
Modélisation par éléments finis de la remontée de fissure dans les chaussées sous trafic

F. Bouhas, C. Petit, A. Millien

Laboratoire 3MsGC, Centre Universitaire de Génie Civil,
Bd J. Derche, 19300, Egletons

farid.bouhas@etu.unilim.fr, christophe.petit@unilim.fr, anne.millien@unilim.fr

RÉSUMÉ. La pérennité des réparations des structures de chaussées passe par la maîtrise des phénomènes de remontée de fissure. Pour ces structures, les chargements de trafic induisent des propagations de fissure en fatigue, souvent au droit ou au voisinage des discontinuités antérieures, en mode mixte d'ouverture et de cisaillement. Si le mode d'ouverture est bien étudié, les effets du cisaillement et l'influence du niveau de mixité restent à quantifier. Le travail présenté dans cet article est basé sur une analyse des effets du cisaillement, en première approche considéré comme découplé, et sur une proposition de modélisation simplifiée du comportement de l'enrobé au droit des fissures par une dégradation d'ensemble d'un cordon résistant. Le modèle permet la description de l'ensemble du phénomène de remontée de fissure en cisaillement, de la phase d'amorçage à la phase de propagation. En considérant la localisation de l'endommagement sur une bande de faible épaisseur, on peut alors associer le comportement du cordon à celui d'un joint et intégrer le modèle dans une procédure de calcul éléments finis (CAST3M) afin de prévoir les durées de remontée de fissure sur structures. Une analyse paramétrique permet de définir les critères de convergence du modèle discrétisé.

ABSTRACT. Durability of pavement rehabilitation is dependent of reflective cracking phenomenon. A pavement structure is submitted to cyclic triaxial stresses and strains under traffic loading. All design methods assume uniaxial tensile solicitation mode such as bending of multilayered pavements. But the upper layer of an overlaid pavement is submitted to both bending and shearing modes when trucks axles are at the vicinity of pre-existing cracks. Assuming an uncoupled behaviour and in a first approach, a shear fatigue model is proposed : experimental observations allow us to propose a damage law, based on a localised degradation scheme. Both crack initiation and stable crack growth are considered. This fatigue model is integrated in a finite element code (CAST3M). Numerical convergence study has been carried out to quantify the effect of mesh refinement and loading conditions.

MOTS-CLÉS : fatigue par cisaillement, endommagement, amorçage et propagation de fissure, modélisation éléments finis, analyse paramétrique.

KEYWORDS : shear fatigue, damage, crack initiation and propagation, finite element modelling, parametric analysis.

1. Introduction

Le rechargement de chaussée est une technique de réparation couramment utilisée lors des opérations de maintenance du réseau routier. Il consiste à mettre en place une nouvelle couche d'enrobé bitumineux après un traitement éventuel des fissures de l'ancienne couche de surface. Un nouvel élément est alors à prendre en compte en matière de dimensionnement : le critère de remontée de fissure au travers de la nouvelle couche de roulement. En effet, les sollicitations de trafic induisent des propagations de fissure, souvent au droit ou au voisinage des discontinuités antérieures, en mode mixte d'ouverture et de cisaillement. La plupart des études actuelles se limitent au mode d'ouverture et négligent les effets du cisaillement. Cette hypothèse, valide pour les structures souples, devient plus discutable dans le cas des structures semi-rigides et des structures bitumeuses épaisses, pour lesquelles une propagation en mode I seul ne suffit plus pour décrire l'ensemble du phénomène de remontée de fissure à travers la couche supérieure.

De nombreux essais de laboratoire ont été développés afin de simuler les conditions de la remontée de fissure et de qualifier l'efficacité des éventuels systèmes anti-remontée de fissure mais seuls certains permettent une réelle mixité du mode de chargement: on citera par exemple l'essai Mefisto, (Wendling, 1997) et l'essai sur l'éprouvette dite ETS (Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec) (Guissi, 2005). Par ailleurs, le laboratoire 3MsGC a développé un essai de fissuration par fatigue en cisaillement alterné (Essai DST : Double Shear Test), applicable au matériau enrobé seul (Petit, 2002). Les résultats obtenus ont conduit à une proposition de modélisation du comportement de l'enrobé au droit des fissures basée sur une dégradation d'un cordon résistant, et permettant la description des phases d'amorçage et de propagation. En considérant la localisation de l'endommagement sur une bande de faible épaisseur, on peut alors associer le comportement du cordon à celui d'un joint (sans épaisseur) sollicité en cisaillement et intégrer le modèle dans une procédure de calcul éléments finis afin de prévoir les temps de remontée de fissure en mode de cisaillement.

L'objectif du travail présenté ici est d'étudier la faisabilité de l'intégration du modèle dans les simulations éléments finis d'essais de structures. Les essais sélectionnés sont l'essai ETS et l'essai DST pour lesquels quelques résultats expérimentaux sont disponibles.

2. Modélisation de la fatigue par cisaillement localisée sur une bande

Les observations issues de l'analyse des essais de type DST amènent à une modélisation du comportement au droit de la zone critique par endommagement du cordon résistant. L'évolution du dommage permet la description de l'essai en phase d'amorçage et de propagation (Petit, 2002). En considérant la localisation de

l'endommagement sur une bande de faible épaisseur, on peut alors associer le comportement du cordon à celui d'un joint, sans épaisseur, sollicité en cisaillement (figure 1).

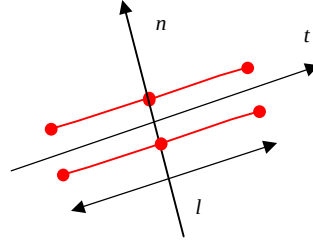


Figure 1. *Elément joint à 6 nœuds (Modèle 2D).*

Pour l'élément joint, le champ de déplacement W est défini par les deux composantes u et v telles que :

$$W = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad [1]$$

u et v sont les déplacements relatifs respectivement suivant le vecteur $\vec{t}$ et le vecteur $\vec{n}$

Il n'existe pas de couplage entre le cisaillement et les efforts normaux, ainsi :

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad [2]$$

K_n et K_s sont respectivement la raideur normale et de cisaillement.

La loi de dommage issue des travaux de (Petit, 2002) appliquée aux éléments joints est :

$$\frac{K_s}{K_0} = \frac{K_{si}}{K_0} - \alpha \cdot E_{tot} \text{ avec } E_{tot} = \sum_{i=1}^N \overline{\Delta \tau_i} \cdot \overline{\Delta u_i} \quad [3]$$

- K_0 est la raideur initiale du matériau sain (non endommagé) ;
- K_s sa raideur à l'instant t considéré ;
- α est un paramètre du modèle et sera fonction du niveau de cisaillement ;
- E_{tot} est l'énergie de déformation totale cumulée par unité de surface.

Les essais de fatigue par cisaillement alterné ont montré, comme dans le cas des essais de fatigue en traction-compression ou en flexion (De la Roche 1996, Di Benedetto, 1997) qu'aux premiers cycles de chargement, la raideur du cordon résistant chute rapidement puis la variation devient quasi linéaire. Nous avons donc

pris en compte cette chute brusque en début d'essai en introduisant une raideur de cisaillement K_{si} en deçà de laquelle l'endommagement est une fonction linéaire de l'énergie totale cumulée par unité de surface. Le modèle considère l'apparition d'une macro-fissuration pour un seuil de dommage donné D_c .

Le corps d'épreuve et les conditions aux limites ont été modélisés sous CAST3M (Figures 2 et 3) en deux dimensions avec une hypothèse de déformation plane. Le comportement des matériaux est de type élastique linéaire isotrope avec, compte tenu des propriétés viscoélastiques des matériaux bitumineux, prise en compte pour l'enrobé d'un module élastique et d'une raideur de cisaillement équivalents (Huet 1963) (dédiés des courbes maîtresses à la température et à la fréquence de l'essai et/ou des résultats expérimentaux obtenus).

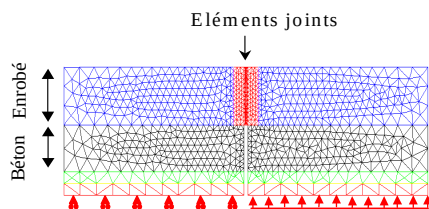


Figure 2. Maillage essai E.T.S

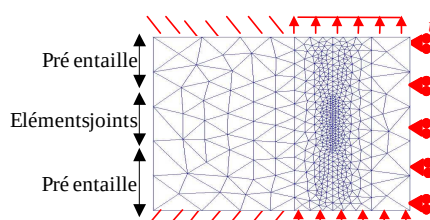


Figure 3. Maillage essai D. S.T

3. Etude paramétrique : critères de convergence

L'essai sélectionné pour cette analyse est l'essai de fatigue par cisaillement E.T.S utilisé pour étudier la remontée de fissure dans les systèmes de rechargement. Il est constitué de deux plateaux horizontaux supportant le corps d'épreuve, l'un mobile dans le plan horizontal et l'autre mobile dans le plan vertical (figure 4). Le mouvement vertical sert à simuler l'action du passage des véhicules au droit des fissures, et le mouvement vertical à simuler les effets thermiques. Pour cette étude seuls les essais sous sollicitations verticales alternées reproduisant le mode II ont été retenus.

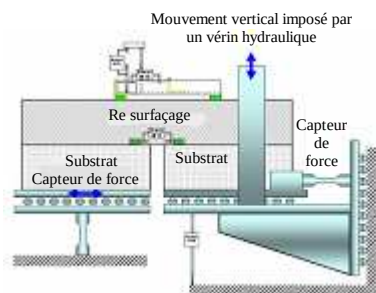


Figure 4. Essai ETS (Guissi, 2005)

Cette analyse paramétrique a été menée en deux étapes afin d'analyser les critères de convergence nécessaires:

- une discrétisation spatiale pour déterminer la taille des éléments finis joints ou encore le nombre d'éléments constituant le cordon résistant (figure 5),
- une discrétisation temporelle pour déterminer le nombre des incréments du pas de calcul (figure 6).

Les propriétés mécaniques des matériaux constituant le corps d'épreuve pour l'essai E.T.S sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1. *propriétés des matériaux*

Matériaux	E(MPa)	ν
Enrobé bitumineux	5900	0.35
Béton	39000	0.30
Acier	210000	0.30

L'influence de la raideur initiale de cisaillement K_0 du cordon résistant a été étudiée. Pour les calculs présentés elle est fixée à 130 MPa/mm, valeur issue des résultats expérimentaux de (Laveissiere, 2002). Le seuil de dommage pris en compte pour le passage entre endommagement et macro-fissuration est conventionnellement fixé à une réduction de 50% de la raideur initiale (Doan, 1977). La sollicitation appliquée correspond à un déplacement imposé vertical de 0,020 mm (Figure 2), appliqué sur l'un des plateaux mobiles dans la direction verticale (Guissi, 2005). Ce modèle considère une chute initiale de la raideur de cisaillement de 10% aux premiers cycles puis l'endommagement est une fonction linéaire de l'énergie totale cumulée par unité de surface.

L'éprouvette est modélisée avec un cordon résistant constitué de N éléments joints de dimensions identiques. Au seuil de dommage considéré, la raideur du joint est annulée et l'élément joint devient une fissure.

La sollicitation appliquée au bas de l'éprouvette provoque une concentration des contraintes en pointe de fissure. Lors du calcul, la fissure se propage alors du bas vers le haut.

Le nombre de cycles à la rupture de l'éprouvette dépend fortement de la taille des éléments joints (Figure 5). Plus le nombre d'éléments augmente (leur taille diminue), plus le nombre de cycles à la rupture diminue, jusqu'au nombre $n_{\min} = 20$ éléments à partir duquel le nombre de cycles à la rupture est quasi constant. Ceci nous permet de conclure que le critère de convergence est vérifié si la taille des éléments joints ne dépasse pas 5% de la hauteur du cordon.

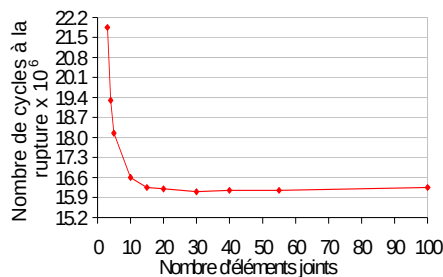


Figure 5. Influence de la discrétisation spatiale

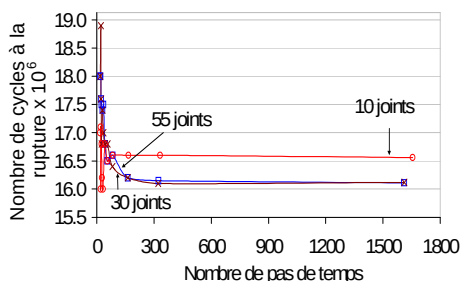


Figure 6. Influence de la discrétisation temporelle

La figure 6 nous montre l'influence du pas de temps sur le nombre de cycles à la rupture. Plus le nombre de pas de temps augmente, plus le nombre de cycles à la rupture diminue. De la même manière on peut dire que la convergence est atteinte à partir de 300 pas de temps (vérification effectuée pour des éléments de joints dont la taille ne dépasse pas 5% de la hauteur du cordon).

Des essais sont actuellement en cours à l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal. Une validation est nécessaire à la réception des résultats.

4. Vers une validation expérimentale

Pour la validation, nous avons comparé les résultats du modèle avec ceux de l'essai de cisaillement cyclique alterné sur éprouvette entaillée, de type CS (Compact Shearing) modifié. Le dispositif expérimental est celui du laboratoire de Génie Civil d'Eggletons (figure 8). Les appuis latéraux sont encastrés et la partie centrale est maintenue dans un bâti rigide solidaire de l'axe mobile de la machine d'essai électromécanique. La symétrie du corps d'éprouvette induit le choix d'une sollicitation de cisaillement symétrique alterné.

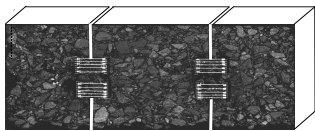


Figure 7. Géométrie de l'éprouvette

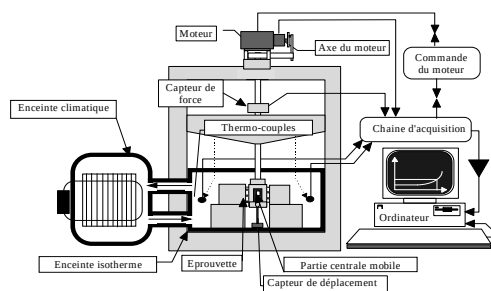


Figure 8. Schéma de principe du dispositif expérimental

Les critères de convergence précédemment validés ont été vérifiés sur l'éprouvette utilisée pour cet essai.

La comparaison des résultats a été effectuée avec les résultats sur deux éprouvettes soumises à un niveau de contrainte moyenne de cisaillement dans le cordon de 1,25 MPa. L'endommagement intervient rapidement dans les premiers joints de part et d'autre de l'éprouvette. S'en suit une redistribution de ces contraintes de cisaillement sur toute la hauteur du cordon à travers chacun des éléments joints. La fissuration se propage des deux bords pour finir en partie centrale par rupture successive et symétrique des joints.

Les résultats obtenus à partir de notre modèle concernent notamment la durée de la phase d'amorçage et la modélisation de la propagation. Comme le montre la Figure 9, les résultats numériques obtenus pour ces paramètres sont proches des observations expérimentales.

La réponse mécanique (force) est représentée Figure 10. Pendant l'amorçage, les amplitudes des efforts diminuent faiblement à mesure que l'endommagement progresse. A partir de 150000 cycles l'effort chute nettement au fur et à mesure de la propagation de fissure. Les efforts calculés avec le modèle sont en adéquation avec les mesures.

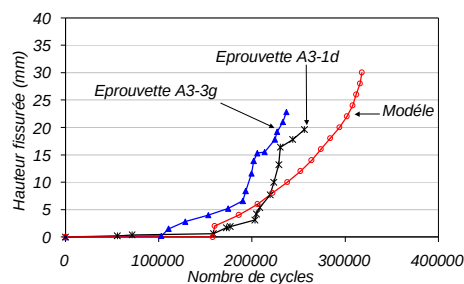


Figure 9. Evolution de la hauteur fissurée

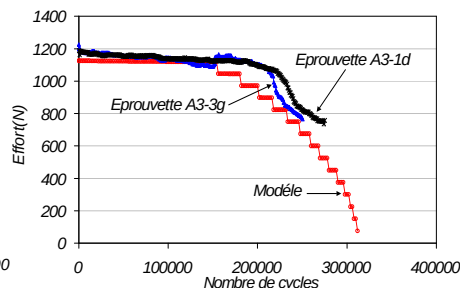


Figure 10. Evolution de la force verticale

5. Conclusion

La modélisation proposée du comportement d'un enrobé au droit des fissures est basée sur une dégradation d'ensemble d'un cordon résistant. L'outil numérique présenté, est issu d'une approche simplifiée permettant le calcul opérationnel de la durée de vie d'un rechargement de chaussée. L'analyse paramétrique nous a permis de déterminer les critères de convergence nécessaires que sont la taille des éléments joints et le nombre des incréments du pas de calcul.

Les résultats des simulations numériques sont satisfaisants en terme de description des phases d'amorçage et de propagation de fissure. Ils permettent également de retrouver les évolutions des grandeurs mesurées pendant l'essai.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Daniel Perraton et Guillaume Guissi pour toutes les données et résultats expérimentaux relatifs à l'éprouvette dite ETS (Ecole de Technologie Supérieure de Montréal).

7. Bibliographie

- De la Roche C., Marsac P., « Caractérisation expérimentale de la dissipation thermique dans un enrobé bitumineux sollicité en fatigue », 1st Int. Eurobitume and Eurasphalt Congress, 1996.
- Di Benedetto H, Soltani M.A. A., Chaverot P., « Fatigue damage for bituminous mixtures », Mechanical Tests for Bituminous Materials, Essais Mécaniques pour les Matériaux Bitumineux, pp 263-270, RILEM, 1997.
- Doan T.H., « Les études de fatigue des enrobés bitumineux », Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, n° spécial V, 1977.
- Guissi G., « La remontée des fissures dans les re-surfaçages : Développement d'une méthodologie de conception des re-surfaçages », rapport de synthèse, École de Technologie Supérieure, Montréal, 2005.
- Huet C., « Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés », thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des sciences de Paris, 1963.
- Laveissière D., « Modélisation de la remontée de fissure en fatigue dans les structures routières par endommagement et macro-fissuration – de l'expérimentation à l'outil de dimensionnement pour l'estimation de la durée de vie », Thèse de doctorat, Faculté des sciences -Université de LIMOGES, 2002.
- Petit C., Laveissière D., Millien A., « Modelling of Reflective Cracking in Pavements : Fatigue under shear stresses » pp. 111-124, Third int. Symp. on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Amsterdam, avril 2002.
- Wendling L, Piau J.M, « MEFISTO : un nouveau banc de fissuration pour l'étude de la fissuration en mode mixte des enrobés bitumineux », 4^{ème} réunion annuelle GEO-Aussois, 1997.