

Modélisation intrinsèque de la fissuration par fatigue des enrobés bitumineux à partir de mesures de champs. Application à la correspondance entre différents types d'essais de fatigue

Ibishola Santos¹

¹ Université Gustave Eiffel – MAST-MIT

RESUME

L'objectif de ce travail est de simuler la réponse d'un enrobé bitumineux avec le passage d'un type d'essai de fatigue à un autre en utilisant un même jeu de paramètres matériau. Dans une première partie, des essais de fatigue en flexion sur poutre console et en flexion 4 points sur un sable bitume 0/2 sont réalisés avec des mesures de champs cinématiques et thermiques. Les analyses des champs cinématiques obtenus par corrélation d'images numériques et des champs thermiques obtenus par thermographie infrarouge montrent que la fissuration et l'échauffement thermique sont les principaux phénomènes observés au cours des essais. Une modélisation basée sur la fissuration et l'échauffement est alors développée dans une deuxième partie. Elle intègre un comportement viscoélastique, un couplage thermomécanique en associant la loi de Paris. Cette modélisation permet de simuler avec un bon accord avec les données expérimentales, les courbes de fatigue issues du passage des essais de fatigue en flexion sur poutre console aux essais en flexion 4 points au moyen d'un même jeu de paramètres.

Mots-clefs enrobés bitumineux ; essai de fatigue ; corrélation d'images numériques ; loi de Paris ; couplage thermomécanique

I. INTRODUCTION

L'essai de fatigue sur enrobés bitumineux (EB) est l'élément fondamental de la méthode de dimensionnement des structures de chaussées. Il existe plusieurs types d'essais de fatigue normalisés (NF EN 12697-24) tels que l'essai de fatigue en flexion sur poutre console utilisé en France, la flexion 4 points utilisé aux Etats-Unis, la traction indirecte utilisée en Allemagne, etc. Toutefois, pour un même enrobé bitumineux, les résultats varient en fonction du type d'essai pratiqué en se basant les méthodes d'interprétation actuelles (Di Benedetto et al., 2004; Cocurullo et al., 2008). Les concepteurs des structures de chaussées sont alors à la recherche d'une démarche pour effectuer le passage de la méthode de dimensionnement d'un pays à un autre. Pour ce faire, il est nécessaire de mettre au point d'une modélisation des essais de fatigue pour simuler le

passage d'un type d'essai à un autre. Une telle modélisation, qui est l'objectif de ce travail, est restée jusqu'à lors un challenge dans le domaine de la mécanique des chaussées (Bodin et al., 2003).

Les enrobés bitumineux (EB) sont des mélanges de granulats et de bitume conduisant à des hétérogénéités dans le matériau qui affectent la fissuration et les champs cinématiques dans une éprouvette. Ces effets peuvent être mesurés au cours des essais pour améliorer la compréhension des phénomènes se produisant, et guider la modélisation plus réaliste des essais.

Parmi les différentes méthodes de mesures sans contact, la corrélation d'images numériques (CIN) (Bornert et al., 2009) a déjà prouvé ses capacités à fournir les champs cinématiques et les données de fissuration dans le domaine de la mécanique des chaussées (Romeo, 2013) et en fatigue (Gao et al., 2016).

Dans cet article, la campagne d'essais de fatigue avec mesures des champs cinématiques et thermiques est présentée. Ensuite, la modélisation des essais de fatigue est développée puis appliquée aux données expérimentales.

II. ESSAIS DE FATIGUE AVEC MESURES DES CHAMPS CINEMATIQUES ET THERMIQUES

A. Matériau et essais de fatigue

Le matériau de référence de cette étude est un sable bitume 0/2 mm. Il est fabriqué à chaud dans un malaxeur par mélange entre granulats (0/2 mm) et bitume (50/70) dosé à 10,7% massique. L'enrobé bitumineux ainsi obtenu est compacté en plaque de dimensions $400 \times 600 \times 150 \text{ mm}^3$. Des éprouvettes trapézoïdales et prismatiques d'une compacité de 97% sont ensuite obtenues par sciage de ces plaques.

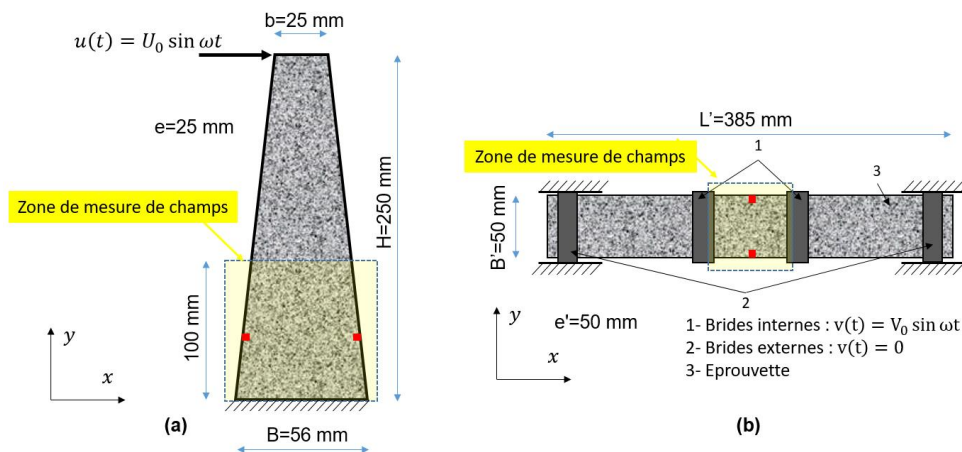


FIGURE 1. Principe des essais de fatigue et géométrie d'éprouvette, a) flexion sur poutre console, b) flexion 4 points

Les éprouvettes sont ensuite entaillées pour fixer le trajet de fissuration. Pour les éprouvettes trapézoïdales, une entaille horizontale est effectuée sur chacune des faces latérales de l'éprouvette à une hauteur de $6H/31$ de la grande base de l'éprouvette (Fig. 1-a). Cette hauteur correspond à la hauteur où, suivant le calcul de résistance des matériaux, les sollicitations sont maximales sur une

éprouvette vierge. En ce qui concerne les éprouvettes prismatiques, une entaille est réalisée sur chacune des faces horizontales de l'éprouvette au milieu de l'éprouvette (Fig. 1-b).

Deux types d'essais de fatigue ont été réalisés : l'essai de fatigue sur poutre console avec éprouvette trapézoïdale entaillées ou non, et l'essai de fatigue en flexion 4 points avec les éprouvettes prismatiques entaillées.

L'essai de fatigue sur poutre console consiste à appliquer un déplacement horizontal à amplitude constante en tête d'une éprouvette trapézoïdale dont la base est encastrée (Fig. 1-a). L'essai de fatigue en flexion 4 points consiste à appliquer un déplacement vertical d'amplitude constante à une éprouvette prismatique au moyen de deux brides internes. Deux brides externes servent à bloquer le déplacement vertical de l'éprouvette à ses extrémités (Fig. 1-b).

Tous les essais ont été réalisés en accord avec la norme NF EN 12697-24 à une température de 10 °C et une fréquence de 25 Hz. Pour chaque campagne d'essai, trois niveaux de déformation (300, 350 et 400 $\mu\text{m}/\text{m}$) ont été appliqués. Pour chaque niveau de déformation, 4 éprouvettes sont testées, ce qui conduit à un total de 36 éprouvettes testées pour l'ensemble de la campagne expérimentale.

B. Protocole de mesures de champs au cours des essais de fatigue

Au cours de l'essai, des acquisitions d'images thermiques et d'images dans le domaine du visible sont réalisées simultanément. Une caméra de résolution 5120×5120 pixels² de codage 8 bits en niveaux de gris est utilisée pour acquérir des images de l'éprouvette préalablement mouchetée. Les images sont synchronisées sur les deux amplitudes maximales de déplacement imposé, d'où une vitesse d'acquisition de 50 fps. Les images obtenues sont ensuite traitées par techniques de corrélation d'images numériques pour fournir l'évolution des champs de déplacement et de déformation au cours de l'essai. Le logiciel de corrélation d'images numériques Ncorr v1.2 (Blaber et al., 2015) est utilisé pour le post-traitement.

Pour l'acquisition des images thermiques, une caméra infrarouge de résolution 382×288 pixels² fournit l'évolution des champs thermiques synchronisés sur une seule des deux positions d'amplitudes maximales de déplacement imposé. La vitesse d'acquisition est donc de 25 fps pour la caméra thermique. La Fig. 2 présente la configuration réelle du dispositif d'acquisition pour l'essai en flexion sur poutre console.

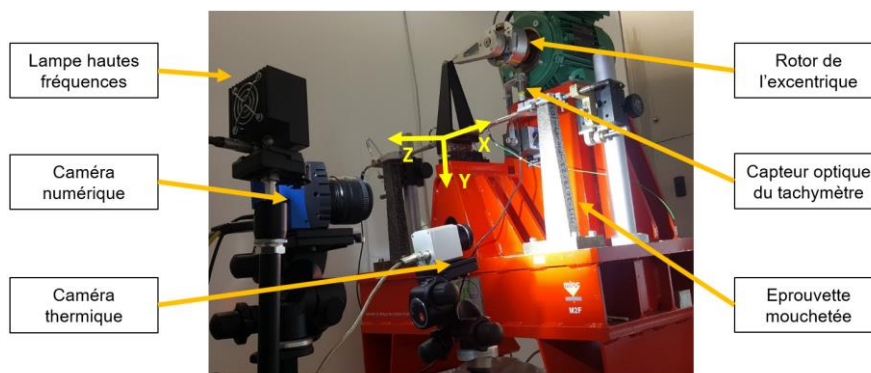


FIGURE 2. Dispositif expérimental de l'essai de fatigue sur poutre console avec mesures sans contact

C. Résultats de la campagne expérimentale avec mesures de champs

La Fig. 3-a présente la courbe de fatigue d'un essai de fatigue en flexion sur poutre console sur le sable bitume 0/2 effectué à 350 $\mu\text{m}/\text{m}$, 25 Hz et 10 °C. On distingue les 3 phases d'une courbe de fatigue d'EB. La phase I au cours des 30000 premiers cycles, la phase II entre 30000 et 110000 cycles, et la phase III entre 110000 cycles et la fin d'essai à 130500 cycles. En plus de ces résultats classiques, le post-traitement des champs cinématiques et thermiques obtenus par CIN et thermographie infrarouge (TIR) permet d'obtenir pour cet essai, l'évolution de la température maximale et la cinétique de fissuration dans l'éprouvette (Fig. 3-a). L'échauffement est un phénomène prépondérant à la phase I de la courbe de fatigue. En effet, près de 75 % de l'échauffement maximal de l'essai (4,6 °C) est atteint en fin de phase I à 30000 cycles. Un régime pseudo-permanent s'installe à partir de 50000 cycles de sollicitation (échauffement de 4,2 °C).

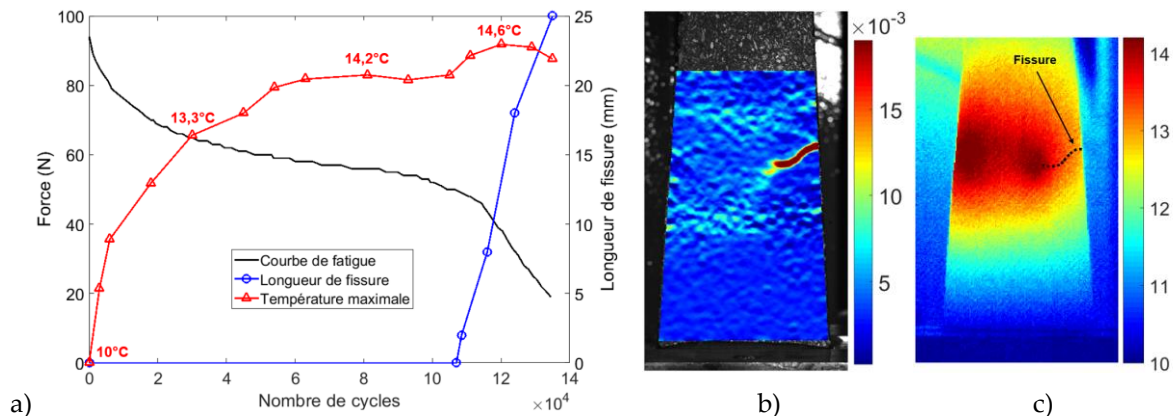


FIGURE 3. Essai de fatigue en flexion sur poutre console effectué à 350 $\mu\text{m}/\text{m}$, 25 Hz et 10 °C sur une éprouvette non entaillée de sable bitume 0/2, a) courbe de fatigue, température et cinétique de fissuration, b) champ de déformation verticale à 125000 cycles c) champ thermique à 125000 cycles

Ce régime pseudo-permanent est perturbé par une augmentation de l'échauffement à partir de 108500 cycles qui correspond à l'apparition d'une fissure macroscopique à une hauteur de 67 mm de la grande base et sur le bord droit de l'éprouvette (Fig. 3-b). L'apparition et la propagation de la fissuration macroscopique est responsable de la phase III de la courbe de fatigue avec une chute rapide de la raideur conduisant à la ruine du matériau. L'apparition de la fissure macroscopique à 108500 cycles conduit à une augmentation de l'échauffement de 0,4 °C par rapport au régime pseudo-permanent. Après initiation de la fissure, cet échauffement est localisé en deux zones (disques) plus chaudes que le reste de l'éprouvette (Fig. 3-c). L'une plus large est sur le bord non fissuré, et l'autre en pointe de fissure et se déplace dans le temps avec la propagation de la fissure.

Il ressort de ces observations un fort couplage thermomécanique. La modélisation des essais de fatigue, pour être le plus réaliste doit obligatoirement modéliser un couplage entre fissuration et le comportement thermomécanique de l'EB.

III. MODELISATION DE LA FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX

Le problème de la fatigue des enrobés bitumineux à modéliser est celui d'une sollicitation alternée sur un matériau viscoélastique et thermosensible avec de la fissuration. La sollicitation alternée

conduit à deux échelles de temps pour décrire toutes les variables thermomécaniques. Toute variable $X(t)$ s'écrit alors comme la somme d'une variable à variation lente et d'une autre à variation rapide sur le cycle. La variable à variation rapide s'exprime comme suit :

$$X_r(t) = \text{Re}(X^*(N)e^{i\omega t}) \quad (1)$$

Avec $X^*(N)$ l'amplitude complexe à évolution lente sur le cycle N . Pour cette étude, la partie mécanique ne s'intéressera qu'aux champs cycliques avec amplitudes à variation lente (X^*) car les courbes de fatigue issues des essais sont l'évolution de l'amplitude de force en fonction du cycle.

La partie thermique s'intéressa à la variable lente ($\theta=\theta_i$), car l'évolution du champ de température obtenue expérimentalement est lentement variable en fonction du cycle.

La loi de comportement d'amplitude complexe des EB s'écrit alors sous la forme :

$$\sigma^* = E^* C : \varepsilon^* \quad (2)$$

Avec E^* le module complexe et C le tenseur de rigidité d'un solide élastique isotrope de module de Young unité.

Le problème mécanique devrait donc être résolu entièrement en variables complexes. Toutefois, pour rester dans le domaine réel, la partie mécanique est simplifiée en considérant un problème pseudo-élastique pour lequel le module complexe $E^*(\theta)$ est remplacé par sa norme $|E^*(\theta)|$. Cette loi pseudo-élastique est sous la forme :

$$\tilde{\sigma} = |E^*| C : \tilde{\varepsilon} \quad (3)$$

Pour décrire la fissuration au cours de l'essai, la loi de Paris relie le taux d'accroissement d'une fissure de longueur a se propageant en mode I d'ouverture de fissure dans le matériau, au facteur d'intensité de contraintes. On choisit de parler dans cette étude de pseudo-facteur d'intensité d'amplitude de déformation. La loi de Paris modifiée s'écrit alors sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\tilde{K}_I^\varepsilon(a, \{\theta\})}{\tilde{K}_{I_0}^\varepsilon} \right)^\eta \quad (4)$$

Avec C et η les paramètres de la loi de Paris. En plus de ces paramètres, il faut ajouter les paramètres initiaux d'intégration de la loi de Paris a_0 la longueur initiale de fissure, et $N(a_0)$ le nombre de cycles associé. Le pseudo-facteur d'intensité d'amplitude de déformation de la loi de Paris modifiée est donnée par la relation suivante :

$$\tilde{K}_I^\varepsilon(a, \{\theta\}) = \frac{\tilde{K}_I^\sigma}{|E^*(\theta_f)|} = \sqrt{\frac{\tilde{G}(a, \{\theta\})}{|E^*(\theta_f)|}} \quad (5)$$

Avec $|E^*(\theta_f)|$ la norme du module en pointe de fissure car le pseudo-facteur d'intensité d'amplitude de déformation est un paramètre décrivant le comportement local au voisinage de la pointe de fissure. Le pseudo-taux de restitution d'énergie maximal sur un cycle de sollicitation s'effectue sur la base d'une approche énergétique pour un essai à déplacement imposé (Eq. 6). Il peut être approximé numériquement par différences finies sur la base de deux calculs du travail extérieur (W_{ext}) effectués à mêmes déplacements imposés et température donnée pour deux aires de fissure voisines, A et $A+\delta A$ par :

$$\tilde{G}(a, \{\theta\}) = -\frac{1}{2} \frac{\partial \tilde{W}_{ext}(a, \{\theta\})}{\partial a} \Bigg|_{u, \{\theta\}} \approx -\frac{1}{2} \frac{\tilde{W}_{ext}(a + \delta a, \{\theta\}) - \tilde{W}_{ext}(a, \{\theta\})}{\delta a} \quad (6)$$

Pour un état de fissuration a , le calcul de W_{ext} est réalisé par éléments finis (EF) en résolvant le problème mécanique pseudo-élastique (Eq. 7) en supposant connu le trajet de fissure et l'état thermique.

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\tilde{\sigma}(u(a), \theta)) = 0 \text{ dans } \Omega \\ \tilde{\sigma} = |E^*(\theta)|C^{el}; \varepsilon^* \text{ dans } \Omega \\ \varepsilon^* = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla^T u) \text{ dans } \Omega \\ u = U_0 e_x \text{ sur } \partial\Omega_u \\ u = 0 \text{ sur } \partial\Omega_e \\ \tilde{\sigma} \cdot n = 0 \text{ sur } \partial\Omega_T \end{cases} \quad (7)$$

La résolution du problème mécanique nécessite la prise en compte du champ thermique correspondant à l'état de fissuration a . Ce champ thermique est obtenu par résolution du problème thermique qui s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} \rho c f \frac{\delta\theta}{\delta N} - \nabla \cdot (k \nabla \theta) + 2 \frac{\lambda_l}{e} \theta = \psi_{dis}(u(a), \theta) + 2 \frac{\lambda_l}{e} \theta_{ext} \text{ sur } \Omega \\ \theta(x, y, t = 0) = \theta_i \text{ sur } \Omega \\ k \nabla \theta \cdot n = \lambda_h (\theta_{ext} - \theta) \text{ sur } \Gamma = \partial\Omega_u \cup \partial\Omega_e \end{cases} \quad (8)$$

Le terme source ψ_{dis} de l'équation de la chaleur est fonction de l'état mécanique et thermique sous la forme :

$$\psi_{dis}(\varepsilon, \theta) = \frac{1}{2} \omega \sin \varphi |E^*(\theta)|(\varepsilon : C : \varepsilon) \quad (9)$$

La simulation de l'essai de fatigue passe par la résolution en simultanée de la loi de Paris (Eq. 4), du problème mécanique (Eq. 7) et du problème thermique (Eq. 8) pour un état $(u(a), \theta)$ correspondant à un temps donné N . Compte tenu de l'interdépendance des variables, le système est non linéaire. Après discrétisation temporelle selon le schéma Euler implicite et formulation faible, le système non linéaire est découplé et résolu par un algorithme itératif. Cette modélisation est implémentée dans le logiciel EF FreeFem++ (Hecht, 2012) pour la simulation des essais.

VI. APPLICATION AUX DONNEES EXPERIMENTALES

La modélisation développée précédemment est ici appliquée aux données expérimentales. Les paramètres du modèle peuvent être classés en trois catégories. Les paramètres mécaniques sont les paramètres du modèle de Huet décrivant la thermo-viscoélasticité de l'EB (Tableau 1). Ils sont obtenus avec l'essai de module complexe.

TABLEAU 1. Paramètres du modèle de Huet

E_{inf} (Mpa)	δ	k'	h	τ	A_0	A_1	A_2
22618,2	2,5243	0,22679	0,63217	0,05589	0,79636	-0,38417	0,00164

Les paramètres thermiques sont issus de la bibliographie, notamment la conductivité thermique k qui vaut $0,8 \text{ J}/(\text{ms } ^\circ\text{C})$, et la capacité thermique massique c qui vaut $800 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$ pour le sable bitume. Les coefficients d'échanges thermiques ont été calés pour chaque type d'essai sur la réponse mécanique en phase I. λ_l est fixé à 10 et $20 \text{ J}/(\text{m}^2\text{s } ^\circ\text{C})$ respectivement pour l'essai sur poutre console et en flexion 4 points. λ_h est fixé 2000 et $500 \text{ J}/(\text{m}^2\text{s } ^\circ\text{C})$ respectivement pour l'essai sur poutre console et en flexion 4 points.

TABLEAU 2. Paramètres de la loi de Paris modifiée

a_0 (m)	$N(a_0)$	η	C (m/cycle)	\bar{K}_{I0}^ε (Pa \sqrt{m})
0,001	0	3,8	$1,9 \times 10^{-8}$	1×10^5

Les paramètres de la loi de Paris sont présentés dans le tableau 2. Ils ont été calés sur un niveau de déformation de l'essai sur poutre console pour simuler les autres niveaux de déformations de cet essai (Fig. 4). Les paramètres ainsi calés sont réutilisés pour prédire par simulation la réponse des essais en flexion 4 points (Fig. 5). Les trajets de fissuration sont introduits dans le calcul EF par déboutonnage (module de Young nul aux nœuds du trajet).

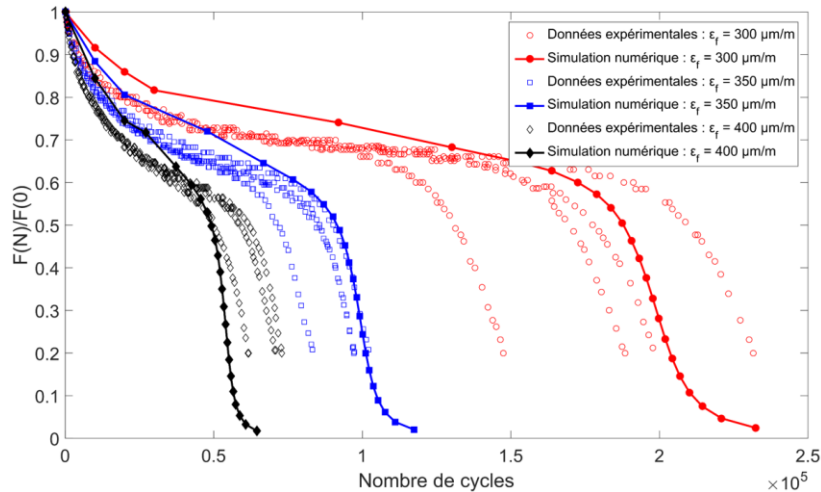


FIGURE 4. Simulation des courbes de fatigue des essais en flexion sur poutre console avec éprouvettes entaillées à 10 °C et 25 Hz et comparaison avec les résultats d'essais

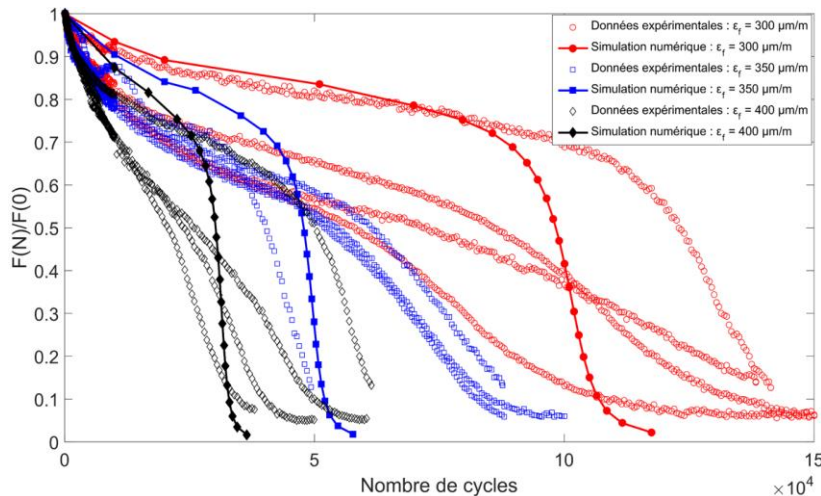


FIGURE 5. Simulation des courbes de fatigue des essais de fatigue en flexion 4 points sur sable bitume à 10 °C et 25 Hz et comparaison avec les résultats d'essais

Les courbes de fatigue simulées montrent un bon accord avec les données expérimentales aussi bien sur l'allure que sur la durée de vie pour les essais sur poutre console entaillées (Fig. 4), que pour les essais en flexion 4 points sur éprouvettes entaillées (Fig. 4). La modélisation

développée permet alors de simuler le passage des essais en flexion sur poutre console aux essais en flexion 4 points au moyen d'un même jeu de paramètres.

V. CONCLUSIONS

Dans la présente étude, une première partie a consisté à réaliser des essais de fatigue en flexion sur poutre console et en flexion 4 points sur des éprouvettes de sable bitume avec des mesures de champs cinématiques par corrélation d'images numériques et thermiques par thermographie infrarouge. Les résultats de cinétiques de fissuration et d'évolution de température montrent le fort couplage entre la thermomécanique et la fissuration. Une modélisation intégrant un comportement thermo-viscoélastique, un couplage thermomécanique et la loi de Paris a été ensuite développée pour simuler le passage d'un essai de fatigue en flexion sur poutre console à un essai en flexion 4 points. Les résultats de simulation montrent un bon accord avec les données expérimentales. Ce travail fournit alors une base pour la réinterprétation des essais de fatigue en vue d'améliorer la méthode de dimensionnement. Il faudrait alors appliquer cette modélisation à d'autres types d'essais tels que la traction indirecte, et à d'autres formules plus usuelles d'enrobés bitumineux (0/10 mm, 0/14 mm, etc).

REFERENCES

- Blaber, J., Adair, B., Antoniou, A., (2015). Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Exp Mech*, 55, 1105–1122. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>
- Bodin, D., de La Roche, C., Piau, J.-M., Pijaudier-Cabot, G., (2003). Prediction of the Intrinsic damage during bituminous mixes fatigue tests. *Paper presented at international RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, 14-16 April 2003, Zurich, Switzerland*
- Bornert, M., Brémand, F., Doumalin, P., Dupré, J.-C., Fazzini, M., Grédia, M., Hild, F., Mistou, S., Molimard, J., Orteu, J.-J., ROBERT, L., Surrel, Y., Vacher, P., Wattrisse, B., (2009). Assessment of digital image correlation measurement errors : methodology and results. *Experimental Mechanics*, 49, 353–370. <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9204-7>
- Cocurullo, A., Airey, G.D., Collop, A.C., Sangiorgi, C., (2008). Indirect tensile versus two-point bending fatigue testing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 161, 207–220. <https://doi.org/10.1680/tran.2008.161.4.207>
- Di Benedetto, H., de La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., Lundström, R., (2004). Fatigue of bituminous mixtures. *Mat. Struct.*, 37, 202–216. <https://doi.org/10.1007/BF02481620>
- Gao, L., Ni, F., Ling, C., Yan, J., (2016). Evaluation of fatigue behavior in cold recycled mixture using digital image correlation method. *Construction and Building Materials*, 102, 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.014>
- Hecht, F., (2012). New development in freefem++. *Journal of Numerical Mathematics*, 20, 251–266. <https://doi.org/10.1515/jnum-2012-0013>
- Romeo, E., (2013). Two-dimensional digital image correlation for asphalt mixture characterisation: interest and limitations. *Road Materials and Pavement Design*, 14, 747–763. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.815128>