



HAL
open science

Essais de fatigue sur enrobés bitumineux et perspectives de modélisation par la mécanique de l'endommagement

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

► To cite this version:

Didier Bodin, Armelle Chabot, Chantal de La Roche, Jean-Michel Piau, Gilles Pijaudier-Cabot. Essais de fatigue sur enrobés bitumineux et perspectives de modélisation par la mécanique de l'endommagement. 15ème Congrès Français de Mécanique, Sep 2001, Nancy, France. hal-01677043

HAL Id: hal-01677043

<https://hal.science/hal-01677043>

Submitted on 16 Jul 2023

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.

ESSAIS DE FATIGUE SUR ENROBÉS BITUMINEUX ET PERSPECTIVES DE MODÉLISATION PAR LA MÉCANIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT

Didier BODIN*, Armelle CHABOT*, Chantal de la ROCHE*, Jean Michel PIAU*,
Gilles PIJAUDIER-CABOT**

* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Route de Bouaye - B.P. 4129, 44341 BOUGUENAIS cedex, France
** Laboratoire de Génie Civil de Nantes Saint-Nazaire
Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 44321 NANTES cedex 3, France

Résumé :

Le comportement en fatigue des enrobés bitumineux est à la base du dimensionnement français des structures de chaussées bitumineuses épaisses. Il est évalué à partir d'essais de fatigue en laboratoire. La nature hétérogène du matériau et le comportement viscoélastique thermosensible du bitume rendent complexe leur interprétation. Nous proposons d'appliquer la mécanique de l'endommagement à ces essais. Un endommagement isotrope est choisi ainsi que des algorithmes de calculs cycliques par éléments finis. Puis, nous proposons une loi d'évolution du dommage pouvant s'appliquer à diverses configurations expérimentales d'essais de fatigue.

Abstract :

French pavement structure design method is based on bituminous mixes fatigue behavior which is estimated by laboratory fatigue tests. The heterogeneous character of the material coupled with the thermoviscoelasticity of the bituminous matrix complicate the interpretation of cyclic tests. We propose to apply damage mechanics to these tests. An isotropic damage is chosen as well as a cyclic calculation scheme for finite element implantation. Then, a damage evolution law which will be tested on various experimental fatigue test conditions is presented.

Mots clés :

essais de fatigue, mécanique de l'endommagement, enrobés bitumineux

1 Introduction

Le caractère répété du chargement des chaussées conduit à des phénomènes de fatigue. Les passages successifs des charges roulantes entraînent une dégradation progressive des matériaux qui peut mener à la ruine de la structure. Afin d'apprécier la capacité des matériaux employés à résister aux chargements cycliques, on effectue des essais de fatigue en laboratoire sur des éprouvettes de matériau. Ils consistent à appliquer une sollicitation sinusoïdale d'amplitude constante sur une éprouvette de matériau jusqu'à rupture.

Les enrobés bitumineux sont des matériaux reconstitués à partir de granulats (0-6 mm pour le mélange étudié) qui forment le squelette dont la cohésion est assurée par du bitume. Le mélange obtenu est un matériau hétérogène auquel la matrice confère des propriétés viscoélastique, mais ses caractéristiques sont fortement dépendantes de la température. La modélisation de la dépendance thermique et temporelle des caractéristiques est acquise dans le domaine des petites perturbations. Un modèle rhéologique (Huet, 1963) intègre ces dépendances et a déjà permis de construire un modèle numérique de calcul thermo-élastique cyclique pour les enrobés bitumineux (De La Roche *et al.*, 1998). Un aspect moins connu reste la cicatrisation du matériau qui a lieu lors de phases de repos (Francken *et al.*, 1997). Ces comportements

et phénomènes sont intégrés dans la réponse d'un essai de fatigue ce qui rends complexe les interprétations expérimentales et la démarche de modélisation.

De nombreux essais de fatigue existent pour les enrobés bitumineux (Francken *et al.*, 1997). On peut citer les essais de flexion 2, 3 ou 4 points, ceux de traction-compression, ceux de cisaillement... Généralement, Dans cet article, nous présentons des résultats d'essais de fatigue à amplitude de déplacement imposée effectués sur la machine de cisaillement du LCPC. Ensuite, nous nous placerons dans la cadre de la mécanique de l'endommagement qui ouvre des perspectives de simulation des essais de fatigue en laboratoire. Enfin, nous présenterons les expressions de loi d'évolution susceptible de bien s'appliquer aux enrobés bitumineux.

2 Expérience de fatigue en cisaillement

Les difficultés pour réaliser des essais de fatigue homogènes en cisaillement direct ont conduit les concepteurs de la machine de cisaillement du LCPC (Assi, 1981) à une géométrie d'éprouvette particulière. Conçue prismatique, sa section centrale est réduite comme le montre la figure 1. Pour l'étude proposée, la plus petite dimension correspond à environ huit fois la taille du plus gros granulat.

La sollicitation consiste à déformer l'échantillon par déplacement relatif de ses faces latérales. L'état de contrainte obtenu est un état de cisaillement pur relativement homogène au centre, cependant perturbé aux quatre coins de l'échantillon par des contraintes de traction. La figure 2 représente les contraintes principales calculées en élasticité pour un quart d'éprouvette (hypothèse de double antisymétrie).

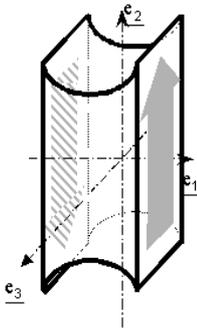


FIG. 1 – Géométrie de l'échantillon schématisation de la sollicitation appliquée.

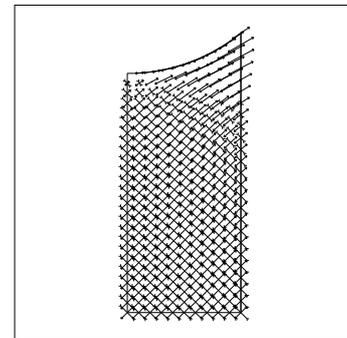
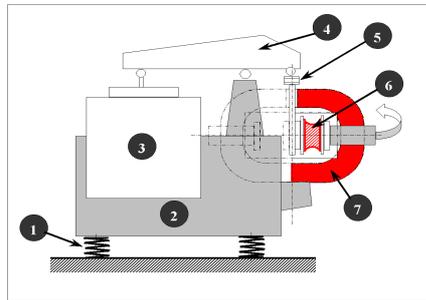


FIG. 2 – Contrainte principales montrant l'état de cisaillement homogène au centre.

La machine utilisée pour les essais de fatigue est présentée figure 3. La force générée par le pot vibrant ③ est transmise par la poutre ④ et appliquée à une face de l'éprouvette ⑥ alors que l'autre face est maintenue fixe et liée au porte échantillon ⑦. Les mesures macroscopiques de la force et du déplacement relatif des deux faces de l'échantillon constituent l'essentiel de la mesure. Un système d'asservissement électronique permet d'appliquer un chargement quelconque mais nous nous sommes limité ici à des signaux sinusoïdaux. La fréquence est de 10 Hz (première harmonique d'un signal routier correspondant au passage d'un essieu à 70 km/h) et l'amplitude de déplacement constante. L'ensemble du dispositif est enfermé dans une enceinte thermique maintenue à température constante fixée à 10°C.



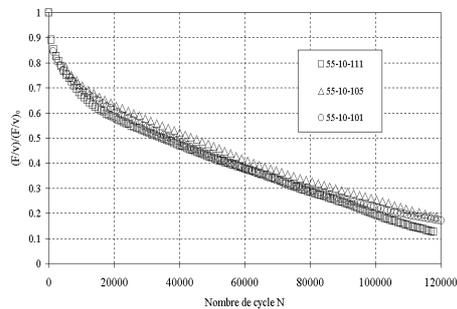
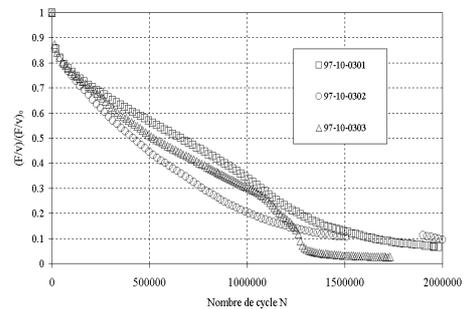
- ❶ système antivibration,
- ❷ bâti massif en béton,
- ❸ pot vibrant (moteur de l'excitation),
- ❹ poutre de transmission d'effort,
- ❺ capteur de force,
- ❻ échantillon testé,
- ❼ bâti métallique et système porte éprouvette.

FIG. 3 – Machine de fatigue en cisaillement du LCPC.

2.1 Résultats d'essai

Les résultats d'essai de cisaillement ont été obtenus pour deux niveaux de sollicitation. Les déplacements appliqués à l'éprouvette entraînent respectivement une amplitude de déformations de cisaillement de $\varepsilon_{12} = 250.10^{-6}$ et $\varepsilon_{12} = 150.10^{-6}$.

On définit la raideur macroscopique F/v comme le rapport de l'amplitude de la force sur l'amplitude du déplacement. Les figures 4 et 5 représentent l'évolution de la raideur macroscopique F/v normée par la raideur initiale $(F/v)_0$ en fonction du nombre de cycles N .

FIG. 4 – Essais $\varepsilon_{12} = 250.10^{-6}$ à 10°C et 10 Hz .FIG. 5 – Essais $\varepsilon_{12} = 150.10^{-6}$ à 10°C et 10 Hz .

2.2 Interprétation

Par convention, on considère que la durée de vie de l'éprouvette est atteinte lorsque sa raideur chute de 50%. Les figures 4 et 5 montrent trois principaux régimes d'évolution de la perte de rigidité. Des observations similaires ont été faites sur des essais de flexion deux points (Lefeuvre, 2001) pour lesquels les différentes phases correspondent à :

1. une microfissuration diffuse dans tout le corps de l'échantillon et un échauffement dû aux dissipations visqueuses au sein de la matrice viscoélastique (pour les essais présentés figure 4 par exemple un accroissement de $2,5^{\circ}\text{C}$ est mesuré au centre de l'éprouvette entraînant une perte de module de 16%) ;
2. la croissance des microfissures ou cavités créées cohabite avec une stabilisation du régime thermique ;
3. la phase finale qui correspond à l'interconnexion par coalescence du réseau de fissures pour aboutir à la macrofissuration de l'éprouvette et à sa rupture.

L'observation des **faciès de rupture** en fin d'essai (figure 6) donne une voie phénoménologique d'interprétation (Bodin, 2000). La taille des hétérogénéités joue un rôle important sur

la diffusion ou non des forts gradients de contraintes localisés dans les "coins" de l'éprouvette (figure 2). Des expériences sur sable bitume ont montré la forte sensibilité à la rupture dans ces zones conduisant à une rupture en forme de tonneau inacceptable dans l'objectif de rupture par cisaillement. Les dissymétries observées sur les fissures sont expliquées par une légère dissymétrie des conditions aux limites mesurée sur des éprouvettes élastiques et homogène (Bodin, 2000). Les courbes de Wöhler sont utilisées pour étudier l'influence du niveau de sollicitation

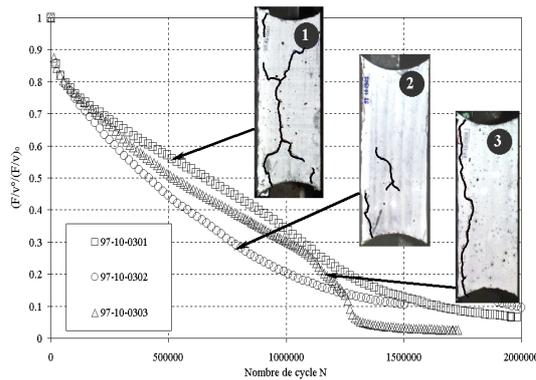


FIG. 6 – Faciès de rupture et influence sur la réponse en fatigue.

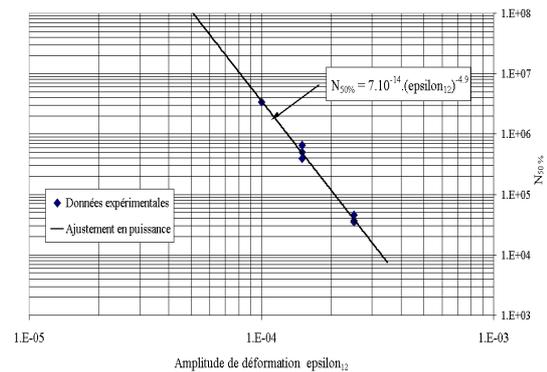


FIG. 7 – Courbe de fatigue pour différents niveaux de sollicitation (10°C et 10 Hz).

des essais de fatigue sur enrobés bitumineux. Si la sollicitation S est l'amplitude de déformation et N la durée de vie conventionnelle en nombre de cycle. Chaque essai correspond à un point dans le plan $S - N$.

L'ajustement par une droite (figure 7) dans le diagramme log-log permet d'approcher la courbe de fatigue du matériau. Les conclusions doivent cependant être relativisées car le nombre d'essai est, pour l'instant, relativement faible (7 essais). La pente de 4,9 obtenue est cependant en bon accord avec une valeur proche de 5 commune aux divers essais de fatigue sur enrobés bitumineux (Francken *et al.*, 1997).

3 Modélisation par la mécanique de l'endommagement

Pendant les essais de fatigue sur enrobés bitumineux, de nombreux phénomènes physiques se superposent et conduisent à la diminution de la raideur de l'échantillon. La mécanique de l'endommagement offre un cadre de modélisation pour traduire la création de microfissuration au sein du matériau avant leur coalescence. Tel est l'objet de l'étude bibliographique présentée comme cadre à notre problème, restreint dans un premier temps à l'élasticité couplée à un endommagement isotrope.

On considère que l'endommagement est isotrope représenté par une variable scalaire D pilotée par l'état de déformation. Pour prendre en compte la sensibilité de l'endommagement à certaines composantes du tenseur de déformation, on définit une déformation équivalente $\tilde{\epsilon}$ (1) (où $\langle \epsilon_i \rangle$ est la partie positive des déformations principales ϵ_i) :

$$\tilde{\epsilon}(\underline{\underline{\epsilon}}) = \sqrt{\sum_{i=1,2,3} \langle \epsilon_i \rangle^2} \quad (1)$$

Cette expression traduit la sensibilité de l'endommagement aux déformations d'extensions comme pour l'endommagement des bétons hydrauliques (Mazars, 1984).

La prise en compte du **cumul de l'endommagement de cycle en cycle** passe, par exemple (Peerlings, 1999), par la définition d'un seuil κ_0 donné et propre au matériau. La loi d'évolution du dommage s'écrit alors :

$$\dot{D} = \begin{cases} g(\tilde{\varepsilon}, D) < \tilde{\varepsilon} > & \text{si } \tilde{\varepsilon} > \kappa_0 \text{ et } D < 1 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2)$$

$g(D, \tilde{\varepsilon})$ étant la loi d'évolution de l'endommagement et $\tilde{\varepsilon}$ le taux de déformation équivalente.

La non-linéarité du matériau introduite par l'endommagement impose une discrétisation de l'histoire du chargement. Pour des raisons d'optimisation du temps de calcul, il n'est pas envisageable de décomposer un historique d'essais de fatigue pouvant comprendre jusqu'à 10^6 cycles.

Pour se faire, on adopte une technique développée (Peerlings, 1999) pour l'endommagement par fatigue pour une **intégration approchée sur un grand nombre de cycle**. Cette méthode prévoit de considérer des pas de temps Δt qui couvre ΔN cycles.

On suppose, à l'échelle de l'essai, un variation faible de l'endommagement D à chaque cycle. Cette hypothèse permet l'approximation suivante (3).

$$D(t + \Delta t) = D(t) + \int_t^{t+\Delta t} \dot{D}(\tau) d\tau \approx D(t) + \frac{1}{2} (\dot{D}^t + \dot{D}^{t+\Delta t}) \Delta t \quad (3)$$

Pour illustrer cette démarche, prenons l'exemple unidimensionnel d'essais de traction compression sinusoïdaux. L'historique de déformation équivalente est pseudo-périodique (figure 8). Pour le cycle n , le demi cycle d'extension et de contraction ont respectivement pour amplitude $\tilde{\varepsilon}_{a+}^n$ et $\tilde{\varepsilon}_{a-}^n$.

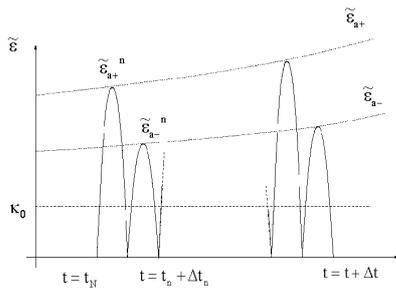


FIG. 8 – Evolution des déformations équivalentes pour un essai de traction compression cyclique simple.

L'intégrale temporelle sur la durée Δt (3) contenant ΔN cycles se transforme en somme discrète pour les ΔN cycles.

$$D^{t+\Delta t} = D^t + \sum_{n=N}^{N+\Delta N} \int_{t_n}^{t_n+\Delta t_n} \dot{D}(\tau) d\tau \quad (4)$$

où t_n et $t_n + \Delta t_n$ correspondent respectivement au début et à la fin du cycle n et N et $N + \Delta N$ le nombre de cycles à t et $t + \Delta t$.

En prenant en compte que la croissance de l'endommagement n'est possible que pour $\tilde{\varepsilon}$ croissante supérieure au seuil κ_0 , on peut réécrire (3) avec la loi d'évolution (2).

$$D^{N+\Delta N} = D^N + \underbrace{\sum_{n=N}^{N+\Delta N} \left(\int_{\kappa_0}^{\tilde{\varepsilon}_{a+}^n} g(D, \tilde{\varepsilon}) d\tilde{\varepsilon} + \int_{\kappa_0}^{\tilde{\varepsilon}_{a-}^n} g(D, \tilde{\varepsilon}) d\tilde{\varepsilon} \right)}_{G(D, \tilde{\varepsilon})} \quad (5)$$

Cette relation sous entend que les amplitudes $\tilde{\varepsilon}_{a+}^n$, et $\tilde{\varepsilon}_{a-}^n$ sont supérieures à κ_0 . La fonction $G(D, \tilde{\varepsilon})$ correspond à la croissance de l'endommagement pendant le cycle n (5).

Si on applique la formule d'intégration approchée (3), la somme sur tous les cycles dans (5) peut-être approchée par la moyenne des intégrales sur un cycle calculée au début et à la fin

de l'incrément multipliée par le nombre de cycle ΔN contenu dans l'incrément, ainsi :

$$D^{N+\Delta N} = D^N + \frac{1}{2} \{G(D^N, \tilde{\varepsilon}_a^N) + G(D^{N+\Delta N}, \tilde{\varepsilon}^{N+\Delta N})\} \Delta N \quad (6)$$

La valeur $D^{N+\Delta N}$ a priori inconnue peut être approchée par une valeur prévisionnelle D^P évitant un nouveau calcul itératif : $D^P = D^N + G(D^N, \tilde{\varepsilon}_a^N) \Delta N$.

Ce cadre de travail permet le test de **loi d'évolution de l'endommagement** pour les enrobés. La littérature fournit des expressions du type (7) que nous pensons adapter aux enrobés bitumineux.

$$g(D, \tilde{\varepsilon}) = CD^{\alpha} \varepsilon^{\beta} \quad \text{ou} \quad g(D, \tilde{\varepsilon}) = Ce^{\alpha \cdot D} \varepsilon^{\beta} \quad (7)$$

Les résultats des essais de fatigue donnent certains critères de choix des coefficients : α sera pris négatif afin d'obtenir une saturation progressive de l'endommagement et le coefficient β tel que $\beta - 1$ soit égal au coefficient de la droite de fatigue (voir figure 7).

Les observations expérimentales (paragraphe 2.2) sur l'influence de la taille des hétérogénéité pourront alors être abordées par l'utilisation du traitement non-local de l'endommagement (Pijaudier-Cabot *et al.*, 1987) permettant d'introduire indirectement leur influence sur le comportement macroscopique.

4 Conclusion

Ce travail constitue l'ébauche d'une démarche globale de prédiction de la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux. L'implantation du modèle d'endommagement dans un code de calcul aux éléments finis (castem 2000) est en cours. La pertinence de la modélisation simplifiée sera validée par de nombreux résultats d'essais pour différentes géométries d'éprouvettes et différents types de sollicitations. Ce travail pourra être complété par la prise en compte de phénomènes supplémentaires comme le couplage thermique ou la prise en compte du phénomène d'autoréparation.

Références

- Assi M., 1981, Une méthode d'étude du comportement des enrobés bitumineux à la fatigue en cisssion, *Thèse de docteur ingénieur, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.
- Bodin D., (2000), Résultats et interprétation d'essais sur la machine de cisaillement du LCPC, *Rapport interne LCPC - DMSC*.
- De La Roche C., Piau J. M. et Dangla P., (1998), Thermal effects induced by viscoelastic dissipation during fatigue tests on bituminous mixtures, *Proceeding of the 6th Int. Symposium on Creep and Coupled Processes, Bialowieza, sept. 23-25, Poland*.
- Francken L., Di Benedetto H. et de La Roche C. (1997), Bituminous Binders and Mixtures, State of the art and Interlaboratory tests on mechanical behaviour and mix design., *RILEM report n°17*, Chapman & Hall.
- Huet C., (1963), Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés, *Thèse de doctorat à la faculté des sciences, Université de Paris*.
- Lefeuvre Y., (2001), Etude expérimentale et modélisation de la fissuration des matériaux bitumineux, *Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.
- Mazars J., (1984), Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture des bétons de structure, *Thèse de doctorat, Université de Paris 6*.
- Peerlings R. H. J., (1999), Enhanced damage modelling for fracture and fatigue, *PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands*.
- Pijaudier-Cabot G, Bazant Z. P. (1987), Nonlocal damage theory, *Journal of Engineering Mechanics*, **113**, n°10, pp. 1512-1533).