraintes et des déformations ; C_{ijkl} le tenseur d'élasticité du matériau vierge dépendant du module d'Young E et du coefficient ν du matériau. Le second principe de la thermodynamique impose que le taux d'endommagement soit positif ou nul. L'endommagement est égal à 0 pour le matériau vierge et devient 1 lorsque le matériau est totalement dégradé et ne peut plus transmettre d'effort.

L'évolution de l'endommagement est calculé à partir du concept de déformation équivalente $\tilde{\varepsilon}$ (Eq. 2) donnée fonction des déformation principales positives $\langle \sigma_i \rangle$. Le modèle d'endommagement est construit en utilisant une expression inspiré d'un critère de Rankine modifié (Patzák et Jirásek, 2001).

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1,\dots,3} \frac{\langle \sigma_i \rangle}{E(1 - D)}} \quad (2)$$

Le taux d'endommagement est donné sous la forme :

$$\dot{D} = f(D) \tilde{\varepsilon}^\beta \langle \dot{\tilde{\varepsilon}} \rangle \quad (3)$$

La fonction d'évolution $f(D)$ est propre au comportement du matériau. Pour les matériaux bitumineux son identification est effectué à l'aide des données expérimentales obtenues en laboratoire.

Le traitement nonlocal intégral du calcul de l'évolution de l'endommagement permet de décrire le processus adoucissant de rupture qui conduit à la localisation des déformations. Il revient à remplacer $\tilde{\varepsilon}$ par sa moyenne pondérée $\bar{\varepsilon}$ (Eq. 4) (Pijaudier-Cabot et Bazant , 1987).

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V_r(x)} \int_{\Omega} \Psi(x - s) \tilde{\varepsilon}(s) ds \quad \text{avec} \quad V_r(x) = \int_{\Omega} \Psi(x - s) ds \quad (4)$$

où Ω est le volume de la structure et $V_r(x)$ représente le volume du voisinage du point x qui influence l'évolution de l'endommagement. La fonction poids Ψ est fonction de la distance $\|x - s\|$ du point considéré s est choisie arbitrairement de forme gaussienne.

$$\Psi(x - s) = \exp - \frac{4\|x - s\|^2}{l_c^2} \quad (5)$$

La longueur caractéristique l_c est un paramètre du modèle d'endommagement nonlocal relatif à la microstructure du matériau. Dans l'état actuel des travaux sur le sujet sa valeur n'a jamais été identifié pour les matériaux bitumineux. Elle est prise égale à trois fois la taille du

plus gros granulats conformément aux résultats obtenus pour les bétons de ciment (Bažant et Pijaudier-Cabot, 1987). Pour le béton bitumineux de granulométrie 0-6 mm, pour lesquels des résultats d'essais de fatigue sont utilisés par la suite, l_c est donc pris égale à 18 mm.

Dans le cas où l'état de déformation est homogène dans la structure, l'expression intégrale $\bar{\varepsilon}$ (Eq. 4) est égale à $\bar{\varepsilon}$. Alors, l'évolution de l'endommagement n'est pas fonction de la longueur caractéristique. En particulier dans les conditions uniaxiales, l'évolution de l'endommagement dépend du paramètre matériau l_c .

Pour les conditions expérimentales d'essais uniaxiaux de fatigue contrôlés en déplacement, l'endommagement D atteint après N cycles de sollicitation est solution de l'équation (Eq. 3) :

$$F(D) = \int \frac{dD}{f(D)} = \frac{\varepsilon_a^{\beta+1}}{\beta+1} N \quad (6)$$

où ε_a est l'amplitude de déformation appliquée à l'échantillon et maintenue constante durant l'essai de fatigue.

Si l'on définit la durée de vie d'un échantillon comme le nombre de cycle nécessaire pour atteindre un endommagement seuil κ . La durée de vie N_F fonction de l'amplitude ε_a s'obtient en remplaçant D par κ dans (Eq. 6)

$$N_F = K \varepsilon_a^{-(\beta+1)} \quad \text{avec} \quad K = (\beta+1)F(\kappa) \quad (7)$$

Ce résultat est en accord avec la loi de fatigue de Manson et Coffin mentionnée par Suresh (1998). La durée de vie en fatigue N_F fonction de l'amplitude de déformation ε_a , ce qui correspond à la courbe de Wöhler dans un diagramme bilogarithmique conduit à une droite de pente $-(\beta+1)$. Pour les matériaux bitumineux courants, la pente mesurée expérimentalement est proche d'une valeur moyenne de -5 généralement admise (LCPC, 1994). La valeur de cette pente conduit à l'identification du paramètre β qui sera pris égal à 4. Pour chaque matériau il est, bien sûr, possible d'identifier ce paramètre à partir des courbes de Wöhler sur les résultats d'essai (Bodin, 2002; Bodin *et al.*, 2003).

L'implantation du modèle cyclique dans le code de calcul aux éléments finis Castem 2000 intègre une procédure spécifique d'intégration temporelle en fatigue qui autorise des simulations pouvant atteindre plusieurs millions de cycles (Peerlings *et al.*, 2000; Bodin, 2002).

3 Nouvelle loi d'évolution de l'endommagement

Une première approche de l'endommagement par fatigue des matériaux bitumineux à donnée lieu à l'identification d'une loi d'évolution de l'endommagement pour laquelle la fonction $f(D)$ était une fonction puissance (Bodin *et al.*, 2002; Bodin, 2002).

Avec ce type de loi, la description du processus de rupture avec de telle loi d'évolution de l'endommagement restitue correctement la cinétique de dégradation du début des essais de laboratoire mais ne permet pas de quantifier correctement la durée de vie en fatigue.

Dans l'objectif d'affiner la prédiction de la durée de vie en fatigue une nouvelle loi d'évolution de l'endommagement est proposée afin de restituer la phase III de l'évolution en fatigue.

La formulation mathématique, inspirée d'une loi de Weibull, conduit à la forme de la fonction $F(D)$ définie (Eq. 6) qui suit :

$$F(D) = \alpha_1 \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{D}{\alpha_2} \right)^{\alpha_3} \right) \right) \Rightarrow f(D) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 \alpha_3} \left(\frac{D}{\alpha_2} \right)^{1-\alpha_3} \exp \left(\frac{D}{\alpha_2} \right)^{\alpha_3} \quad (8)$$

où les trois paramètres α_i sont des paramètres du matériau. Cette expression permet de donner l'expression du taux d'endommagement (Eq. 3) en substituant la fonction $f(D)$, obtenue par dérivation (Eq. 8).

Dans le cadre de cette étude, la base de données du programme interlaboratoire de la RILEM intégrant les essais réalisés au LCPC est utilisée pour l'identification et la validation du modèle. Elle regroupe des données sur un enrobé bitumineux (granulats 0-6mm, bitume pur 50/70) testé dans les mêmes conditions de fréquence et de température (10°C-10Hz). La figure 1 présente le résultat du calage du modèle sur des essais de traction compression et sur des essais de flexion sur éprouvette console trapézoïdale (voir Fig. 2-a), contrôlés en déplacement. Le paramétrage moyen obtenu sur l'ensemble des données expérimentales disponibles y est représenté en trait interrompu.

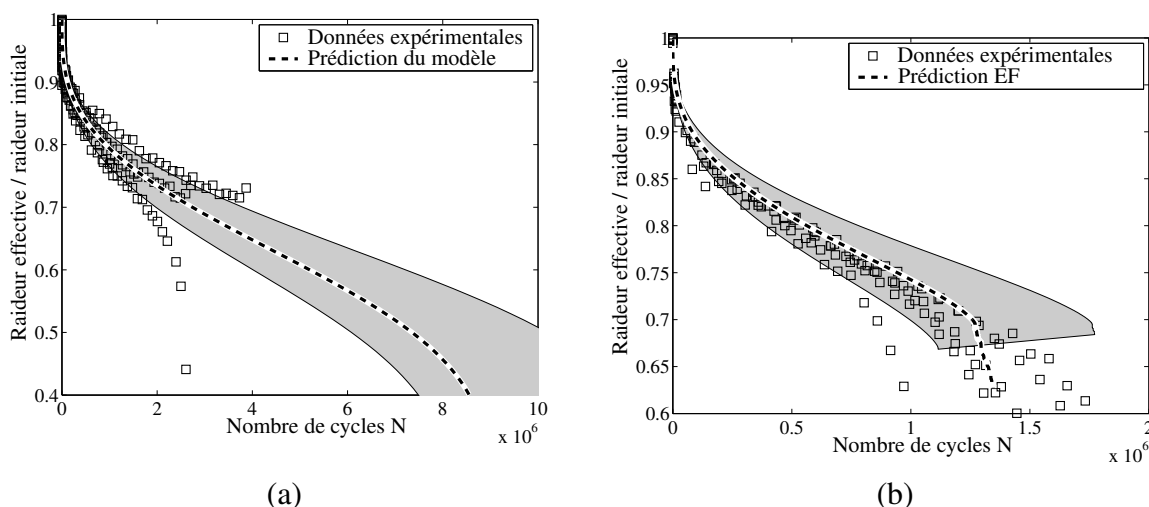


FIG. 1 – Résultat du calage du modèle d'endommagement : comparaison avec les données expérimentales et de la prédiction du modèle : (a) essais de traction compression $\varepsilon_a=80 \cdot 10^{-6}$ (b) essais de flexion sur éprouvette console trapézoïdale $\varepsilon_{max}=140 \cdot 10^{-6}$

Les paramètres du modèles identifiés sur les données expérimentales sont regroupées dans le tableau suivant (Tab. 1). On y retrouve le paramétrage moyen et deux paramétrages limite identifié sur les essais extrêmes obtenus dans la base de données expérimentales. Il définissent le fuseau grisé superposé au données moyennes du modèle tracé sur les figure (1 a et b).

	β	α_1	α_2	α_3
limite haute	4	$7.74 \cdot 10^{-15}$	0.42	3.00
moyenne	4	$5.58 \cdot 10^{-15}$	0.42	3.00
limite basse	4	$5.12 \cdot 10^{-15}$	0.46	3.09

TAB. 1 – Paramètres de la loi d'endommagement (Eq. 8) déterminé pour $\beta=4$

Le modèle ainsi obtenu est utilisé sans réajustement à posteriori afin de conclure sur ces potentialités de prédiction.

4 Résultats des simulations

Les prédictions d'essais de fatigue pour d'autres conditions expérimentales sont présentées. Il s'agit de simulation élément finis effectuées dans les conditions présentées figure (2-a) en utilisant le maillage (Fig. 2-b).

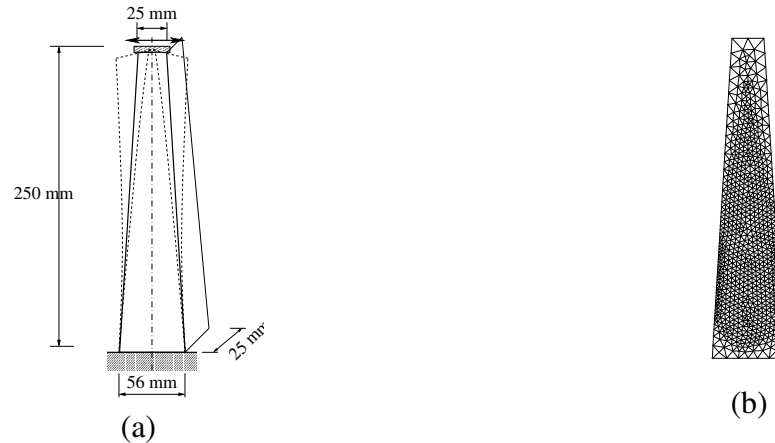


FIG. 2 – Conditions de simulation des essais de fatigue sur éprouvette console trapézoïdale : (a) schéma du dispositif - (b) maillage utilisé

La figure (3) présente les résultats de simulation pour des chargements contrôlés en déplacement (Fig. (3-a) et pour des chargements contrôlés en force (Fig. (3-b))

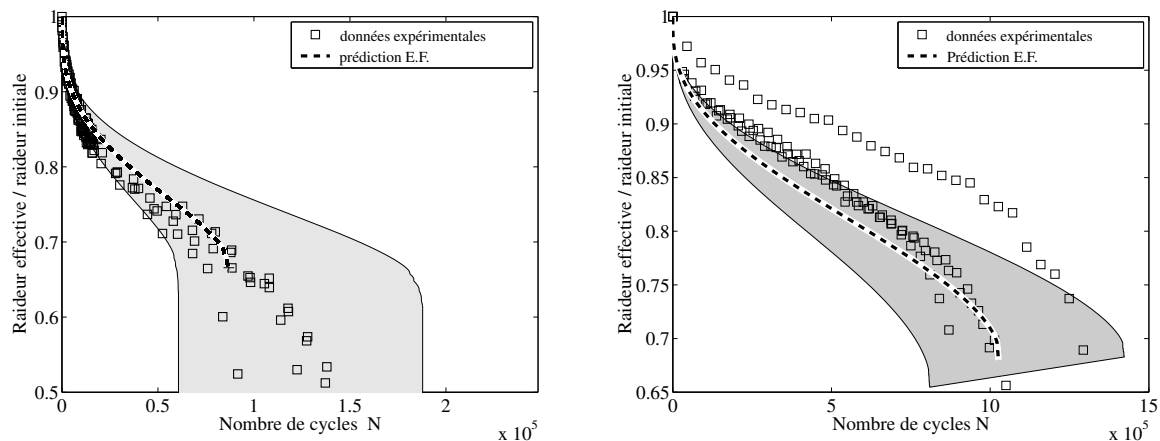


FIG. 3 – Comparaison des prédictions dans le cas d'essais de flexion sur éprouvette console trapézoïdale : (a) essais contrôlé en déplacement $\varepsilon_{max} = 220 \cdot 10^{-6}$ (b) essais contrôlés en force $\varepsilon_{max}^0 = 118 \cdot 10^{-6}$.

Pour les essais de fatigue contrôlés en déplacement, les résultats de simulation conduisent à une description correcte de l'évolution de la perte de raideur mesurée expérimentalement. Le fuseau traduisant l'incidence de la dispersion sur l'identification du modèle encadre les données expérimentales permettant de donner une prédiction fiable et bornée par le fuseau. Pour les essais contrôlés en force les résultats de prédictions conduisent également à une description satisfaisante de l'évolution macroscopique de l'échantillon durant l'essai. Les écarts entre la simulation et les résultats d'essai peuvent néanmoins atteindre 10% ce qui reste satisfaisant à l'échelle de la dispersion expérimentale.

5 Conclusion et perspectives

Ce modèle d'endommagement proposé offre un cadre de modélisation ouvert qui est applicable au cas pratique de l'approche de la durabilité des chaussées. Pour affiner les méthodes employées pour le dimensionnement des chaussées, on cherche à prédire la durée de vie des matériaux employés. La loi d'évolution de l'endommagement présentée, permet de simuler la totalité du processus de fatigue observé lors des essais de flexion. L'extension du domaine de validité du modèle à une base de données plus étendue, et pour d'autres matériaux est également un point nécessaire pour approfondir la pertinence du modèle.

Références

- Bažant Z. P., Pijaudier-Cabot G, (1989), Measurement of Characteristic length of nonlocal continuum, *Journal of Engineering Mechanics*, **115**, n 4, pp. 755-767.
- Bodin D., Chabot A., De la Roche C., Piau J. M., Pijaudier-Cabot G, 2001, Essais de fatigue sur enrobés bitumineux et perspectives de modélisation par la mécanique de l'endommagement, *Congrès Français de Mécanique, 3-7 septembre 2001, Nancy*.
- Bodin D., Gilles Pijaudier-Cabot, Chantal de La Roche, (2002) ,A continuum Damage Approach of Asphalt Concrete Fatigue Tests, in *Proceedings of the 15th Engineering Mechanics Conference, June 2-5, Columbia University, New York, USA*.
- Bodin D., 2002,Modèle d'endommagement par fatigue : Application aux enrobés bitumineux , *Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes*.
- Bodin D., Chantal de La Roche, J. M. Piau et Gilles Pijaudier-Cabot, (2003) , Prediction of the intrinsic damage during bituminous mixes fatigue tests, in *proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, 14-16 April, Zurich, Switzerland*.
- LCPC et SETRA, 1994, Conception et dimensionnement des structures de Chaussées , *Guide Technique*.
- Lefeuvre Y., (2001), Etude expérimentale et modélisation de la fissuration des matériaux bitumineux , *Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.
- Patzák B., Jirásek M. , (2001),Consistent tangent stiffness for non local material models, in *Proceedings of the European Conference on Computational Mechanics, ECCM-2001, Cracow, Poland*.
- Peerling R. H. J., Brekelmans W. A. M., de Borst R., Geers M. G. D., (2000), Gradient-enhanced damage modelling of high-cycle fatigue, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **49**, n°12, pp. 1547-1569.
- Piau J.-M., (1989), Modélisation thermomécanique du comportement des enrobés bitumineux , *Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, **163**, pp.41-55.
- Pijaudier-Cabot G, Bažant Z. P. (1987), Nonlocal damage theory, *Journal of Engineering Mechanics*, **113**, n 10, pp. 1512-1533.
- Suresh, (1998), *Fatigue of Materials*, University of Cambridge, 2nd Edition.