

Comportement du bitume en film mince au pseudo-contact entre deux granulats

Chantal De LA ROCHE
Ferhat HAMMOUM,
Jean-Michel PIAU
Christian STÉFANI

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

L'étude présentée vise à mettre en évidence la contribution du liant, par sa rupture cohésive, à la fatigue des enrobés bitumineux. Dans ce but, un essai spécifique de « rupture locale répétée du bitume » a été mis au point. Il vise à comprendre la rupture cohésive et le phénomène d'autoréparation dans le liant, dans les conditions particulières de chargement entre deux granulats. L'étude reprend les analyses des résultats d'essais relatifs à l'initiation et à la propagation de fissure à l'intérieur de l'échantillon, qui se traduisent par des décrochements dans la courbe force-déplacement. Les observations effectuées ont été confirmées à l'aide de la technique d'émission acoustique. Des chargements successifs réalisés après différents temps de repos montrent que l'autoréparation du liant dépend de la température et de la durée du temps de repos. L'essai développé constitue un outil tout à fait prometteur pour étudier la contribution du bitume à la rupture et à l'autoréparation des enrobés bitumineux.

DOMAINE : Route.

ABSTRACT

BEHAVIOR OF A THIN FILM OF BITUMEN AT THE PSEUDO-CONTACT BETWEEN TWO AGGREGATES

This investigation is intended to highlight the contribution of binder, as a result of its cohesive failure, to the fatigue of bituminous mixtures. With this goal in mind, a special "repeated local failure" test on bitumen has been developed; the test is aimed at understanding both the cohesive failure and the healing phenomenon within the binder, under a set of specific loading conditions between two aggregates. This study has made use of test result analyses relative to the initiation and propagation of cracking inside the specimen, which are noticeable by discontinuities in the force-displacement curve. Recorded observations have been confirmed thanks to the acoustic emission technique. A series of sequential loadings, conducted after variable rest periods, indicates that binder healing depends on temperature as well as on rest period length. The test derived for these purposes provides a most promising tool for assessing the contribution of bitumen to failure and to the healing of bituminous mixtures.

FIELD: Roads.

Introduction

La fatigue des enrobés bitumineux constitue l'un des principaux modes de rupture des chaussées bitumineuses. L'évaluation du comportement à la fatigue est donc à la base des méthodes de dimensionnement dans de nombreux pays.

Le mécanisme de fatigue est généralement considéré comme l'endommagement progressif de la couche de fondation de la chaussée (en considérant que toutes les couches sont bien collées) sous la répétition des charges de poids lourds. Cet endommagement progressif conduit à une fissuration macroscopique à la base de cette couche de fondation, qui se propage à travers toutes les couches jusqu'à la surface de la chaussée (fig. 1). Ces fissures sont très dommageables car elles constituent un point de passage privilégié de l'eau vers les couches inférieures. Pour la chaussée elle-même, la fissuration affecte le transfert des charges et la distribution des contraintes et des déformations engendrées par le trafic. Il est donc très important de limiter le phénomène de fatigue et de déterminer les conditions d'initiation et de propagation des fissures dans les matériaux bitumineux.

L'observation des carottes d'enrobés extraites de chaussées endommagées ou l'examen des échantillons de laboratoire testés en fatigue montrent que la rupture se produit le plus souvent à l'intérieur du film de bitume (ou de mastic). La nature et l'origine du liant, pour une composition et une granulométrie données, ont un effet très important sur le comportement en fatigue des enrobés bitumineux en laboratoire

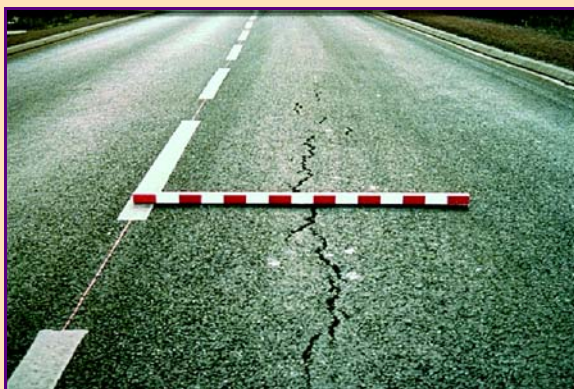
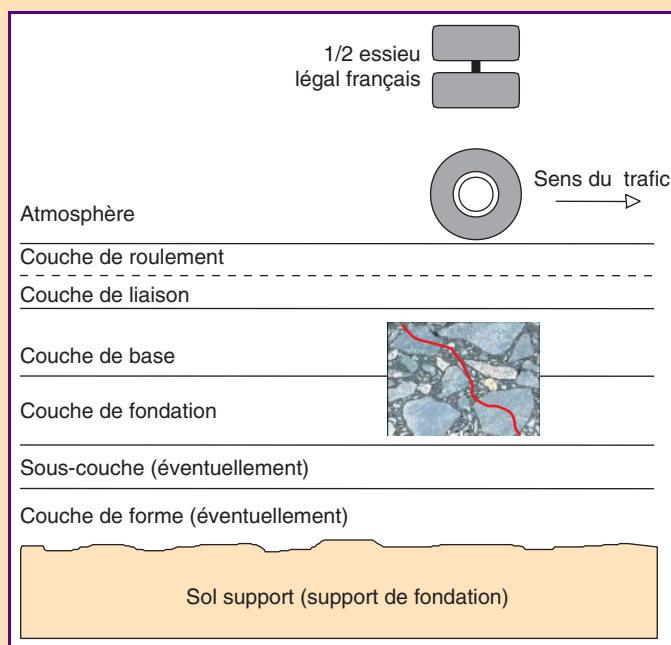


Fig. 1 - Chaussée endommagée par fatigue et rupture par décohesion entre deux granulats dans un enrobé bitumineux.



[Moutier et *al.*, 1990]. Il est donc important d'évaluer la contribution du bitume lui-même au phénomène de fatigue des enrobés bitumineux par son comportement à la rupture et ses capacités d'autoréparation.

Cette action fait partie d'un thème de recherche du LCPC, intitulé « Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux », dont l'objectif est de caractériser le phénomène de fatigue sous ses différents aspects tels que la caractérisation des matériaux en laboratoire, les investigations sur chaussées et les effets structurels.

Dans le but d'évaluer la contribution du bitume au phénomène de fatigue des enrobés, Stéfani [1987] a proposé de simuler en laboratoire la rupture et l'autoréparation de films minces de bitume soumis à des sollicitations répétées, dans la même configuration que celle rencontrée entre deux granulats dans un enrobé bitumineux.

Or, dans un enrobé bitumineux, le bitume ne se présente ni en masse, ni en pellicule et ce n'est qu'au pseudo-contact des granulats qu'existe une direction privilégiée selon laquelle une épaisseur est définissable.

Un essai spécifique (*cf.* paragraphe suivant), dit de « rupture locale répétée sur bitume », a ainsi été mis au point. Le principe et le mode opératoire de cet essai sont décrits dans de La Roche et *al.*, [1999], de même que les premiers essais de faisabilité. Cette étude est centrée sur une campagne expérimentale réalisée avec cet essai, dans le but de mieux interpréter les résultats d'essais en termes d'initiation et de propagation de fissure, à l'aide de la technique d'émission acoustique. Elle traite également de l'estimation de la répétabilité de l'essai et de l'influence des paramètres d'essais sur les résultats obtenus.

Description de l'essai

Principe

Dans le but de simuler au mieux l'état du bitume dans un enrobé bitumineux, une lentille de bitume est placée entre deux protubérances convexes en acier, formées chacune d'un tronc de cône terminé par une demi-sphère de 6 mm de rayon qui représente le granulat (fig. 2). Cet échantillon est alors soumis à une traction uniaxiale répétée, selon une loi de déplacement imposée, de façon à simuler ce qui se passe entre deux granulats au sein d'un mélange bitumineux.

Le porte-échantillon a été conçu de telle sorte que, lorsque aucun chargement n'est appliqué, l'épaisseur de bitume au centre de l'échantillon peut être fixée à une valeur comprise entre 0,1 et 0,3 mm à la température d'essai de 0° C. Cette épaisseur est de l'ordre de grandeur de celle d'un film de bitume entourant les granulats dans les enrobés bitumineux, comme cela a été montré par Duriez, [1950] et, plus récemment, par Kose et *al.* [2000].

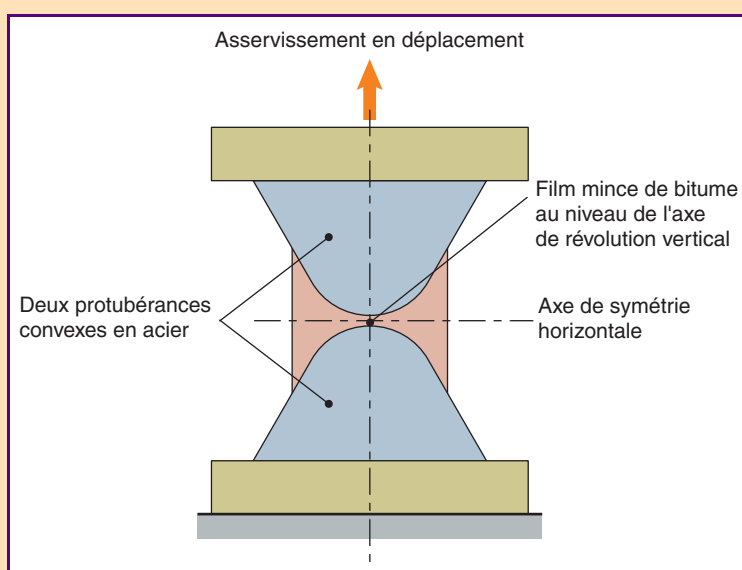


Fig. 2 - Présentation schématique de l'appareillage utilisé pour l'essai de rupture locale.

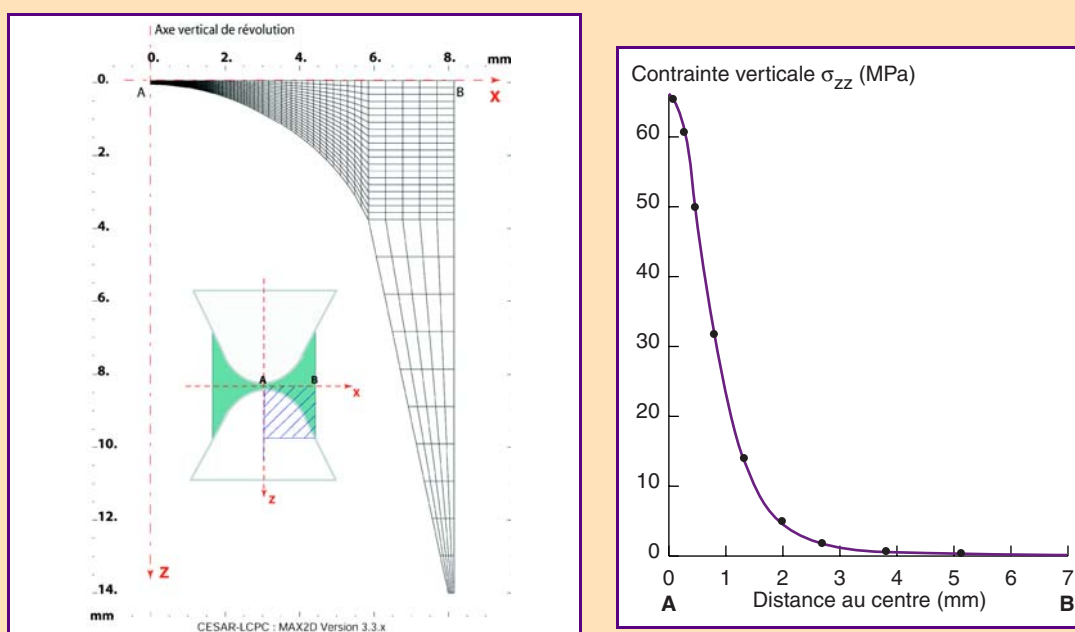


Fig. 3 - Représentation du maillage et de la distribution de contrainte verticale le long de l'axe de symétrie horizontale.

La géométrie de la protubérance a été définie pour induire une concentration de contrainte au centre de l'échantillon.

Dans le but de confirmer et de quantifier cette hypothèse, un calcul par éléments finis a été réalisé à l'aide du code CESAR-LCPC. Les paramètres suivants ont été utilisés pour la simulation :

- Comportement linéaire élastique incompressible pour le bitume (coefficient de Poisson $\nu = 0,5$; module d'Young unitaire $E = 1$ MPa) ;
- Déplacement unitaire (1 mm).

Le résultat obtenu pour un calcul axisymétrique, avec un maillage décrivant un quart de plan méridien de l'échantillon, est présenté sur la figure 3. On peut observer que 99 % de la contrainte est concentrée dans les trois premiers millimètres de rayon autour de l'axe vertical de symétrie. Cela permet de faire l'hypothèse de l'apparition d'une fissure à partir du centre de l'échantillon, avec cavitation et sans « pollution » par l'air ambiant, tant que la fissure n'atteint pas le bord de l'échantillon.

Protocole d'essai

L'essai de rupture locale est réalisé sur une presse électromécanique (Machine Asservie d'Essais Rhéologiques – MAER) du LCPC. La grande rigidité de la machine garantit la maîtrise du chargement avec une grande précision. L'erreur sur la déformation relative réelle par rapport à la consigne est constamment inférieure à 1 %. Dans le but de déterminer les propriétés à la rupture et les capacités d'autoréparation du bitume dans le domaine « fragile », l'essai est réalisé dans une enceinte climatique permettant d'atteindre des températures basses, de l'ordre de -20°C , avec une précision de 0,6 à 1 $^{\circ}\text{C}$. Le protocole d'essai a été décrit en détails précédemment [de La Roche et *al.*, 1999].

Le chargement de l'échantillon est réalisé à vitesse de déformation constante et la force résultante est mesurée. Ce type de chargement a été choisi du fait du caractère visqueux du bitume. Dans la mesure où le déplacement appliqué peut atteindre l'ordre de grandeur de l'épaisseur du film de bitume, une vitesse de déformation constante est atteinte avec la loi de déplacement exprimant l en fonction du temps t suivante :

$$l = l_0 e^{\frac{t}{t_1} \times \ln \frac{l_1}{l_0}} \quad (1)$$

avec :

- l_0 : distance initiale entre les sphères,
- l_1 : distance finale entre les sphères,
- t_1 : temps de chargement.

Pour tous les résultats présentés ci-après, le temps de chargement a été fixé à 4 s. Après le chargement en déplacement, le système est ramené à la distance initiale entre les sphères, ce qui permet l'autoréparation des fissures qui peuvent s'être formées au cours du premier chargement. Cette séquence peut être répétée plusieurs fois.

Résultats expérimentaux

Suite aux premiers essais de faisabilité réalisés avec cet équipement, une campagne expérimentale a été engagée pour estimer la répétabilité de l'essai.

Dans un premier temps, la description de l'état de l'échantillon, en termes de fissuration et de capacité d'autoréparation, a été effectuée par l'analyse de la réponse en force et la technique d'émission acoustique.

La répétabilité de l'essai proprement dite a ensuite été évaluée, de même que l'effet des paramètres d'essais tels que la température, la vitesse de déformation et la durée des périodes de repos entre deux sollicitations sur la réponse du matériau.

Matériau testé

La présente étude a pour objectif d'étudier la réponse du bitume pendant un essai de rupture locale d'un point de vue phénoménologique et non l'influence des caractéristiques du matériau sur cette

réponse. C'est pourquoi un seul type de bitume a été étudié. Le matériau utilisé est un bitume pur de grade 50/70. Ses principales caractéristiques sont indiquées dans le tableau I. La température de transition vitreuse a été déterminée par Analyse Calorimétrique Différentielle (Pr. NF T66-067).

TABLEAU I
Caractéristiques du bitume testé

| Pénétrabilité à 25 °C NF EN 1426 (1/10 mm) | Température Bille et anneau NF EN 1427 (°C) | Température de transition vitreuse Pr. NF T66-067 (°C) |
|--|---|--|
| 60 | 47,5 | – 24 °C |

Réponse qualitative du matériau

La figure 4 présente la courbe force/déplacement obtenue pour un essai réalisé à 0 °C, avec une épaisseur de film initiale de 220 µm et un déplacement maximal de 50 µm (ce qui correspond à une déformation maximale potentielle de 23 %) atteint en 4 s. Les valeurs de force sont mesurées aux bornes du porte-échantillon.

La réponse du matériau peut être séparée en trois étapes :

❶ OA : Cette partie de la courbe correspond à la réponse classique d'un matériau viscoélastique soumis à une vitesse de déformation constante. La non-linéarité de cette courbe est liée au caractère visqueux de ce matériau à la température d'essai. Elle pourrait également être due à la propagation stable d'une fissure créée au tout début du chargement.

❷ AB : La valeur d'effort montre une chute soudaine. Cette chute survient alors que le déplacement imposé continue à solliciter l'échantillon. Cette discontinuité peut être expliquée par l'apparition et la propagation d'une fissure à l'intérieur de l'échantillon et une propagation instable de cette fissure. Ce phénomène pourrait être le déchirement soudain du bitume au moment où la contrainte au centre de l'échantillon atteint la contrainte limite de rupture.

❸ BC : De même que dans la phase OA, cette courbe correspond à la réponse classique d'un matériau viscoélastique soumis à une vitesse de déformation constante, mais avec une pente plus faible qui correspond à une rigidité globale plus faible de l'échantillon du fait de l'ouverture d'une fissure dans la phase AB.

Comme précédemment, la non-linéarité pourrait être attribuée à la combinaison de deux phénomènes : la propagation de la fissure créée en phase AB et les caractéristiques rhéologiques du bitume.

Selon les valeurs des paramètres retenues pour les essais, les courbes peuvent présenter une ou plusieurs discontinuités. Le nombre de discontinuités semble correspondre au nombre de fissures concentriques s'étant propagées pendant l'essai. Cela peut être illustré par les surfaces de rupture qui peuvent être observées après la séparation totale de l'échantillon à la fin de l'essai (fig. 5 et 6).

Répétabilité de l'essai

Classiquement, dans les essais de rupture, l'obtention d'une bonne répétabilité est un problème important. La répétabilité de l'essai a été évaluée à + 5, 0, – 8 et – 15 °C. La figure 7 présente les résultats obtenus à 0 °C, pour un déplacement maximal de 50 µm en 4 s et la figure 8 les résultats

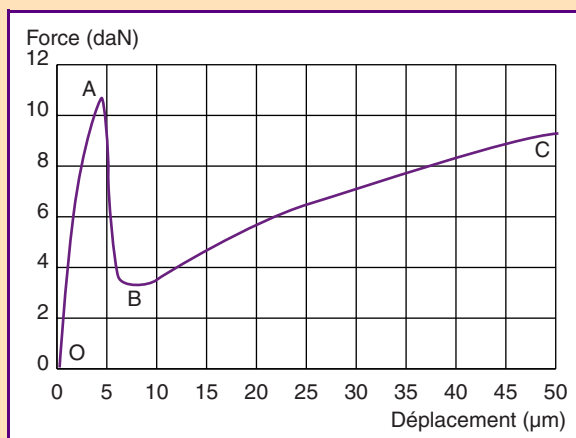


Fig. 4 - Essai de rupture locale :
Réponse d'un bitume 50/70 à 0 °C
(épaisseur initiale 220 µm, temps de charge 4 s,
déplacement maximal 50 µm).

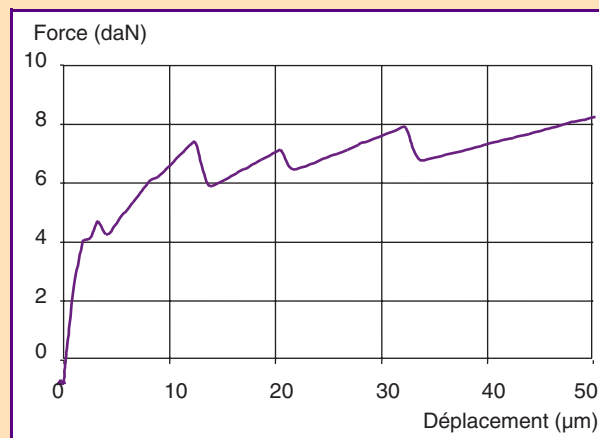
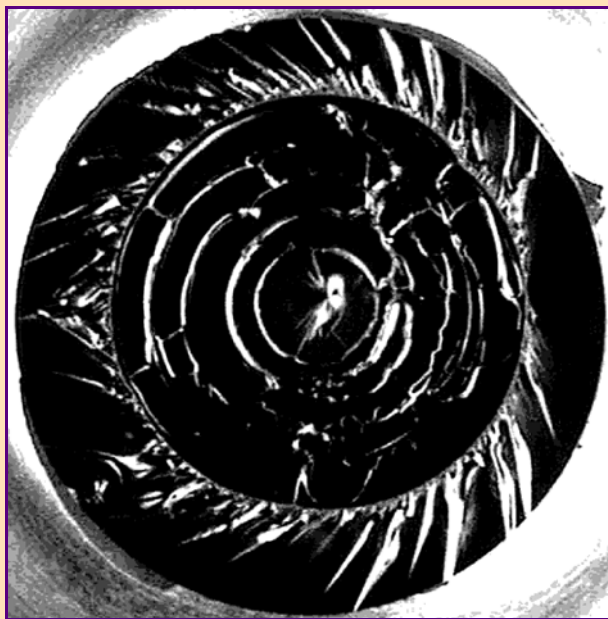


Fig. 5 - Surface de rupture d'un échantillon testé à 0 °C, montrant plusieurs discontinuités sur la courbe force/déplacement.

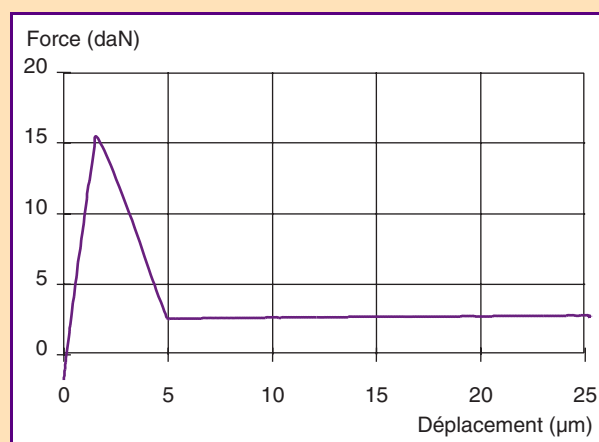
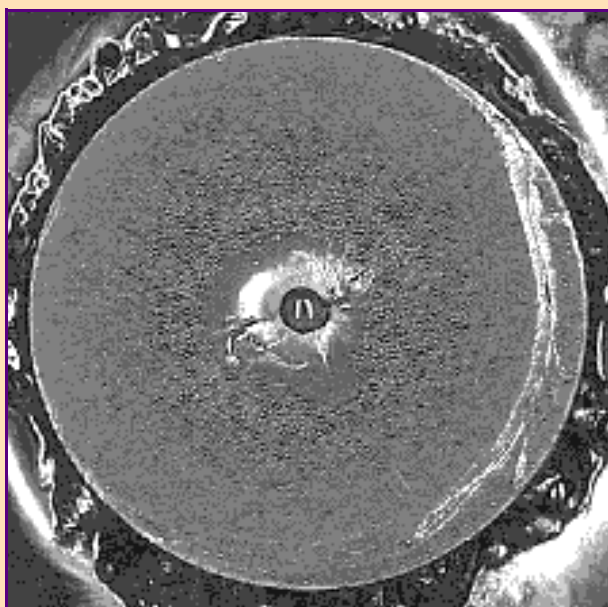


Fig. 6 - Surface de rupture d'un échantillon testé à -15 °C, montrant une seule discontinuité sur la courbe force/déplacement.

obtenus à -15 °C, pour un déplacement maximal de 25 μm en 4 s. Ces courbes peuvent être comparées selon différents aspects : pente initiale, force relative à la première chute, nombre de chutes de force soudaines. Les valeurs d'effort conduisant à la première chute montrent une certaine dispersion qui peut être due aux légères différences existant à l'intérieur de l'échantillon et qui peuvent initier la fissure (microbulles, par exemple). Par contre, la pente initiale, qui est représentative de la rigidité globale de l'échantillon, est relativement répétable pour les différentes conditions testées, de même que le nombre de chutes brutales d'effort.

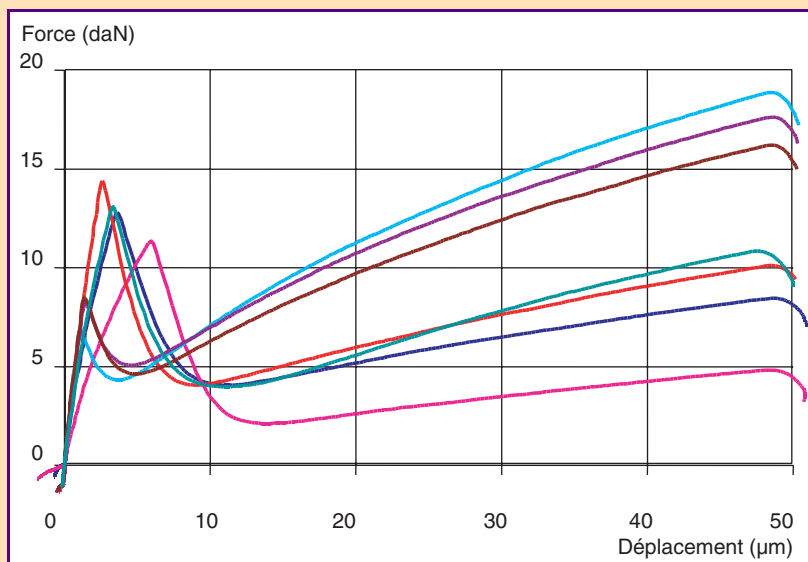


Fig. 7 - Répétabilité de l'essai de rupture locale. Réponse d'un bitume 50/70 à 0 °C (épaisseur initiale 220 μm, temps de chargement 4 s, déplacement maximal 50 μm).

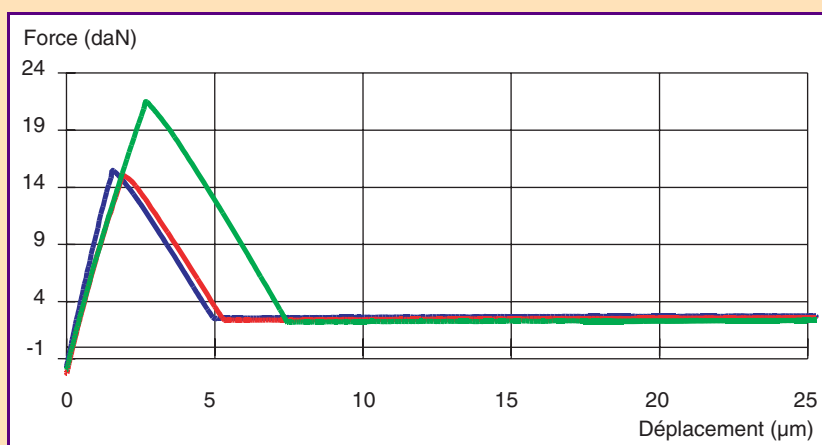


Fig. 8 - Répétabilité de l'essai de rupture locale. Réponse d'un bitume 50/70 à -15 °C (épaisseur initiale 200 μm, temps de chargement 4 s, déplacement maximal 25 μm).

Interprétation des résultats d'essais

Dans le but de donner corps aux hypothèses faites sur les événements se produisant à l'intérieur de l'échantillon pendant le chargement, à partir du simple examen des courbes force/déplacement, la technique des émissions acoustiques (EA) a été utilisée comme méthode d'examen non destructif pendant l'essai.

Principe de l'émission acoustique

L'émission acoustique correspond à la production spontanée d'ondes de contraintes élastiques à l'intérieur d'un matériau soumis à un chargement. Audibles dans certains cas, ces signaux peuvent atteindre des fréquences de plusieurs dizaines de mégahertz. Cette technique est utilisée comme méthode d'examen non destructif pour évaluer l'endommagement des matériaux dans différents domaines. Dans le domaine routier, cette technique a été utilisée précédemment par Jolivet et *al.*, [1993] pour suivre l'endommagement des enrobés bitumineux pendant l'essai de retrait thermique

empêché et par Chang [1994] pour étudier les résistances adhésive et cohésive des enrobés. Cette technique a permis de localiser le début de la rupture dans le matériau et de caractériser les événements se produisant à l'intérieur grâce à l'analyse des signaux émis. Les données enregistrées se présentent sous la forme de signaux pseudo-sinusoïdaux amortis. Ceux-ci sont généralement caractérisés au moyen des deux paramètres suivants :

- 1 – l'amplitude maximale exprimée en dB ;
- 2 – le nombre de coups N ou le nombre d'alternances qui dépassent un seuil donné.

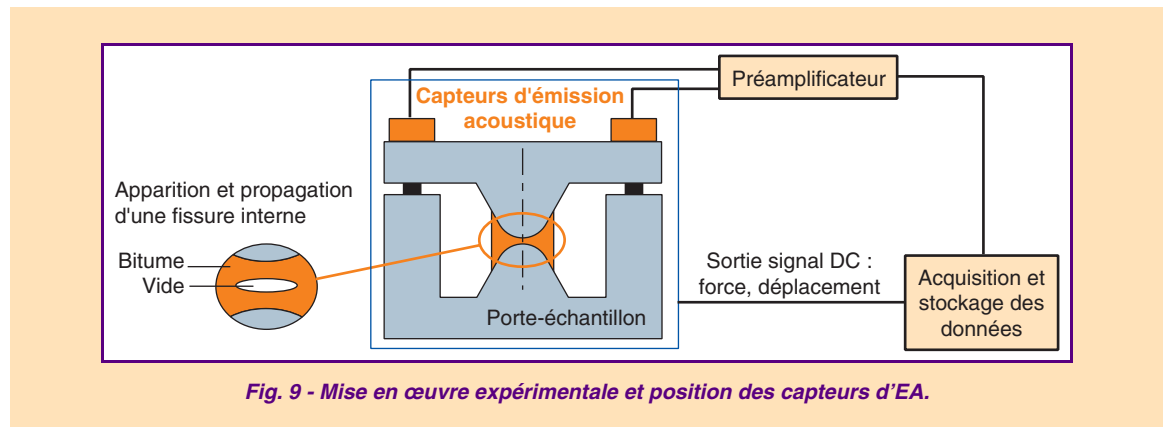
L'évolution de l'activité acoustique en fonction du temps permet de suivre l'état de fissuration du matériau. L'ouverture brutale d'une fissure correspondant à un comportement fragile se traduit par une activité acoustique intense et de courte durée. A contrario, une activité moyenne et prolongée correspond à une rupture progressive due à la création et à la propagation de microfissures.

Mise en œuvre expérimentale

L'essai de rupture locale sur bitume est le siège d'un phénomène d'apparition et de propagation de fissures au sein de l'échantillon. Une première expérimentation à l'aide de la technique d'émission acoustique a été réalisée au laboratoire, avec le support technique de la Société Euro Physical Acoustics, afin d'en estimer la faisabilité.

Deux capteurs sont fixés sur la protubérance supérieure à l'aide de ruban adhésif. Ils sont couplés à l'acier par de la graisse silicone pour assurer une transmission optimale de l'onde transitoire (fig. 9). Les fréquences de résonance de ces deux capteurs sont de 60 et 150 kHz dans le but de couvrir une large bande d'onde. Le gain des préamplificateurs est ajusté à 40 dB et l'ensemble des événements acquis durant l'essai est stocké dans un ordinateur et ensuite analysé. L'équipement utilisé pour cette expérimentation ne permettait pas d'étudier la distribution spatiale des sources acoustiques pendant le chargement.

Pendant l'enregistrement et pour plus de sécurité, l'enceinte climatique est arrêtée un court moment pour éliminer le bruit.



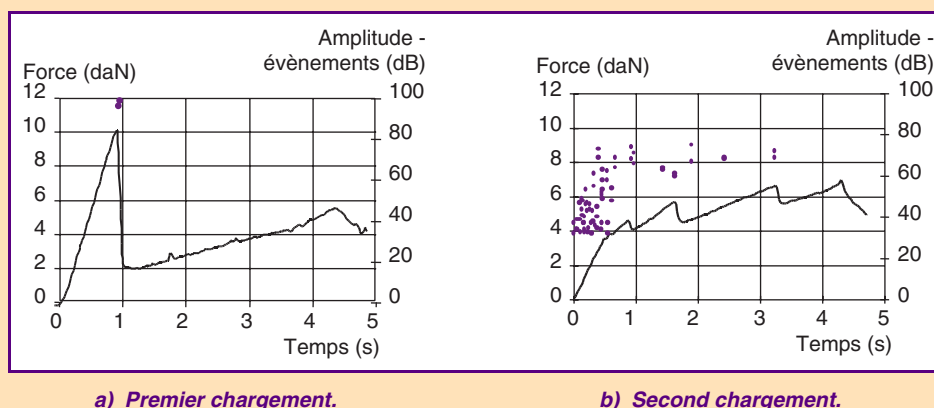
Résultats expérimentaux

Différents essais de rupture locale sur bitume ont été réalisés à 0 °C. Pour l'essai présenté sur la figure 10, la procédure était la suivante : le bitume testé est chargé jusqu'à 50 μm pendant 4 s puis est ramené à son épaisseur initiale pendant un temps de repos de 35 s. Il est ensuite chargé à nouveau dans les mêmes conditions.

Les mesures d'émission acoustique permettent d'obtenir les résultats suivants :

- dans tous les cas, le premier chargement (jusqu'à 50 μm) engendre un très petit nombre d'événements avec une forte énergie et une très grande amplitude (100 dB), ce qui correspond à la chute brutale de l'effort et n'est jamais atteint à nouveau pendant le chargement suivant. Ce résultat est en accord avec les hypothèses faites au § « Réponse qualitative du matériau » ;
- le chargement suivant produit un nombre plus important d'événements au début du chargement, mais avec une énergie plus basse et de plus faible amplitude.

Fig. 10 - Enregistrement des événements pendant un essai de rupture locale par émission acoustique



Les résultats obtenus pour l'un de ces essais, en termes d'amplitude d'événements acoustiques, sont présentés sur la figure 10. La figure 10a correspond au premier chargement (jusqu'à 50 μm) et la figure 10b correspond au second chargement du même échantillon après une période de repos de 35 s à l'épaisseur initiale de l'échantillon. Sur ces figures, chaque point violet correspond à un événement acoustique associé à son amplitude en dB.

La comparaison des résultats obtenus pour le premier et le second chargement permet d'émettre quelques hypothèses sur le phénomène d'autoréparation du bitume :

- tout d'abord, la courbe force-déplacement montre que de l'autoréparation s'est produite pendant le temps de repos. En effet, les niveaux d'effort atteints pendant le second chargement sont supérieurs à ceux atteints pendant le premier chargement après la chute brutale d'effort. Cela est en accord avec ce qui avait été précédemment observé avec cet essai ;
- ensuite, les résultats d'émission acoustique semblent montrer que l'autoréparation se produit sous la forme de ponts de bitume, qui apparaissent entre les lèvres de la fissure pendant le temps de repos et sont partiellement rompus lors du second chargement. Cela confirme également les interprétations faites grâce à la simple observation des courbes force-déplacement.

Conclusion sur l'émission acoustique

L'utilisation de la technique d'émission acoustique semble très prometteuse pour l'interprétation de l'essai. Cette technique pourrait également être utilisée pour estimer la qualité de l'autoréparation dans le bitume à partir de la comparaison des amplitudes de signaux.

Une autre façon d'interpréter l'essai, en termes de rupture et d'autoréparation, consiste à utiliser une modélisation viscoélastique à partir des résultats d'essais rhéologiques et une interprétation en termes de mécanique de la rupture. Cela a été réalisé dans le cadre des résultats d'essais présentés ici, mais sera présenté dans un autre article. Une investigation sur les propriétés à la rupture du bitume et ses capacités d'autoréparation en utilisant cette double approche (expérimentation et modélisation) est une voie intéressante déjà suivie par Richard et *al.* [1977], qui a étudié la capacité d'autoréparation de mélanges bitumineux soumis à des essais uniaxiaux et par Kausch [1987], qui a utilisé cette même approche pour comprendre le phénomène d'autoréparation des polymères.

Influence des paramètres d'essais

Effet de la température

L'essai de rupture locale a été réalisé à différentes températures ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$) dans le but de déterminer l'effet de la température sur les résultats d'essais. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 11. On peut noter que l'essai de rupture locale rend bien compte de la dépen-

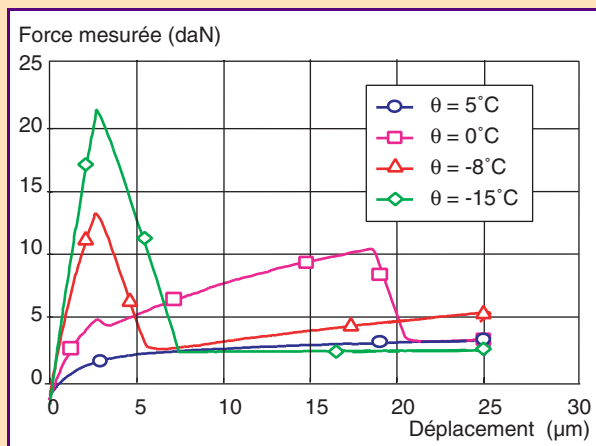


Fig. 11 - Effet de la température sur la réponse d'un bitume 50/70
(épaisseur initiale 220 μm, temps de chargement 4 s, déplacement maximal 25 μm).

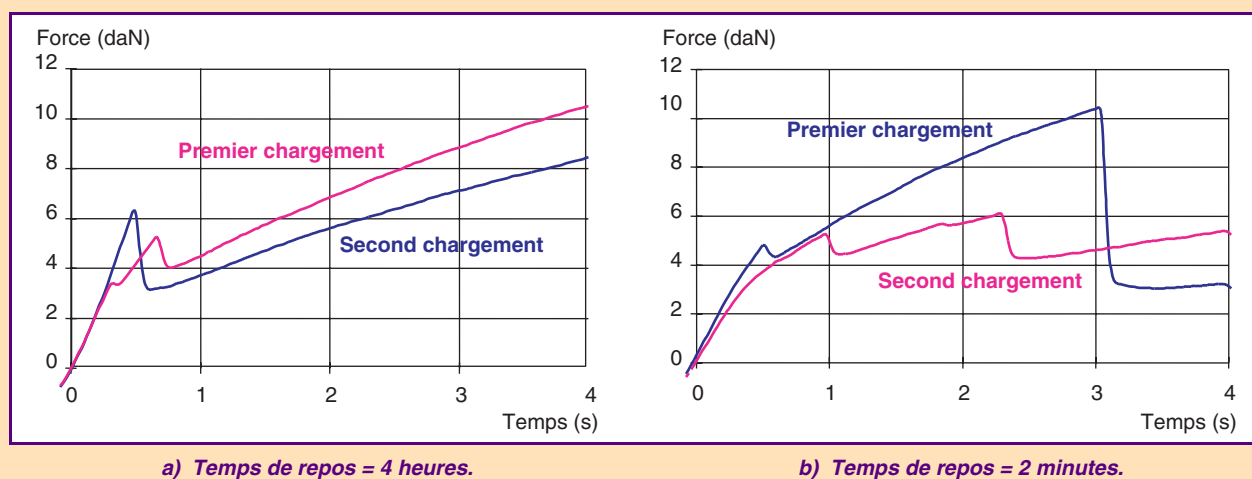
dance de la rigidité du bitume à la température. La pente de la courbe dans la première phase de réponse du matériau décroît notablement lorsque la température augmente. La chute d'effort, qui peut être mise en relation avec l'ouverture d'une fissure, est plus importante à basse température. Ce phénomène peut disparaître pour les températures moyennes à « élevées » dans les conditions testées. On peut noter que le changement de comportement du matériau se produit au voisinage du point de fragilité Fraass du bitume 50/70 testé (de l'ordre de -8°C). Des observations tout à fait similaires peuvent être faites en fonction de la vitesse de chargement.

Effet des temps de repos sur le phénomène d'autoréparation

Dans le but d'estimer les capacités d'autoréparation du bitume, différents chargements ont été appliqués aux mêmes échantillons, entrecoupés par des périodes de repos pendant lesquelles l'échantillon est ramené à son épaisseur initiale à la température de l'essai. La figure 12 donne des exemples de courbes obtenues pour un temps de repos de 4 heures (fig. 12a) et pour un temps de repos de 2 minutes (fig. 12b).

La capacité d'autoréparation du bitume dépend du temps de repos. Un temps de repos de 4 heures conduit à une courbe force/déplacement sensiblement comparable à celle obtenue pour le premier chargement : la pente de la courbe avant la chute brutale d'effort est la même. Cela peut être interprété comme une autoréparation totale de la fissure créée pendant le premier chargement. Cepen-

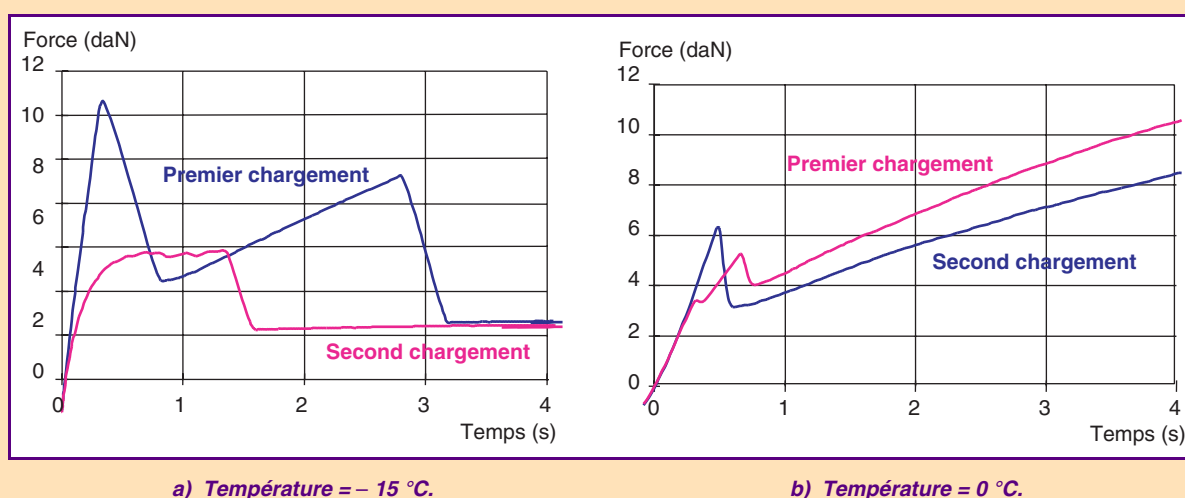
Fig. 12 - Essai de rupture locale : réponse d'un bitume 50/70 à 0°C après un temps de repos



nant, la pente de la courbe après la première chute est légèrement plus faible, indiquant que le second chargement a conduit à une ouverture de fissure plus grande que la première. Un temps de repos de 2 minutes autorise également une certaine autoréparation du matériau et, en particulier, de la fissure ouverte à la fin du premier chargement, correspondant à la deuxième chute brutale d'effort. Cependant, la comparaison des pentes initiales pour le premier et le second chargement montre que l'auto-réparation est seulement partielle. Cette autoréparation semble être également plus « précaire » que celle obtenue après 4 heures de temps de repos.

L'effet de la température sur l'auto-réparation a été également étudié pendant cette campagne d'essai. Un exemple de résultats obtenus à -15°C et 0°C , après un temps de repos de 4 heures est donné sur la figure 13. On peut noter que la capacité d'auto-réparation est liée à la température : plus la température est élevée (au même titre que l'augmentation de la durée des temps de repos), plus la capacité d'auto-réparation du bitume est importante.

Fig. 13 - Essai de rupture locale : Réponse d'un bitume 50/70 après un temps de repos de 4 heures



Conclusions

L'essai de rupture locale constitue une méthode pratique et fiable pour étudier la rupture et l'auto-réparation du bitume. L'utilisation d'une méthode non destructive comme l'émission acoustique permet de détecter la fissuration et d'estimer la capacité d'auto-réparation de l'échantillon. Ces premiers essais ont permis de mieux comprendre les phénomènes de rupture du bitume dans les conditions de sollicitation en fatigue des enrobés bitumineux. Ces résultats peuvent constituer une aide qualitative pour proposer un modèle d'endommagement macroscopique pour les enrobés bitumineux, comme cela a été fait récemment dans les travaux de Lefeuvre [2001].

Cet essai donne des résultats logiquement dépendants de la température, de la vitesse de chargement et des temps de repos et permet d'étudier l'influence de ces paramètres sur la capacité d'auto-réparation du bitume.

Des actions de recherche en cours visent à quantifier la résistance à la rupture et les capacités d'auto-réparation du bitume en film mince dans différentes conditions expérimentales. Cela contribuera à mieux cerner les phénomènes observés pendant les essais de fatigue sur enrobés. Il est également prévu d'étudier différents bitumes purs ainsi que des bitumes modifiés par des polymères.

Remerciements. Les auteurs remercient Michel Penet et Francis Moutier pour leur aide dans la mise au point du matériel d'essai de rupture locale de même que les étudiants Nicolas Brachet de l'IUP de Lorient et Isabelle Jurine de l'ENSAIS pour la réalisation de la campagne d'essais.

- CHANG W.V., *Application of acoustic emission to study the cohesive and adhesive strength of asphalt*, SHRP report A-682, **1994**, p. 273.
- DE LA ROCHE C., PIAU J.-M. et STÉFANI C., Étude du comportement du bitume au pseudo-contact entre deux granulats – Description et premiers résultats de l’essai de rupture locale répétée du bitume, *Proc. of Eurobitume Workshop 99*, Luxembourg, **1999**.
- DURIEZ M., *Traité de matériaux de construction*, Éd. Dunod, Paris, tome 1, 796 p., tome 2, 689 p. **1950**.
- JOLIVET Y., MALOT M. et RONCIN B., Apport de l’émission acoustique dans la simulation de l’endommagement de structures bitumineuses, *5th Eurobitume congress*, Stockholm, **1993**, pp. 526-530.
- KAUSCH H.H., *Fracture mechanics studies of crack healing*, 2nd edition, Springer-Verlag, **1987**.
- KOSE S., GULER M., BAHIA H.H. et MASAD E., Distribution of strains within asphalt binders in HMA using imaging and finite element techniques, *Transportation Research board*, 79th Annual Meeting Washington, **2000**.
- LEFEUVRE Y., *Contribution à l’étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux : Étude de l’allongement des éprouvettes comme manifestation de l’endommagement diffus – expérimentation-modélisation*, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, **2001**.
- MOUTIER F., RAMOND G., SUCH C., BONNOT J., *Influence of nature of asphalt cements on fatigue strength of asphalt-aggregate mixtures under imposed strain*, SHRP conference « Sharing the benefits », 29-31/10/1990, London.
- RICHARD Y., LITTLE N. et BENSON C., *Chemical and mechanical evaluation on healing mechanism of asphalt concrete*, Association of asphalt paving technology, **1977**, pp. 240-271.
- STÉFANI C., *Étude du phénomène de fatigue dans les matériaux composites bitumineux*, note interne LCPC, juin **1987**.