



HAL
open science

Vers une Caractérisation Non Destructive des Performances Résiduelles des Enrobés Bitumineux et la Compréhension de leur Comportement en Fatigue

Pierre Hornych, Soufyane Benaboud, Mokhfi Takarli, Fatima Allou, Frédéric Dubois, Bertrand Pouteau, Mai Lan Nguyen, Aurélia Nicolai, Alain Beghin, Diego Ramirez Cardona

► To cite this version:

Pierre Hornych, Soufyane Benaboud, Mokhfi Takarli, Fatima Allou, Frédéric Dubois, et al.. Vers une Caractérisation Non Destructive des Performances Résiduelles des Enrobés Bitumineux et la Compréhension de leur Comportement en Fatigue. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, 2020, 977, pp.36-41. hal-04372259

HAL Id: hal-04372259

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04372259v1>

Submitted on 4 Jan 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Vers une Caractérisation Non Destructive des Performances Résiduelles des Enrobés Bitumineux et la Compréhension de leur Comportement en Fatigue

Soufyane BENABOUD (Doctorant, Laboratoire GC2D, Université de Limoges)

Mokhfi TAKARLI (Chercheur, Laboratoire GC2D, Université de Limoges)

Fatima ALLOU (Chercheuse, Laboratoire GC2D, Université de Limoges)

Frédéric DUBOIS (Chercheur, Laboratoire GC2D, Université de Limoges)

Bertrand POUTEAU (Directeur de recherche, Centre de recherche de Mérignac, Eurovia)

Aurélia NICOLAI (Responsable de projet R&D, Spie batignole)

Pierre HORNYCH (Directeur de recherche, Université Gustave Eiffel)

Mai-Lan NGUYEN (Chercheur, Université Gustave Eiffel)

Alain BEGHIN (Chercheur, Spie batignole)

Diego RAMIREZ (Chef de Projets R&I, Eiffage)

1 Introduction

L'entretien et la maintenance des infrastructures routières représentent un enjeu socio-économique considérable, notamment dans un contexte où les budgets des gestionnaires sont de plus en plus restreints. Au fil des années, les enrobés bitumineux développent un d'endommagement mécanique et un vieillissement physico-chimique des enrobés bitumineux qui découlent de phénomènes irréversibles et inévitables sous l'effet conjoint du trafic et du climat (gradient de température, humidité, UV, ...). En effet, la présence de défauts (fissures, décohésion, ...) associée à un durcissement de la phase viscoélastique ont la propriété d'amplifier les contraintes dans des zones très localisées. Ces concentrations de contraintes peuvent dans certaines conditions être suffisantes pour amorcer une rupture prématurée des matériaux constitutifs de la structure de chaussée.

Les travaux présentés dans cet article sont menés dans le cadre du projet ANR MOVEDVDC, dont les objectifs sont de proposer des approches pour mieux caractériser les performances mécaniques résiduelles des matériaux bitumineux provenant de chaussées anciennes, afin de mieux évaluer la durée de vie résiduelle de ces chaussées. Des travaux menés dans ce projet visent notamment à définir les performances mécaniques, en termes de module et de résistance en fatigue de ces matériaux anciens. Dans l'interprétation de ces essais mécaniques, on se pose en particulier la question de la présence de défauts ou de dommages dans les éprouvettes testées, qui peuvent, en effet, influencer fortement sur les résultats d'essai.

Il existe de nombreuses techniques permettant la détection et la quantification des défauts préexistants dans les matériaux et le suivi de leurs évolutions sous l'effet de différents facteurs de dégradation. Parmi ces méthodes, on distingue les méthodes directes et les méthodes indirectes.

Les méthodes indirectes ont l'avantage d'être des techniques non destructives et ne perturbent pas l'état du matériau à tester. Elles permettent de mettre en évidence la présence de défauts, la perte de propriétés mécaniques, ainsi que le suivi de l'endommagement et du vieillissement à partir d'indicateurs physiques choisis. Parmi les techniques de Contrôle Non Destructif (CND), celles basées sur la propagation d'ondes élastiques sont très prometteuses notamment grâce à leur capacité d'adaptation tant aux contraintes des essais de laboratoire sous charge, qu'à celles des essais in-situ. Dans le cadre du projet ANR MOVEDVDC, nous avons opté pour deux techniques complémentaires : d'une part les mesures ultrasonores de nature active qui ont un fort potentiel de transposition à des mesures in-situ, et d'autre part l'émission acoustique (passive) qui a la capacité d'enrichir les essais conventionnels en apportant une compréhension avancée sur les mécanismes mis en jeu lors de l'endommagement et la rupture du matériau. Néanmoins, il convient de souligner les difficultés spécifiques aux enrobés bitumineux qui en plus de leur caractère hétérogène (similaire à celui des bétons et roches), présentent une dépendance temps-température qui affecte considérablement le phénomène de propagation des ondes [1].

Dans cet article, nous présentons des résultats préliminaires obtenus sur des matériaux fabriqués en laboratoire et prélevés sur une chaussée en service depuis environ 20 ans. Nous mettrons, dans un premier temps, l'accent sur la méthodologie ultrasonore (US) avec l'objectif d'estimer les modules complexes à hautes fréquences. Une attention particulière est accordée à la méthode de détermination du temps de vol (TOF) en fonction du rapport signal/bruit (SNR) [2]. Par la suite, nous présentons le potentiel de l'émission acoustique (EA) pour caractériser le processus de fatigue mécanique lors d'un essai de flexion 2 points. Une segmentation des 3 phases de fatigue est ainsi présentée sur la base de l'analyse de l'activité acoustique. La faisabilité d'une localisation spatiale et temporelle des fissures est également discutée.

2 Cartographie ultrasonore (C-scan)

2.1 Matériau et Méthodologie

La plaque d'enrobé utilisée dans cette étude est fabriquée en laboratoire par l'entreprise Spie batignole avec les dimensions suivantes : $X(60) \times Y(40) \times Z(12.5)$ [cm³]. Le matériau constitutif est une grave bitume de classe GB3 avec une teneur en liant de 5% (3% d'un bitume d'apport de classe 70/100 et 2% d'un bitume résiduel) et un pourcentage de vide de 4 à 5%. Le liant issu du mélange a un indice de pénétrabilité de 32 (1/10 mm) à 25 °C et une température de ramollissement de 59.3 °C. La MVRE (Masse Volumique Réelle de l'Enrobé) est de 2496 kg/m³. Les mesures US, par transmission directe dans la direction de compactage (Z), ont été réalisées avec un maillage de 5×5 cm² sur le plan (XY).

L'appareil ultrasonore utilisé (Pundit PL-200) est composé d'un générateur d'impulsions allant de 50 à 400 V et un facteur de gain à la réception de 1 à 10000 (de 0 à 80 dB). La résolution temporelle est de 0,1µs et la tension est mesurée à $\pm 30,52 \mu\text{V}$ sur une échelle de 16 bits. Un couple de transducteurs piézoélectriques de type résonant (émetteur et récepteur) est utilisé pour réaliser les mesures. La fréquence de résonance est de 54 kHz \pm 5kHz pour les ondes P et de 40 kHz \pm 4 kHz pour les ondes S. Un couplant acoustique est utilisé pour assurer un bon contact entre les transducteurs et le matériau. Les mesures sont réalisées à une température de 20 °C (ambiante).

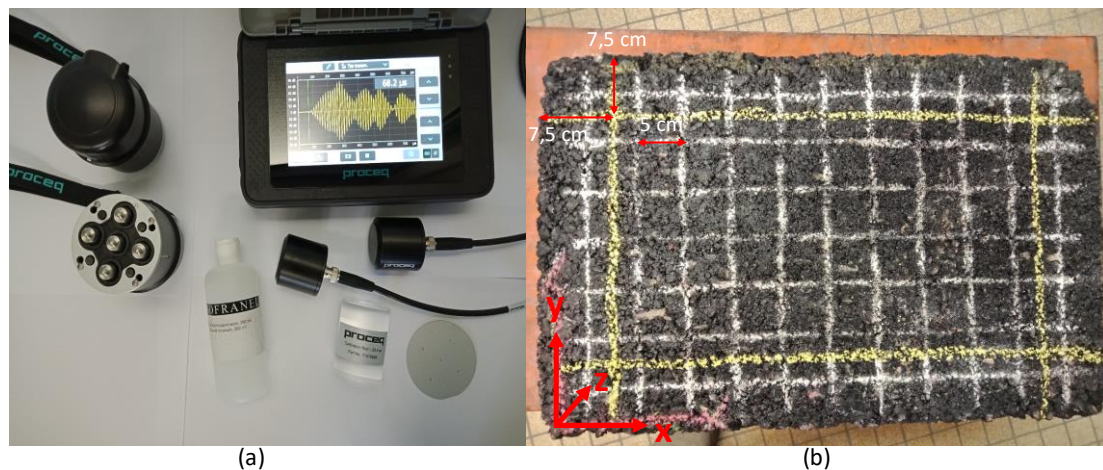


Figure 1. a) Équipement ultrasonore b) Plaque d'enrobé GB3

Le principe de l'essai US consiste à mesurer le temps de propagation de l'onde en transmission directe. En connaissant la longueur de propagation dans la direction considérée, les vitesses d'ondes de compression (P) et de cisaillement (S) sont déterminées par le rapport L/t_{vol} puis traduites en modules (E et G) et en coefficient de Poisson (ν). Il est possible de prendre en compte les effets d'anisotropie [3] et de viscoélasticité [1] en opérant des mesures complémentaires (mesures selon différentes directions de propagation avec détermination des coefficients d'atténuation).

2.2 Résultats et Discussions

Il existe dans la littérature plusieurs méthodes pour la détermination du temps de vol de l'onde tel que : le critère d'information d'Akaike [4], [5], le critère de Hinkley [2], le critère de Fisher [6] et le critère du Maximum Glissant (MG) [7]. Dans le cas de notre étude, le critère d'Akaike (AIC) est utilisé pour évaluer le TOF. Ce critère produit des résultats suffisamment fiables pour les signaux ultrasons ayant un rapport Signal/Bruit (SNR : Signal Noise Ratio) supérieur à 10 dB [6]. Dans notre cas, le SNR minimal (observé pour les signaux expérimentaux) est de 11 dB.

Le critère d'information d'Akaike est basé sur l'hypothèse qu'une série temporelle (cas des signaux discrets) peut-être décomposée en segments localement stationnaires. Le TOF (Time Of Flight) est défini pour ce critère comme le minimum de la fonction AIC. Ce minimum correspond à une séparation optimale entre le bruit et le signal. L'amplitude de la fonction AIC est calculée par l'expression suivante [2], [6], [4] :

$$AIC[k] = k \cdot \log(\text{var}(x[1:k])) + (N - k) \cdot \log(\text{var}(x[k + 1:N])) \quad (1)$$

Avec :

- $x[k]$: signal à l'indice k,
- N : le nombre d'échantillons composant le signal,
- Var : variance d'une série.

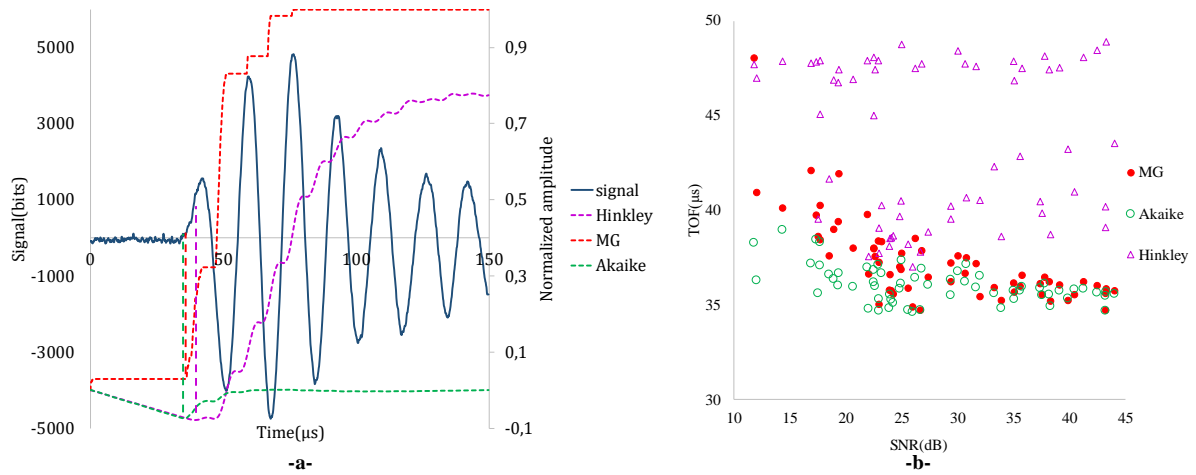


Figure 2. a) Méthodes de détermination du TOF b) Effet du SNR sur les valeurs du TOF

La Figure 3 présente les cartographies des vitesses des ondes P (V_p) et des ondes S (V_s) projetées sur le plan (XY). L'espacement entre les iso-valeurs des vitesses est déterminé en prenant en compte les incertitudes de mesures, la reproductibilité et la répétabilité.

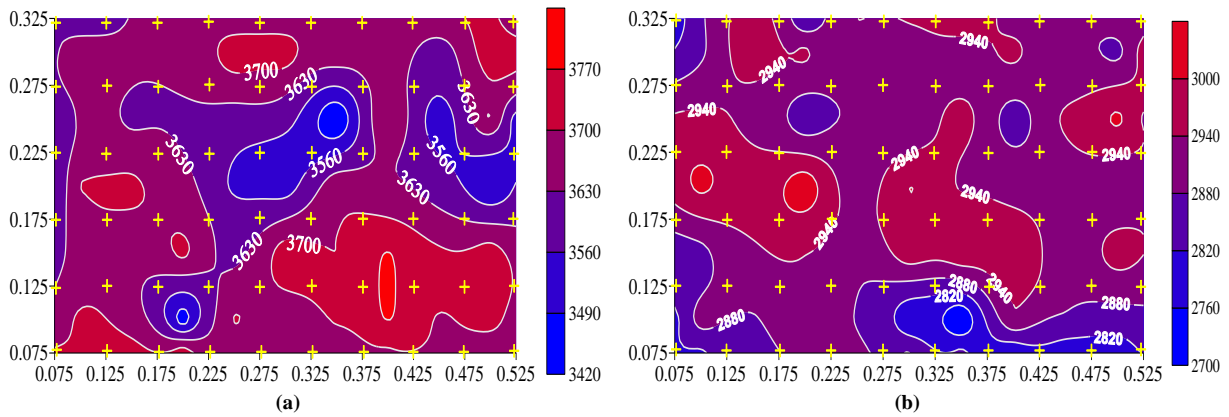


Figure 3. Cartographies des vitesses US a) ondes de compression (P) b) ondes de cisaillement (S)

Le passage des vitesses US en modules est réalisé avec l'hypothèse simplifiée de propagation dans un milieu élastique, homogène et isotrope. Les longueurs d'onde mises en jeu sont en effet supérieures à la taille des granulats. Elles sont comprises entre 6 et 7 cm pour les ondes P et entre 6.5 et 7.5 cm pour les ondes S. Les caractéristiques mécaniques élastiques (E , G et ν) sont données en fonction de la vitesse de propagation de l'onde de compression (V_p), de l'onde de cisaillement (V_s) et de la masse volumique (ρ) par les équations suivantes :

$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \rho V_p^2 \quad (2)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (3)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (4)$$

Trois méthodes sont utilisées pour la détermination de la masse volumique : la méthode par calcul (NF EN 12697-5), par gamma-densimétrie (NF-EN 12697-7) et par pesée. La Figure 4 montre les cartographies de E , G et ν obtenues en considérant la masse volumique déterminée par les mesures au banc gamma. Les valeurs nominales sont : 26.9 GPa pour E , 19.4 GPa pour G et 0.19 pour le coefficient de Poisson. À titre d'exemple, nous trouvons pour les trois méthodes de détermination de masse volumique un écart type de l'ordre de 1 GPa pour la valeur nominale de E . La cartographie permet également d'évaluer l'homogénéité de la plaque d'enrobé, et la présence éventuelle de défauts. Cette information pourra être très utile en appliquant la méthode à des matériaux prélevés sur site.

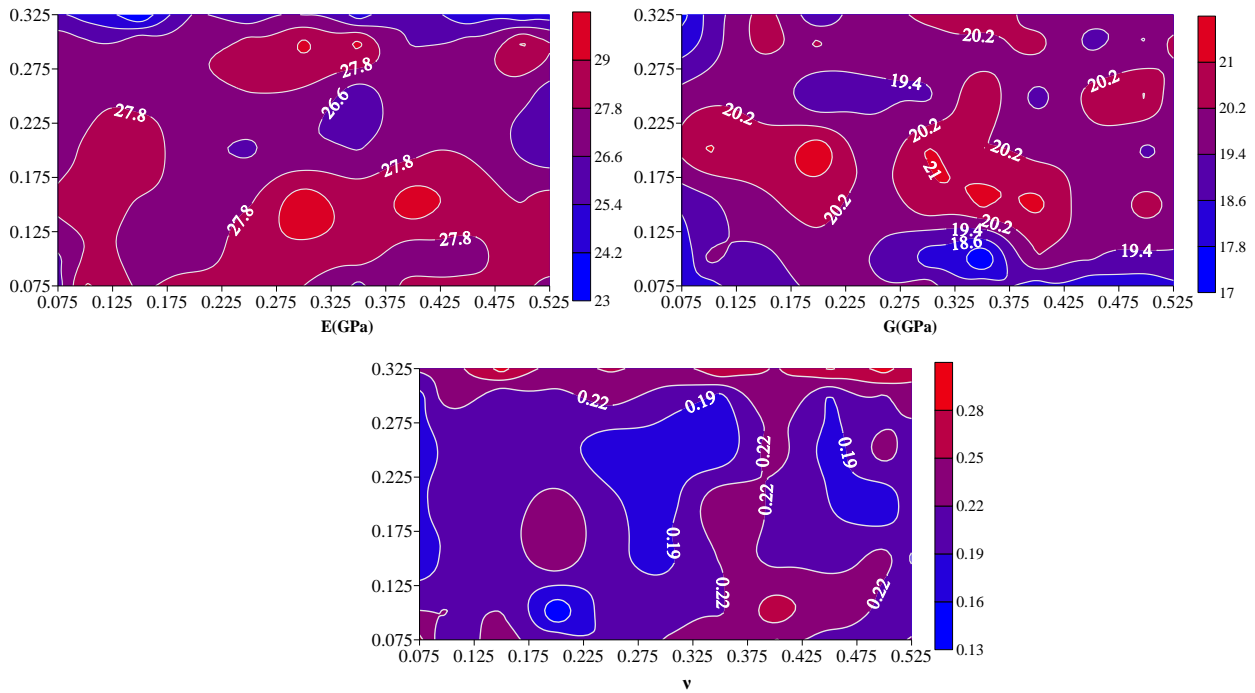


Figure 4. Répartition spatiale des propriétés mécaniques dans la plaque d'enrobé

Des travaux antérieurs montrent que les données des essais mécaniques ne permettent pas d'atteindre des valeurs caractéristiques des enrobés telles que les modules vitreux (E_∞ et G_∞). Basé sur la détermination des grandeurs caractéristiques de l'onde US (vitesses et facteurs d'atténuation), il est possible d'approcher ces valeurs avec un couple de fréquence/température adapté (500kHz, -20°C) (Figure 5)[1].

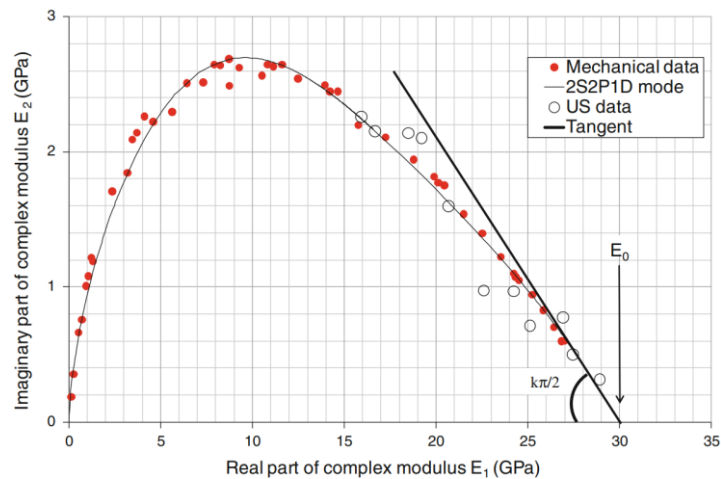


Figure 5. Détermination des propriétés viscoélastiques par méthode US [8]

3 Suivi du processus de fatigue mécanique par EA

3.1 Matériau et Méthodologie

Dans le projet MOVEDVDC, des prélèvements de matériaux sont réalisés sur plusieurs sites de chaussées anciennes, dans le but de caractériser le comportement, et le niveau d'endommagement, de ces matériaux anciens, et de le comparer avec leur état initial. Dans ce cadre, des essais de fatigue couplés avec des mesures d'émissions acoustiques ont été réalisés, afin d'essayer de mieux évaluer la réponse des matériaux au cours de ces essais, et éventuellement identifier un état d'endommagement initial des matériaux prélevés.

L'enrobé bitumineux testé a été prélevé sur une structure de chaussée en service construite en juin 2002 (couche de fondation d'une structure autoroutière, provenant de l'A35). La formulation du matériau est fournie dans le Tableau 1 et sa courbe granulométrique associée est présentée sur la Figure 6.

Tableau 1. Formulation de l'enrobé bitumineux étudié

Type de granulat	Pourcentage dans le mélange (%)
Sable 0/4	42
Grave 4/6	10
Grave 6/10	10
Grave 10/14	36
Filler	2

Teneur en liant (de pénétration 35/50) : 4.6 ppc

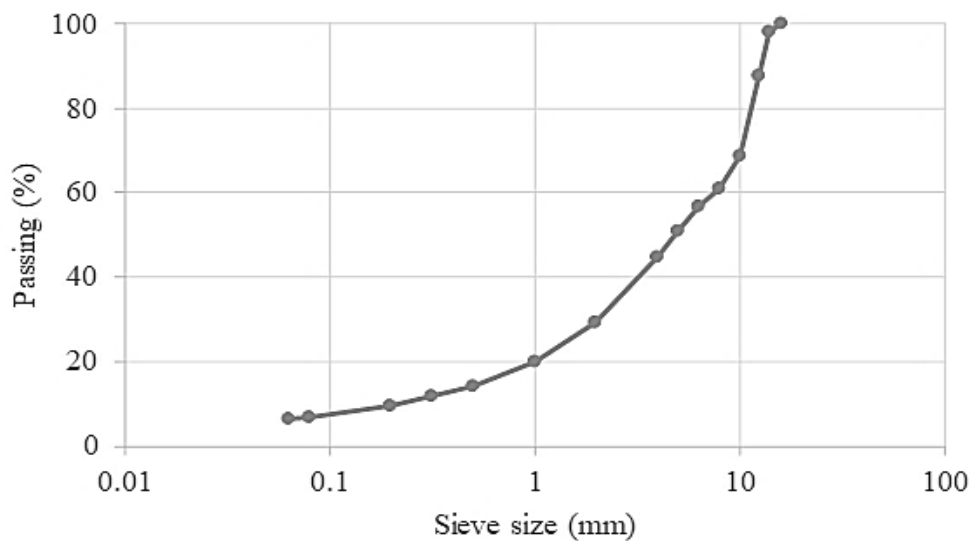


Figure 6. Courbe granulométrique du squelette granulaire

Pour la détermination de la résistance à la fatigue du mélange bitumineux, des essais en flexion 2 points ont été réalisés conformément à la norme EN 12697-24 : 2018 (annexe A). Les éprouvettes testées sont de forme trapézoïdale (Figure 7.a) asservies en déformation avec une amplitude de 175 $\mu\text{m}/\text{m}$ à une fréquence de 25 Hz et une température de 10 °C.

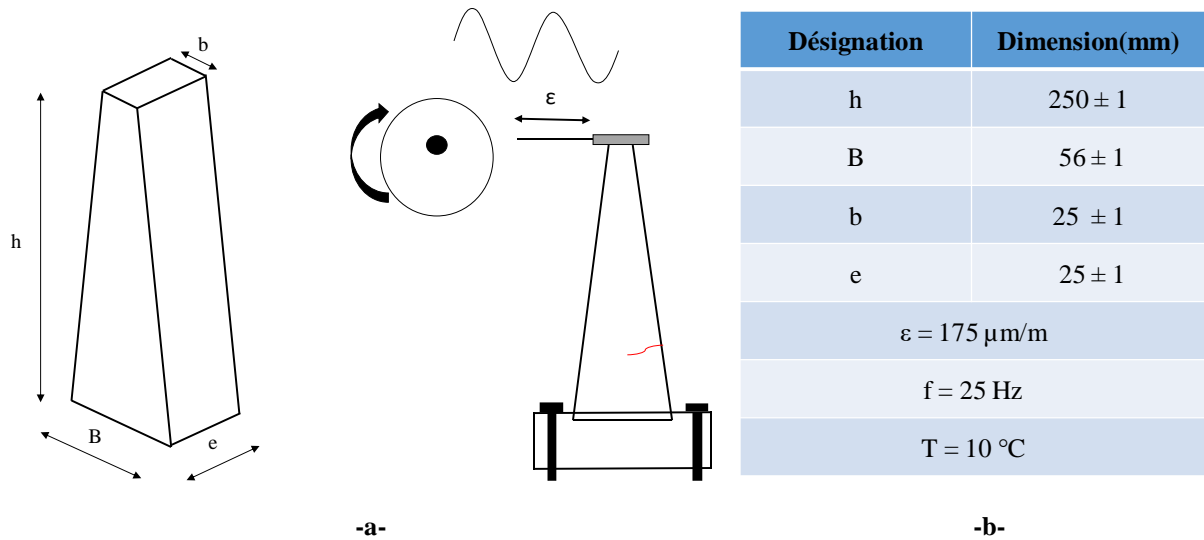


Figure 7. a) Géométrie de l'éprouvette et principe de l'essai b) Dimensions de l'échantillon et paramètres d'essai

Afin de suivre l'activité acoustique engendrée par les mécanismes d'endommagement et de rupture, une chaîne d'acquisition et d'enregistrement de phénomènes vibratoires transitoires a été utilisée. Elle est composée de : 8 capteurs piézoélectriques de type Nano30 (bande de fréquences de 125 à 750 kHz, de fréquence de résonance à 140 et 300 kHz), de 8 préamplificateurs IL40S (facteur de gain réglé à 40 dB) connectés aux capteurs, et d'un ordinateur équipé de cartes d'acquisition et de traitement de signaux acoustiques. Un couplant acoustique est utilisé pour assurer un bon contact et une meilleure transmission des ondes à travers la surface de contact. Le seuil de détection du signal est fixé et maintenu constant à 40 dB. La position des capteurs sur l'éprouvette est donnée par la Figure 8.



Figure 8. Dispositif expérimental pour l'essai mécanique et implantation des capteurs

3.2 Résultats et Discussion

L'évolution des hits (nombre de signaux acoustiques enregistrés) en fonction des cycles de chargement montre une distinction nette entre les capteurs situés en bas de l'éprouvette et ceux positionnés sur la partie haute (Figure 9). La cinétique globale reste néanmoins similaire, mais on constate une activité plus importante en bas de l'éprouvette,

associée à un déphasage entre les deux plans de mesures (haut et bas). D'après la norme française AFNOR, l'EA est définie comme un phénomène de création d'ondes élastiques transitoires, provoquées par des micro-déplacements locaux au sein du matériau. La norme ASTM, quant à elle, privilégie les aspects énergétiques du phénomène. On parle alors d'une dissipation d'énergie à partir d'une source localisée. La différence en nombre de hits et le déphasage de cinétiques entre les mesures hautes et basses peuvent être expliqués par une différence d'éloignement avec les sources. Dans un matériau dissipatif, comme l'enrobé bitumineux, une distance de propagation plus importante conduit inévitablement à un affaiblissement de l'onde élastique et par conséquent, à une incapacité de détection en-dessous du seuil de 40 dB. Nous supposons que les capteurs les plus proches sont plus sensibles aux événements microscopiques de faible énergie. Les capteurs les plus éloignés de la source détectent principalement les événements les plus énergétiques.

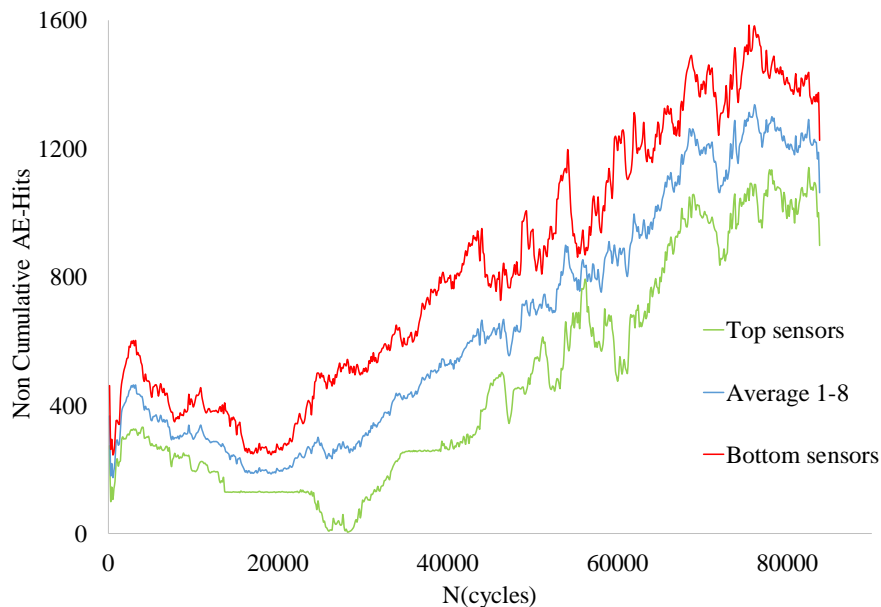


Figure 9. Évolution des hits au cours de l'essai

Sur la base de recherche de points singuliers et d'un traitement statistique, il est possible de segmenter l'activité acoustique en 3 phases bien distinctes (Figure 10) :

AE-Phase I : une manifestation d'une activité acoustique dès le début de l'essai attribuée à l'activation des défauts préexistants dans le matériau, qui provient d'une chaussée ancienne. Cette activité baisse progressivement à cause de l'échauffement du matériau dans la première phase de l'essai de fatigue (atténuation des ondes par effet visqueux).

AE-Phase II : après une baisse et/ou une satabilisation de l'activité acoustique, on note par la suite une reprise du nombre de hits mettant en évidence la mise en place d'un nouveau mécanisme d'endommagement (initiation de nouvelle microfissures et/ou propagation des fissures existentes). Dans le cas de l'essai traitée par la Figure 10, ce seuil d'endommagement correspond à une baisse de module de 17%.

AE-Phase III : dans la dernière phase de l'essai de fatigue, l'activité acoustique présente une certaine instabilité caractérisée par des baisses et augmentations significatives du nombre de hits. Cette phase est associée aux mécanismes de coalescence des fissures et l'initiation de la ruine de l'éprouvette. Dans le cas de l'essai traitée par la Figure 10. Ce seuil d'initiation de la rupture correspond à une baisse de module de 26%.

Cette analyse, basée sur l'émission acoustique, semble pouvoir apporter des informations complémentaires, par rapport à la seule mesure de l'évolution du module, sur les mécanismes de dégradation observés au cours de l'essai : endommagement initial, instabilité des émissions acoustiques indiquant le début de la phase d'accélération de l'endommagement (coalescence des micro-fissures) conduisant à la rupture de l'éprouvette.

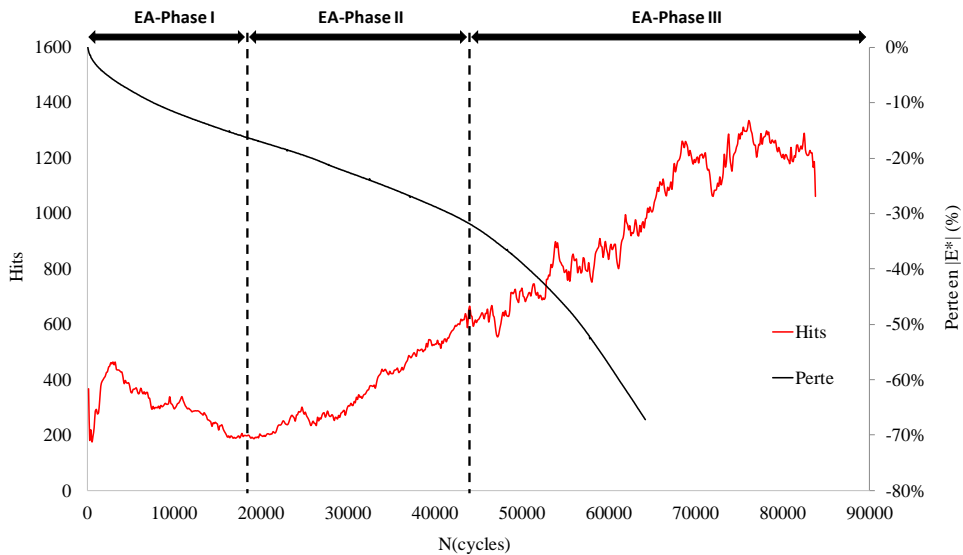


Figure 10. Segmentation du processus de fatigue en 3 phases

En plus de cette approche globale, il est possible d'utiliser l'EA pour situer dans l'espace et le temps la position des sources dissipatives. La Figure 11 montre des cartographies de localisation des événements acoustiques à différentes valeurs de perte de module. On note une forte activité à la base ainsi que dans la partie centrale de l'éprouvette. Cependant, il faut prendre des précautions dans l'interprétation de ces cartographies notamment vis-à-vis des artefacts de localisation induits par une prise en compte d'une vitesse de propagation d'onde constante et isotrope. Une analyse avancée des événements acoustique est nécessaire afin d'interpréter et de prévoir le schéma de fissuration au cours de l'essai. Pour ce faire, par exemple, en prenant en compte l'amplitude des signaux acoustiques en constate sur la Figure 12 que les événements les plus forts sont positionnés au pied de l'éprouvette.

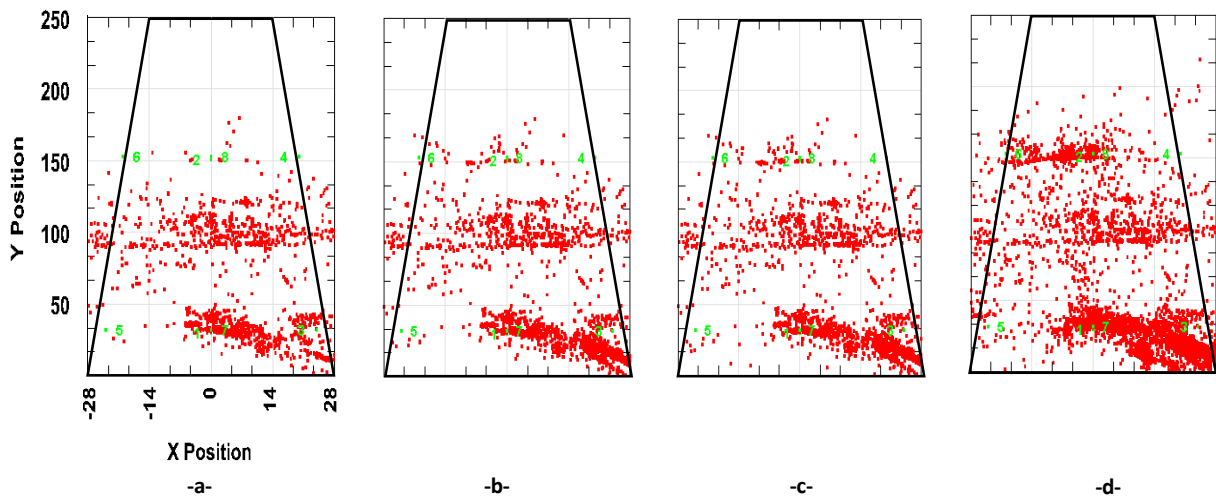


Figure 11. Localisation des événements acoustiques à a) 17% b) 30% c) 31% et d) 50% de perte de module

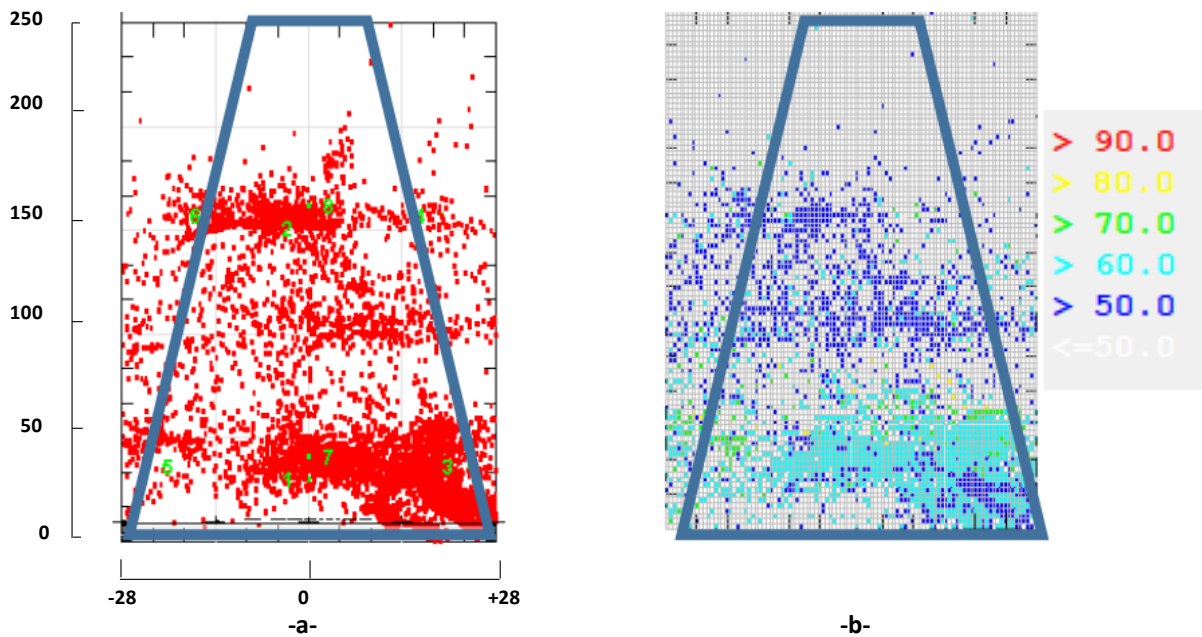


Figure 12. a) Localisation des événements ; b) Amplitudes associées à ces événements en fin d'essai

4 Conclusions

Cette étude préliminaire met en avant le potentiel de deux techniques de contrôle non-destructives (US et EA) dans la caractérisation avancée des enrobés bitumineux, et en particulier d'éprouvettes d'enrobé prélevées sur site, qui peuvent présenter des défauts préexistants. En dépit d'un fort potentiel de ces techniques, leur usage dans ce genre de matériau reste néanmoins limité. Ceci s'explique principalement par la difficulté dans la prise en compte de la complexité des phénomènes de propagation dans un milieu hétérogène et viscoélastique. En effet, nous avons montré la nécessité :

1-Pour les mesures US : (1) de choisir une méthode adaptée pour la détermination du TOF en fonction du rapport signal-bruit (SNR : Signal to Noise ratio) ; (2) d'une estimation la plus réaliste possible de la masse volumique pour approcher au mieux les valeurs de modules à hautes fréquences ; (3) de prendre en compte les phénomènes d'atténuation pour une dissociation des parts réelle et imaginaire ;

2-Pour les mesures EA (1) de tenir compte de la position des capteurs dans la segmentation des 3 phases du processus de fatigue ; (2) d'une analyse critique des cartographies de localisation des sources dissipatifs.

Dans le projet MOVEDVDC, l'utilisation de ces techniques sera poursuivie, en lien avec les essais de fatigue réalisés sur les enrobés bitumineux prélevés sur chaussées anciennes, afin d'améliorer la compréhension du comportement de ces matériaux, et l'interprétation des durées de vie en fatigue obtenues.

5 Remerciements

Le travail présenté dans ce projet a été financé par l'ANR (projet MOVEDVDC, ANR-17-CE22-0014).

6 Références

- [1] N. Larcher, M. Takarli, N. Angellier, C. Petit, et H. Sebbah, « Towards a viscoelastic mechanical characterization of asphalt materials by ultrasonic measurements », *Materials and Structures*, vol. 48, n° 5, p. 1377-1388, mai 2015.
- [2] J. H. Kurz, C. U. Grosse, et H.-W. Reinhardt, « Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete », *Ultrasonics*, vol. 43, n° 7, p. 538-546, juin 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.005>.
- [3] M. C. Jurado, « QUANTIFYING ANISOTROPY IN ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS USING AN ULTRASONIC METHOD ».
- [4] H. Zhang, C. Thurber, et C. Rowe, « Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings », p. Vol. 93, No. 5, p. 1904–1912, oct. 2003, doi: 10.1785/0120020241.
- [5] A. Carpinteri, J. Xu, G. Lacidogna, et A. Manuello, « Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures », *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, n° 4, p. 529-537, avr. 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.013.
- [6] A. Arciniegas, L. Brancheriau, et P. Lasaygues, « Tomography in standing trees: revisiting the determination of acoustic wave velocity », *Annals of Forest Science*, vol. 72, n° 6, p. 685-691, sept. 2015, doi: 10.1007/s13595-014-0416-y.
- [7] S. Benaboud, M. Takarli, F. Allou, F. Dubois, A. Nicolaï, et A. Beghin, « Efficiency of Ultrasonic Pulse Velocity test in the Determination of Residual Asphalt Mix Pavement Properties », présenté à RILEM International Symposium on Bituminous Materials, Lyon, France, 2020.
- [8] N. Larcher, « Contribution à la caractérisation des matériaux au comportement viscoélastique par méthode ultrasonore : application aux matériaux bitumineux », Université de Limoges, Limoges, France, 2014.