

## Analyse de la rupture d'un film de bitume par la méthode des éléments finis.

Hoai-Nam Nguyen, Ferhat Hammoum, Alain Ehrlacher\* & Emmanuel Chailleux

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
Route de Bouaye – BP 4129 – 44341 Bouguenais Cedex  
e-mail : [ferhat.hammoum@lcp.fr](mailto:ferhat.hammoum@lcp.fr)

\*Ecole Nationale des Ponts et Chaussées  
Institut Navier - LAMI  
6 et 8 avenue Blaise Pascal  
Cité Descartes - Champs sur Marne  
77455 Marne La Vallée Cedex 2

### Résumé :

*Afin de mieux comprendre les phénomènes d'initiation et de propagation d'une fissure dans un matériau bitumineux, nous avons développé un essai innovant simulant le comportement d'un film mince de bitume entre deux granulates dans un enrobé.*

*L'étude expérimentale considère la température et la vitesse de déformation comme les paramètres qui définissent la fissuration ductile et fragile. La géométrie de l'éprouvette permet d'initier et de propager une fissure au cœur de l'éprouvette en lui appliquant une phase de traction.*

*La rigidité initiale de l'éprouvette non fissurée est caractéristique de sa géométrie et des propriétés rhéologiques du matériau. Le comportement du matériau viscoélastique est pris en compte en utilisant des séries de Prony. On montrera que l'analyse des essais permet de cerner la transition mécanique de l'état fragile à l'état ductile.*

### Abstract:

*In order to study the initiation and propagation of cracking in bituminous mixes, a local fracture test on bitumen is developed. A thin film of binder between two steel protuberances, simulating aggregates, is submitted to successive tensions with a constant strain rate during the test.*

*Experimental study considering temperature and strain rate as parameters highlight different fracture behaviour (ductile, brittle). The sample geometry allows initiation, propagation of a crack inside the binder film by applying a tension stage.*

*Initial stiffness of the virgin sample is linked both to its geometry and the rheological properties of the bitumen. The analysis of data test will allow us to determine the brittle-ductile transition.*

**Mots-clefs : Fissuration du bitume; Viscoélasticité ; Méthode des éléments finis.**

## 1 Introduction

Le passage d'un véhicule lourd crée des efforts de flexion qui se traduisent par des contraintes de traction à la base des couches liées. Bien que de tels efforts n'engendrent pas la rupture totale et immédiate de ces matériaux, la répétition des chargements provoque l'apparition de micro-dommages et de microfissures qui se traduisent par une diminution progressive de sa rigidité. Ce type de dégradation, dit de fissuration par fatigue mécanique, constitue l'un des principaux modes de ruine des chaussées. L'examen des surfaces de rupture d'un enrobé dégradé par fatigue indique que la fissure s'est propagée dans le liant

entre les granulats (Moutier, 1991 ; E. Castaneda Pinzon et C. Such, 2004). Afin de mieux comprendre et reproduire le phénomène de fissuration en laboratoire, un essai dit de « Rupture Locale sur Bitume » (Rulob) a été développé au LCPC.

La géométrie de l'éprouvette prend la forme d'un film de bitume pris entre deux granulats hémisphériques.

On soumet ensuite l'échantillon à un étirement avec une vitesse de déplacement imposée. L'essai permet alors d'étudier les conditions d'initiation et de propagation d'une fissure au centre de l'échantillon.

Lors de la mise en tension de l'éprouvette, la force augmente avec le déplacement jusqu'à une valeur critique liée à l'initiation de la fissure. Cette phase d'étirement correspond à une réponse rhéologique du matériau. La propagation de la fissure est caractérisée par une chute brutale de la force.

Dans notre démarche, on s'intéresse à identifier les propriétés rhéologiques des matériaux dans un premier temps et à rechercher les paramètres qui décrivent les conditions d'initiation de la fissure. On montrera dans un deuxième temps que l'analyse des essais permet de cerner la transition mécanique de l'état fragile à l'état ductile.

## 2 Identification rhéologique

Les propriétés mécaniques des matériaux viscoélastiques linéaires sont souvent déterminées à partir des essais sur éprouvettes soumises à l'excitation transitoire ou sinusoïdale en régime permanent. De nombreuses expressions analytiques de comportement viscoélastique linéaire sont proposées comme les travaux de Ferry et al. (1980) et Tschoegl (1990). Ces dernières représentations se basent sur la décomposition exponentielle souvent connue sous forme de séries « Prony » ou « Dirichlet ». Les séries Prony dont le modèle rhéologique se compose des éléments de Maxwell en parallèle sont largement utilisées.

### 2.1 Définition et calage des séries de Prony

Dans le cas de l'hypothèse des petites déformations (HPP), la contrainte de cisaillement d'un matériau viscoélastique linéaire soumis à une vitesse de déformation constante s'exprime suivant la relation :

$$\tau(t) = \int_0^t G_R(t-s) \dot{\gamma}(s) ds = G_R(t) \gamma \quad (\dot{\gamma} = 0 \text{ lorsque } t > 0) \quad (1)$$

Etant donné  $G_R(t)$  le module de relaxation de cisaillement, on définit  $G_\infty$ ,  $G_0$  et  $g_R(t)$  par les expressions suivantes :

$$G_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} G_R(t) ; G_0 = G_R(0) \text{ et } g_R(t) = \frac{G_R(t)}{G_0}$$

Les séries de Prony s'expriment ainsi en fonction des modules adimensionnels de relaxation :

$$g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right]$$

D'où  $g_i$  et  $\tau_i$  sont les paramètres du matériau.

Ces paramètres de séries Prony sont déterminés à partir des données des essais Métravib dans le domaine fréquentiel sur une gamme de fréquence variant de 1 Hz à 200 Hz correspondant à 7 températures de -20°C à +30°C. A l'aide de la transformation de Fourier, on effectue le passage de la fonction de relaxation du domaine temporel vers le domaine fréquentiel:

$$G_e(w) = G_0 \left[ 1 - \sum_{i=1}^N g_i \right] + G_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \tau_i^2 w^2}{1 + \tau_i^2 w^2} ; G_p(w) = G_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \tau_i w}{1 + \tau_i^2 w^2} \quad (2)$$

On retrouve ainsi  $G_e(w), G_p(w)$  qui sont respectivement le module élastique et le module de perte,  $w$  étant la fréquence angulaire et  $N$  est le nombre d'éléments des séries de Prony.

En utilisant la méthode non linéaire des moindres carrées, on cherche à minimiser simultanément les sommes  $\sum (G_e^{\text{modèle}} - G_e^{\text{expérimental}})^2$  et  $\sum (G_p^{\text{modèle}} - G_p^{\text{expérimental}})^2$  (Chailleux, 2006).

Le principe d'équivalence temps-température (Ferry, 1980), caractéristique d'un matériau thermo-rhéologiquement simple, permet de construire la courbe maîtresse de la norme du module à partir des isothermes tracées en échelle bi-logarithmique. On représente sur la Figure 1, la courbe maîtresse d'un bitume pur de grade 50/70 ainsi que les résultats du calcul d'identification des séries de Prony après l'optimisation par la méthode des moindres carrés.

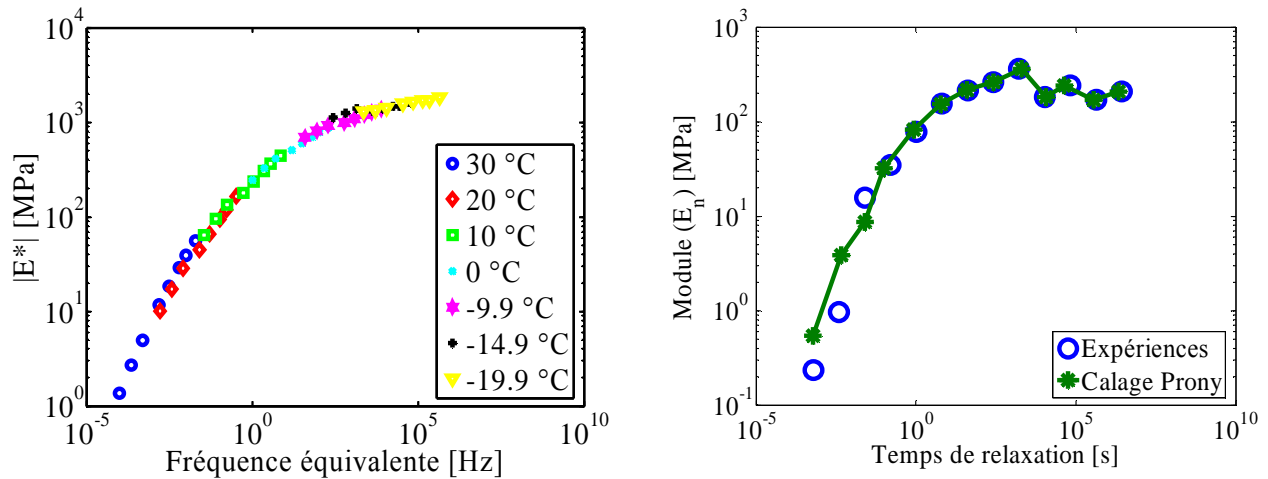


Figure 1 : Courbes de maîtresses du bitume pur de grade 50/70 et identification rhéologique à T= 0°C.

## 2.2 Validation de l'identification rhéologique dans le domaine temporel

L'essai de fluage appelé aussi « Bending Beam Rheometer » (BBR) est un essai spécialement conçu pour effectuer des mesures fondamentales sur les liants bitumineux à basses températures. Pour conduire l'essai, le barreau de bitume est conditionné pendant un temps déterminé dans un bain cryostatique à une température contrôlée. On applique une charge constante de 100 grammes sur le barreau pendant 240 secondes pendant laquelle la déflexion verticale au milieu du barreau est mesurée.

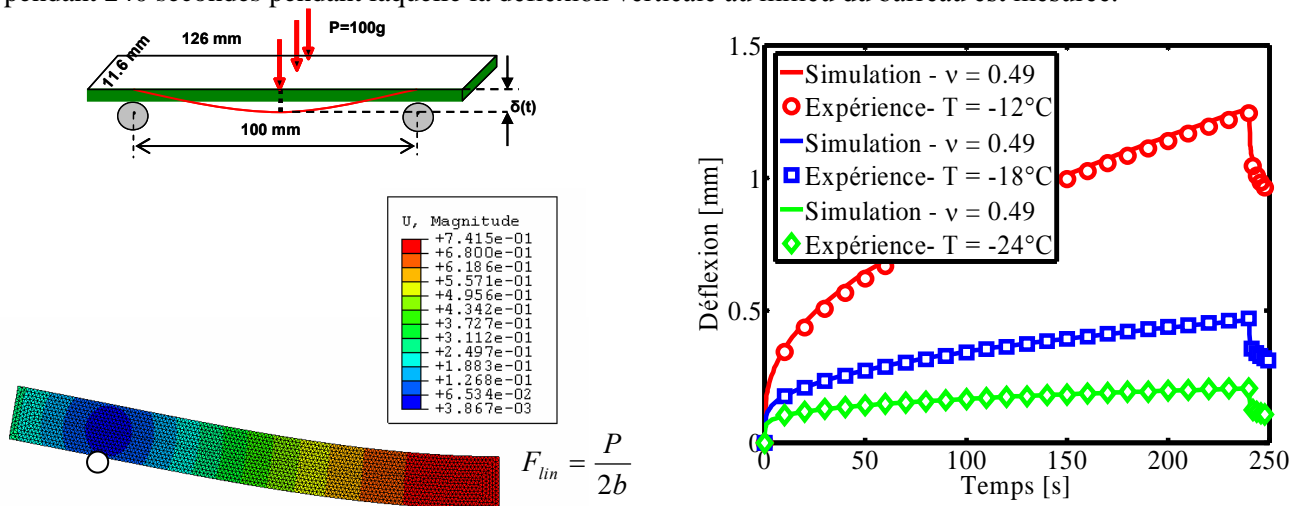


Figure 2 : Validation de l'identification rhéologique du liant pur 5070.

On a effectué les essais de fluage BBR sur le bitume défini précédemment pour les trois températures considérées (  $-12^{\circ}\text{C}$ ,  $-18^{\circ}\text{C}$  et  $-24^{\circ}\text{C}$ ). Les températures d'essai sont fixées de telle manière à rester dans la gamme de mesure de la déflexion.

La comparaison entre le calcul ABAQUS et les résultats expérimentaux montre une bonne correspondance dans l'évolution de la déflexion pendant toute la durée de l'essai. Les séries de Prony permettent donc de décrire le comportement rhéologique des liants bitumineux.

### 3 Essai de rupture d'un film de bitume

L'essai dit « rupture locale du bitume » est développé afin d'étudier le comportement à la rupture d'un film de bitume par décohésion entre deux granulats dans un matériau bitumineux. On place une pastille de bitume entre 2 protubérances convexes en acier formées chacune d'un tronc de cône terminé par une demi-sphère de 6 mm de rayon simulant les granulats. Puis, on impose un étirement à une vitesse de déplacement constante.

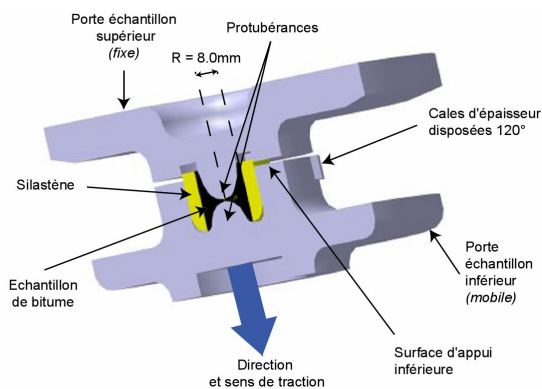


Figure 3 : Représentation en coupe du dispositif porte-échantillon (Maillard 2004).

Les courbes effort – déplacement sur la Figure 4 montrent l'influence de la température sur le comportement du bitume. En effet, la force à la rupture et la rigidité de l'éprouvette deviennent plus importantes lorsque la température diminue.

L'enregistrement de la force en fonction du déplacement montre trois phases dans l'évolution de la force (Figure 4). Lors de la mise en tension de l'éprouvette, la force résultante croît avec le déplacement imposé jusqu'à une force critique liée à l'initiation de la fissure. Dans la deuxième phase, la propagation d'une fissure dans l'échantillon se traduit par une chute brutale de la force. Puis, on poursuit le chargement avec une pente plus faible qui traduit une diminution de la rigidité de l'éprouvette. Lorsque la fissure s'est entièrement propagée dans l'échantillon, la pente de la courbe devient nulle.

La courbe effort-déplacement dépend étroitement de la géométrie de l'éprouvette, de la nature du liant et des conditions expérimentales (température et vitesse de déformation). Afin de s'assurer de la répétabilité de l'essai, nous effectuons au minimum deux essais.

#### 3.1 Simulation de l'essai à l'aide de la méthode des éléments finis.

Les essais de Rupture Locale sont réalisés à différentes vitesses de déformation et à différentes températures. Pour s'assurer de la représentativité de l'essai, on a mis en place des critères de comparaison basés sur les points d'initiation et sur les points d'arrêt de la fissure de la courbe effort-déplacement. Le seuil de tolérance est fixé à une variation de 10% entre les valeurs correspondantes. Lorsque le seuil est dépassé, on effectue des essais supplémentaires.

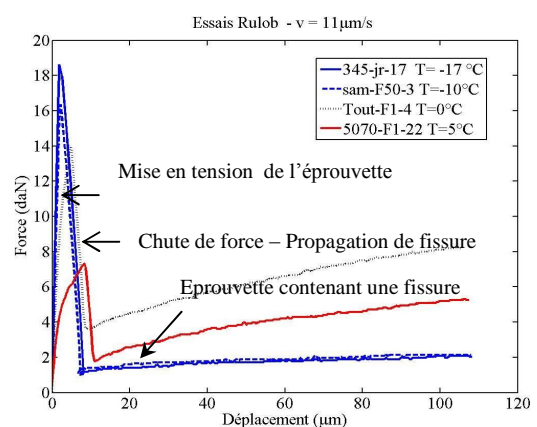


Figure 4 : Courbe effort/déplacement pour un bitume de grade 50/70.

En tenant compte des différentes symétries de l'éprouvette, on effectue le calcul sur un quart de maillage composé d'éléments axisymétriques bilinéaires quadratiques CAX4.

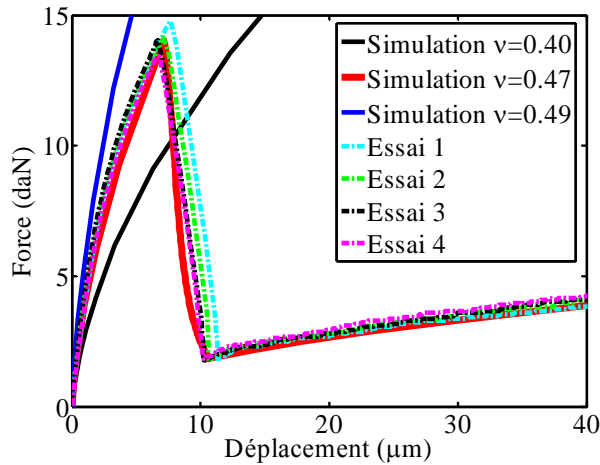


Figure 5 : Courbes obtenues par le calcul ABAQUS après ajustement du coefficient de Poisson  $\nu = 0.47$ .

Liant 01141 à 0°C $\nu = 11 \mu\text{m/s}$					
N° essai	$F_{\text{ini}}$	$d_{\text{ini}}$	$F_{\text{arret}}$	$d_{\text{arret}}$	$\Phi_{\text{fiss}}$
	(daN)	(µm)	(daN)	(µm)	(mm)
1	14.77	7.68	1.83	11.34	12.24
2	14.16	7.08	1.83	10.66	12.27
3	14.04	6.66	1.77	10.26	12.1
4	13.43	6.82	1.83	10.32	10
Ecart-type	0.55	0.45	0.03	0.50	1.10
Moyenne	14.10	7.06	1.82	10.65	11.65

Tableau 1 : Répétabilité de l'essai RULOB pour  $\theta = 0^\circ\text{C}$  et  $\nu = 11 \mu\text{m/s}$ .

L'essai de Rupture Locale dépend fortement de la capacité de contraction dû à son mode de sollicitation de traction. Par conséquent, le coefficient de Poisson influence donc sur les résultats de modélisation. Quelques études théoriques (Tschoegl *et al.*, 2002) montrent que le coefficient de Poisson d'un matériau viscoélastique thermosensible évolue avec les conditions d'essai. Les études expérimentales (S.Maillard, 2004) sur le bitume précisent qu'à l'état vitreux, le coefficient de Poisson tend vers une valeur comprise entre 0.3 et 0.4 tandis qu'à l'état visqueux le bitume est incompressible et sa valeur est de l'ordre de 0.5. Lorsque le matériau est dans un état intermédiaire, le coefficient de Poisson évolue progressivement entre ces valeurs limites.

Dans notre démarche, à l'aide du code de calcul ABAQUS, le coefficient de Poisson est ajusté pour chaque condition expérimentale en comparant la réponse expérimentale avec la courbe de force obtenue par calcul.

Le Tableau 1 montre que l'essai RULOB permet d'obtenir des résultats répétables. L'exploitation des essais validés précédents permet de cerner le point d'initiation et le point d'arrêt de la fissure. Une fois le coefficient de Poisson retenu, on modélise les 3 phases d'évolution de la force en imposant une cinématique d'ouverture de la fissure.

À titre d'exemple, on montre sur la Figure 5 l'ajustement du coefficient de Poisson sur l'ensemble des 4 essais à  $\theta = 0^\circ\text{C}$  et  $\nu = 11 \mu\text{m/s}$ . La courbe de la force obtenue avec  $\nu = 0.47$  décrit correctement les 3 phases d'évolution de l'essai.

### 3.2 Transition fragile/ductile

Afin de déterminer la transition ductile-fragile, on reporte les valeurs de déplacement à la rupture en fonction de la température pour les 3 vitesses. On trace ensuite la courbe moyenne pour chaque vitesse intermédiaire  $\nu = 11 \mu\text{m/s}$ . Le point d'intersection des deux tangentes de la Figure 6 correspond à une transition fragile – ductile. L'observation des courbes en fonction de la vitesse montre un décalage de la transition fragile – ductile vers les basses températures lorsque le matériau est sollicité plus lentement.

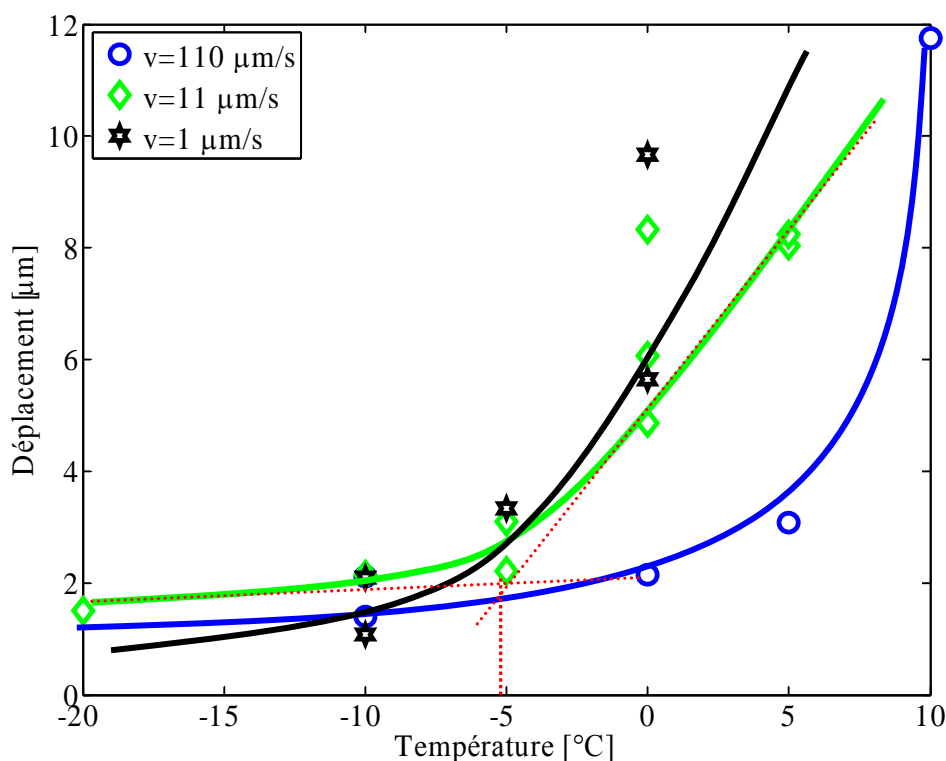


Figure 6 : Dépendance du déplacement à la rupture avec la température d'essai.

#### 4 Conclusions

L'identification des séries de Prony à partir des essais rhéologiques dans le domaine fréquentiel a permis de reproduire le comportement des liants bitumineux. La validation a été effectuée dans le domaine temporel de l'essai de fluage BBR.

Après l'ajustement du coefficient de Poisson, le calcul ABAQUS permet de simuler correctement les 3 phases d'évolution de l'essai.

On montre également que l'essai de rupture locale permet de déterminer la transition mécanique fragile – ductile à partir du déplacement. Cette transition se décale vers les basses températures pour des vitesses de sollicitation plus faibles.

#### Références

- ABAQUS – Theory Manual, User's Manual, version 6.4, HKS, 2003
- Castaneda Pinzo E., et C. Such. Evaluation of moisture sensitivity of bituminous mixtures by a complex modulus approach. *Transportation Research Board*, 1891, p. 62-67, 2004.
- Chailleux, E & al 2006a. "A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials". *Road Material and pavement Design 7 (Special Issue)*, 2006.
- Ferry, J., Viscoelastic properties of polymers. *John Wiley and sons*. Third Edition, 1980.
- Maillard S., Fissuration et autoréparation des liants bitumineux, apport de l'essai de Rupture Locale Répétée. *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes*, 2004.
- Moutier F., Etude statistique de l'effet de la composition des enrobés sur leur comportement en fatigue et leur module complexe. *Bulletin de Liaison du LCPC*, 172, p. 33-41, 191.
- Tschoegl N. W., The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior – An introduction. *New York*, 1990.