



HAL
open science

Endommagement par fatigue des matériaux bitumineux - Recherche de lois d'évolution de l'endommagement

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. Endommagement par fatigue des matériaux bitumineux - Recherche de lois d'évolution de l'endommagement. Matériaux 2002, Oct 2002, Tours, France. hal-01685955

HAL Id: hal-01685955

<https://hal.science/hal-01685955>

Submitted on 16 Jan 2018

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.

Endommagement par fatigue des matériaux bitumineux

Recherche de lois d'évolution de l'endommagement

Didier Bodin¹ — Armelle Chabot¹ — Chantal de La Roche¹ — Gilles Pijaudier-Cabot²

¹⁾ *Division Matériaux et Structures de Chaussées*

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Route de Bouaye, BP 4129, F-44341 Bouguenais cedex

Tél.33 (0) 2 40 84 58 13/ Fax.: 33(0) 2 40 84 59 94 / E-Mail : Didier.Bodin@lcpc.fr

Tél.33 (0) 2 40 84 58 14/ Fax.: 33(0) 2 40 84 59 94 / E-Mail : Armelle.Chabot@lcpc.fr

Tél.33 (0) 2 40 84 59 29/ Fax.: 33(0) 2 40 84 59 94 / E-Mail : Chantal.De-La-Roche@lcpc.fr

²⁾ *R&DO, Laboratoire de Génie Civil de Nantes Saint-Nazaire*

Ecole Centrale de Nantes,

BP 92101, F-44321 Nantes cedex 3

Tél. 33 (0) 2 40 37 16 60/ Fax.: 33(0) 2 40 37 25 35 / E-Mail : Gilles.Pijaudier-Cabot@ec-nantes.fr

RÉSUMÉ. Afin de prévoir la fissuration des chaussées bitumineuses engendrée par le passage répété de poids lourds, on dimensionne leurs matériaux par leur résistance à rupture en fatigue. Sur l'essai français normalisé de poutre console trapézoïdale soumise à une flexion sinusoïdale (norme NF P 98-261-1), leur durée de vie est définie conventionnellement comme le nombre de cycles nécessaire pour atteindre la moitié de la raideur initiale. Pour modéliser plus finement l'évolution du comportement de ces matériaux, on choisit, dans la littérature, une loi d'évolution de dommage associée à une méthode de saut de cycle que l'on implante dans un code aux éléments finis. Les paramètres de cette loi sont identifiés en fonction de la droite de fatigue du matériau et de l'ajustement de la réponse analytique du modèle aux données expérimentales de traction - compression. En non-local, on obtient une très bonne prédiction à grands nombres de cycles de l'évolution du dommage avant rupture macroscopique du matériau (Bodin et al., 2001), (Bodin et al., 2002). Une modification de cette loi est ici recherchée pour affiner ces prédictions jusqu'à rupture totale de l'éprouvette de flexion.

MOTS-CLÉS : endommagement, rupture, modèle non-local, fatigue, enrobés bitumineux

1. Introduction

Le passage répété de charges roulantes de poids lourds sur les chaussées entraîne des dégradations progressives des structures et/ou des matériaux. 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, 1989) (Lefeuve, 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), (Bodin *et al.*, 2002). L'identification des paramètres du modèle est faite sur les essais uniaxiaux de fatigue en traction compression à amplitude de déplacement constante. On applique le modèle ainsi identifié aux essais de flexion. Deux types de loi d'évolution de l'endommagement sont utilisées. La seconde expression intègre un changement de régime qui accélère la vitesse d'endommagement. Dans un dernier point on examine, dans le cas de la fatigue uniaxiale, si les lois d'évolution obtenues conduisent à la bifurcation du modèle durant le processus de fatigue.

2. Modèle d'endommagement et simulation

On étudie des essais de fatigue sinusoïdaux à grands nombres de cycles, pour de faibles niveaux de sollicitation. Dans ce contexte, la dissipation visqueuse et les couplages thermomécaniques associés aux matériaux bitumineux peuvent être négligés (de La Roche *et al.*, 1998) (Bodin *et al.*, 2003). De plus, le matériau est soumis à un régime harmonique permanent ou pseudo-permanent qui permet d'envisager le problème viscoélastique en terme de module complexe. Le modèle est ainsi basé sur un comportement homogène élastique linéaire isotrope. Le module d'Young du matériau est pris égal à la norme du module complexe dans les conditions de fréquence et de température des essais considérés. Dans ce cadre, on construit un modèle d'endommagement isotrope en introduisant la variable scalaire D . On associe, à l'échelle microscopique, la variation de l'endommagement à un mécanisme d'ouverture de fissures (Lefeuve, 2001) provoqué par la traction directe. On utilise un critère d'endommagement exprimé en terme de déformation équivalente, $\tilde{\varepsilon}$. Il est inspiré du critère de Rankine (Patzak *et al.*, 2001) sur la contrainte effective. On retient initialement une loi d'évolution de l'endommagement D utilisée en fatigue (Paas, 1990). Cette loi, à trois paramètres C , α et β , s'écrit :

$$\dot{D} = f(D) \tilde{\varepsilon}^\beta \left\langle \frac{\dot{\tilde{\varepsilon}}}{\tilde{\varepsilon}} \right\rangle \text{ avec } f(D) = CD^\alpha \quad [1]$$

Dans le but de décrire le processus de rupture complet des structures étudiées, on adopte une modélisation non-locale de l'endommagement qui limite la localisation des déformations (Pijaudier *et al.*, 1987). Cette méthode conduit à l'introduction d'un autre paramètre, la longueur interne du matériau notée l_c . Pour les simulations d'essais de flexion, la valeur de l_c a été fixée à partir de valeurs usuelles pour le béton de ciment estimées à trois fois la taille du plus gros granulat (Bažant *et al.*, 1989) car aucune valeur n'est connue, actuellement, pour les enrobés bitumineux. Ce paramètre reste néanmoins influant sur les simulations de fatigue mais son effet n'est pas discuté ici.

L'implantation numérique du modèle dans un code élément finis 3D (castem2000) a intégré la programmation d'une technique d'approximation de l'intégration temporelle pour la fatigue à grands nombres de cycles (Peerlings *et al.*, 2000) (Bodin *et al.*, 2001). Le cas simple du chargement uniaxial à amplitude de déformation constante sert à la validation du programme (Bodin *et al.*, 2002a). Cette technique basée sur la variation lente, de cycle en cycle, des variables internes du système mécanique, permet une approche opérationnelle applicable à d'autres phénomènes cycliques rencontrés dans le domaine des chaussées (tassements des assises, orniérage, ...).

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 identique (granulats 0-6mm, bitume pur 50/70) testé dans les mêmes conditions de fréquence et de température (10°C-10Hz).

L'application aux essais de fatigue sur enrobés bitumineux s'effectue en deux temps. Premièrement, l'identification des paramètres d'évolution de l'endommagement est faite, sur les phases I et II, par ajustement du modèle sur des résultats expérimentaux de fatigue en traction compression d'éprouvettes cylindriques (Bodin *et al.*, 2002b). Le coefficient β est directement lié à la pente de la droite de fatigue du matériau. Les deux autres, α et C , sont déterminés par la méthode des moindres carrés sur l'évolution, en fonction du nombre de cycles, de la rigidité des échantillons testés en uniaxial. Sur les essais de fatigue en flexion à déplacement contrôlé, un calage "moyen" (trait continu, $\beta = 5$, $\alpha = -2.39$ et $C = 3,16.10^{16}$) encadré par un fuseau correspondant aux calages "extrêmes" des paramètres α et C donne des simulations que l'on compare aux données expérimentales (figure 1.a). Ce dernier point permet d'apprécier les différences auxquelles peut conduire le caractère dispersé des résultats expérimentaux de fatigue. Avec cette loi d'endommagement [1], on constate une bonne description de l'évolution de la raideur des essais de flexion dans le domaine d'évolution correspondant aux phases I et II. Les divergences observées en phase III restent cohérentes avec la procédure de calage qui est elle-même limitée à ces deux premières phases. Afin de modéliser l'accélération du processus de microfissuration caractérisée par un changement de régime, on intègre cet effet dans la fonction $f(D)$ comme décrit ci-dessous.

3. Changement de régime

Le changement de régime est ainsi postulé sur la base des observations expérimentales qui montrent que l'évolution de l'endommagement s'accélère à nouveau en phase III après s'être "ralenti" durant la phase II (Figure 2). Sur la base des bonnes simulations des phases I et II, on conserve la forme générale de la loi d'évolution du dommage écrite en [1] et on cherche à affiner la forme mathématique de la fonction $f(D)$. Plusieurs formes, types exponentielles par exemple, peuvent être envisagées afin d'accélérer ce processus de rupture. Notre choix a été guidé par le processus de calage des paramètres qui consiste à utiliser une intégration analytique simple et un seul paramètre supplémentaire par rapport à la loi de Paas. Cette recherche conduit à l'expression ci-dessous [2]:

$$\dot{D} = f(D) \tilde{\varepsilon}^\beta \left\langle \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon} \right\rangle \text{ avec } f(D) = \frac{\alpha_{II}}{\alpha_{III} \alpha_I} \left(\frac{D}{\alpha_{II}} \right)^{1-\alpha_I} \underbrace{\exp \left(\frac{D}{\alpha_{II}} \right)^{\alpha_I}}_{\rightarrow \text{chgt. de régime}} \quad [2]$$

Notons pour information, la forme exponentielle simple suivante qui nous a conduit à la loi [2]

$$\int \frac{dD}{f(D)} = \alpha_{III} \exp \left(- \left(\frac{D}{\alpha_{II}} \right)^{\alpha_I} \right) \quad [3]$$

Ce type de loi est mis en oeuvre par la même procédure de calage sur des essais uniaxiaux des phases I et II que pour la précédente. Ces essais sont interrompus avant la phase III pour des raisons métrologiques. Le calage de la phase III est donc effectué par calage inverse sur l'essai structural (2D) de flexion. On constate ainsi que, les résultats obtenus en raideur normalisée par la raideur initiale sont, sous calage moyen des coefficients ($\alpha_I = 3.07$, $\alpha_{II} = 0.5$ et $\alpha_{III} = 4.73.10^{-19}$), en bon accord avec le démarrage de la phase III (figure 1.b). Au début du processus de fatigue, le terme de changement de régime n'intervient pas, on retrouve le lien avec la loi de précédente par le biais des coefficients ($C = 3,16.10^{16}$ est proche de $[(\alpha_{II} \wedge \alpha_I) / (\alpha_I \alpha_{III})] = 8.38.10^{16}$ et $\alpha = -2,39$ est proche de $(1-\alpha_I) = -2.07$).

Le calage de cette loi d'endommagement permet de décrire la transition de l'endommagement avant rupture de l'échantillon. Son caractère prédictif est en cours de validation sur une autre géométrie d'essai de fatigue, l'essai de fatigue en cisaillement du LCPC (Bodin, 2000).

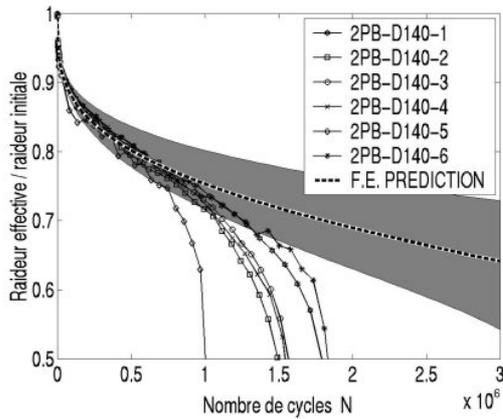


Figure 1a . Loi d'évolution de dommage [1]

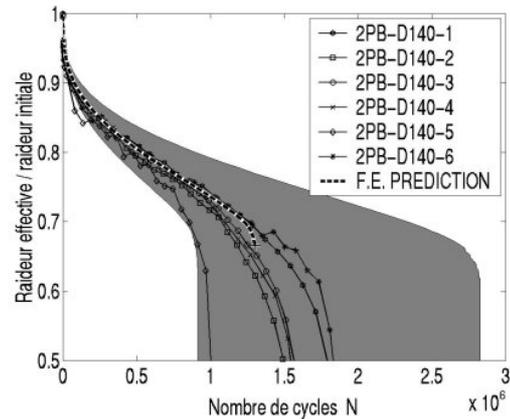


Figure 1b . Loi d'évolution de dommage [2]

Figure 1. Comparaison des évolutions de raideurs normalisées simulées et des résultats expérimentaux de fatigue sur éprouvette de flexion ($\epsilon_{max} = 140.10^{-6}$) sur enrobés bitumineux (granulats 0-6mm, bitume 50/70)

4. Régularité du modèle d'endommagement

Le caractère adoucissant que confèrent les modèles d'endommagement peut conduire à une indétermination du problème d'équilibre lorsque la rigidité tangente s'annule en un point de la structure. Afin d'examiner ce point particulier dans le cas de la fatigue, on étudie la condition de bifurcation dans le cas d'un solide infini soumis à un chargement uniaxial. Partant d'un état d'équilibre (ϵ_0, D_0), l'équation d'équilibre en vitesse autour de cet état est donnée classiquement par la divergence du taux de contrainte. Cette équation peut être développée en prenant en compte la loi de comportement "endommageant" et conduit à la condition de bifurcation [4] :

$$(1 - D_0) - \frac{dD}{d\epsilon} \epsilon_0 = 0 \quad [4]$$

Dans l'espace (ϵ, D), on représente (figure 2) les états d'équilibre successifs obtenus pour les chargements monotone ou cyclique et les points correspondant à la condition de bifurcation. La bifurcation apparaîtra lors de l'intersection des deux courbes. Pour un chargement monotone, la bifurcation se produit classiquement avant que l'endommagement ne soit égal à 1, lorsque l'on atteint le pic de la loi de comportement. En revanche, pour les chargements de fatigue à amplitude de déformation constante ϵ_a le caractère borné de la déformation empêche pour les lois utilisées ici d'atteindre cet état avant la fin du processus de fatigue (figure 2).

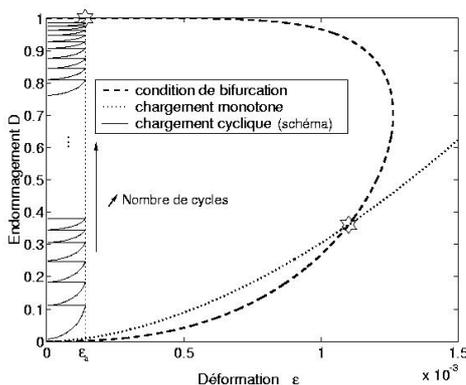


Figure 2a . Loi d'évolution de dommage [1]

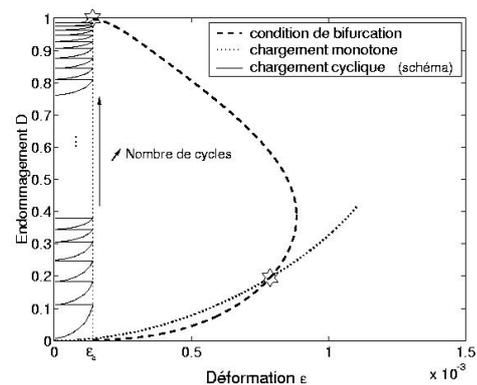


Figure 2b . Loi d'évolution de dommage [2]

Figure 2. Comparaison des conditions d'obtention de la bifurcation pour un chargement cyclique et un chargement monotone (valeur de ϵ_a représentée = $140 \cdot 10^{-6}$)

On observe, dans le cas uniaxial, que l'intersection entre l'historique d'endommagement et la condition de localisation n'est possible que pour des états d'endommagements proche de 1. On retrouve ce résultat également

dans le cas tridimensionnel (Peerlings *et al.*, 2000). Pour la loi [2], et pour certains triplets de coefficients, on peut obtenir, la bifurcation avant la rupture. Ce type de paramétrage ne correspond pas à la description du comportement des enrobés bitumineux étudiés ici.

5. Conclusion

La fissuration par fatigue constitue un mécanisme de ruine des chaussées bitumineuses que l'on cherche à prendre en compte dans les méthodes de dimensionnement. Pour affiner les formules employées, on cherche à prédire la durée de vie des matériaux. Un modèle d'endommagement par fatigue est construit, associé au traitement des chargements à grand nombre de cycles permettant des simulations éléments finis 3D.

Partant d'essais de fatigue en laboratoire, un modèle d'endommagement classique permet de simuler la perte de raideur des échantillons correspondant aux deux premières phases du processus de fatigue. La nouvelle loi présentée, intégrant un changement de régime menant à la rupture, permet la simulation de la totalité du processus de fatigue pour des essais de flexion. Pour les modèles présentés, dans le cas de la fatigue des enrobés bitumineux, il n'apparaît pas de risque de bifurcation avant la fin du processus local de ruine. Ceci permet d'assurer la stabilité numérique des simulations pour des états de dégradation précédant l'apparition de la microfissuration. Des validations de la loi intégrant le changement de régime sont en cours sur des essais de fatigue en cisaillement.

6. Bibliographie

- Bazant Z. P., Pijaudier-Cabot G., « Measurement of characteristic length of nonlocal continuum ». *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 115, n° 4, 1989, p. 755-767.
- Bodin D., Résultats et interprétation d'essais sur la machine de cisaillement du LCPC. Rapport de recherche Division MSC, juillet 2000, LCPC.
- Bodin D., Chabot A., De la Roche C., Piau J. M., Pijaudier-Cabot G., « 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., Pijaudier-Cabot G., de La Roche C., Chabot A., « A continuum Damage Approach of Asphalt Concrete Fatigue Tests ». *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, June 2-5 2002a, Columbia University, New York, USA.
- Bodin D., de La Roche C., Piau JM., Pijaudier-Cabot G., « A damage approach for asphalt mixture fatigue tests ». *9th International Conference on Asphalt Pavements*, Aout 2002b, Copenhagen, Denmark.
- Bodin D., Pijaudier-Cabot G., de La Roche C., Chabot A., « Application d'un modèle d'endommagement aux essais de fatigue sur enrobés bitumineux ». *3^{ème} Réseau Doctoral de Génie Civil*, 11-13 mars 2002c, Aussois, France.
- Bodin D., de La Roche C., Piau JM., Pijaudier-Cabot G., « Prediction of the Intrinsic damage during bituminous mixes fatigue tests ». *International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials*, 14-16 April 2003, Zurich, Switzerland.
- de La Roche C., Piau JM., Dangla P., « Thermal effects induced by viscoelastic dissipation during fatigue tests on bituminous mixtures ». *6th International Symposium On Creep and Coupled Process*, 23-25 sept., Bialowieza, Poland.
- Lefevre Y., Etude expérimentale et modélisation de la fissuration de matériaux bitumineux. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2001.
- Paas R.H.J.W., Continuum damage mechanics with an application to fatigue. Phd'thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands, 1990.
- Patzák B., Jirásek M., « Consistent tangent stiffness for non local material models ». *European Conference on Computational Mechanics*, ECCM-2001, Cracow, Poland.
- Peerling R. H. J., Brekelmans W. A. M., de Borst R., Geers M. G. D., « Gradient-enhanced damage modelling of high-cycle fatigue ». *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 49, n° 12, p. 1547-1569.
- Piau JM., « Thermomechanical modelling of the behavior of bituminous mixes ». *Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, vol. 163, p. 41-55.
- Pijaudier-Cabot G., Bazant Z. P., « Nonlocal damage theory ». *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 113, n° 10, p. 1512-1533.