

Vers une détermination non destructive par ultrasons des propriétés mécaniques résiduelles des structures de chaussées.

BENABOUD Soufyane^a, ALLOU Fatima^a, TAKARLI Mokhfi^a, DUBOIS Frederic^a, NICOLAI Aurélie^b, BEGHIN Alain^b.

a. Université de Limoges, Laboratoire GC2D, Centre Universitaire de Génie Civil, Bd Jacques Derche, 19300, Egletons (soufyane.benaboud@unilim.fr, fatima.allou@unilim.fr, mokhfi.takarli@unilim.fr, frederic.dubois@unilim.fr)

b. Spie batignolles, Entreprise malet, 30 Avenue de Larrieu, 31081, Toulouse (aurelia.nicolai@spiebatignolles.fr, alain.beghin@entreprise-malet.fr)

Résumé :

Ce papier présente les résultats préliminaires d'une étude expérimentale portant sur la détermination des propriétés élastiques (E , G et ν) d'un enrobé bitumineux (GB 0/14) fabriqué en laboratoire. Les résultats sont issus par des mesures de vitesses de propagation d'ondes ultrasonores (compression et cisaillement) et de la mise en équation de la théorie de propagation des ondes dans un milieu élastique homogène, continu et isotrope. Compte tenu du caractère très atténuant et dispersif de ce matériau, un accent particulier est accordé à la détermination du temps de vol.

Abstract :

This paper presents the preliminary results of an experimental study on the determination of the elastic properties (E , G and ν) of a bituminous mix (GB 0/14) manufactured in the laboratory. The results are obtained by ultrasonic wave velocity measurements (compression and shear) and the equation of the elastic wave propagation theory in homogeneous, elastic, continuous and isotropic medium. Considering the very attenuating and dispersive nature of this material, particular emphasis is given to the determination of the Time Of Flight (TOF).

Mots clefs : Enrobé bitumineux, propriétés élastiques, ultrasons.

Key words : bituminous mixture, elastic properties, ultrasounds.

1 Introduction

L'endommagement mécanique et le vieillissement physico-chimique des enrobés bitumineux sont des phénomènes inévitables qui se produisent durant la durée de vie des infrastructures routières. Les causes principales sont le chargement répétitif en fatigue du trafic et les conditions environnementales

(humidité, UV, ...). Ces phénomènes sont constamment en opposition avec les moyens économiques permettant de préserver l'intégrité et la durabilité des structures routières.

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet ANR MOVEDVDC (MOdélisation du Vieillissement et de l'Endommagement pour l'évaluation de la Durée de Vie des Chaussées). Ce projet vise à améliorer les méthodes de redimensionnement des chaussées anciennes pour optimiser leur entretien de ces dernières. La démarche proposée dans MOVEDVDC se focalise sur la caractérisation des performances mécaniques résiduelles des matériaux constituant les couches d'assise et leur évolution dans le temps. Pour ce faire, l'étude expérimentale sera menée sur des enrobés prélevés sur cinq chaussées routières en service depuis plus de 15 ans et sur des enrobés analogues fabriqués puis vieillis artificiellement en laboratoire. Deux types d'essais mécaniques sont prévus dans ce projet : des essais de modules complexe et des essais de fatigues sous différents types de chargements (traction-compression, torsion et traction directe). Ces essais seront associés à des mesures de propagation d'ondes élastiques (ultrasoniques US [1] et émissions acoustiques EA [2]).

Les méthodes de contrôles non-destructives CND sont largement utilisées dans le domaine du Génie Civil pour le diagnostic des structures in-situ et également pour la caractérisation des matériaux en laboratoire. Dans le domaine des chaussées, les enrobés bitumineux ont un comportement thermo-viscoélastique qui entraîne un déphasage et une atténuation de l'onde. De plus, des hétérogénéités (qui se présentent dans le matériau et qui peuvent être à l'origine de la dispersion des ondes) s'ajoutent à la sensibilité thermique et cinétique (fréquence) du comportement de la matrice bitumineuse. En effet, dans la littérature, de nombreuses études ont été réalisées sur des enrobés mais ce sont très souvent circonscrites à une approche élastique de la propagation de l'onde. Ces types d'essai sont clairement des tests dynamiques car les effets d'inertie (ou accélération) sont d'une importance primordiale. L'essai d'impulsion ultrasonique (UPV : Ultrasonic Pulse Velocity) peut être utilisé pour évaluer le module dynamique des matériaux bitumineux à différentes températures [3]. Des essais d'impact de résonance pour les deux types d'ondes (compression et cisaillement) peuvent être également mise en oeuvre.

Les résultats de ces études ont montré une bonne concordance avec les propriétés viscoélastiques déduites par optimisation numérique. La durée de vie en fatigue des enrobés ainsi que l'effet de l'anisotropie sont également évaluées à l'aide de la propagation des ondes ultrasonores [4],[5]. La vitesse des ondes ultrasonores déterminée par l'essai UPV est sensible au changement et à l'endommagement développé après un conditionnement en humidité [6].

L'objectif de ce travail est de déterminer les caractéristiques élastiques (E , G et ν) d'une plaque d'enrobé (fabriquée en laboratoire) issues d'un scan ultrasonores (ondes de compression 'P' et de cisaillement 'S') pour une température et une fréquence données. Concernant le passage des vitesses ultrasonores vers les propriétés élastiques, une approche élastique basée sur la théorie de propagation des ondes mécaniques dans un milieu élastique, homogène et isotrope, est utilisée. De plus, la prise en compte de la viscoélasticité dans la détermination des propriétés élastiques nécessite la connaissance des vitesses V_P et V_S , la mesure des facteurs d'atténuation en séparant les effets liés à l'étalement géométrique et la dispersion causée par les hétérogénéités [1]. Une des actions proposées (pour atteindre cet objectif) est de reconstituer, sur la base de la microstructure générée par un logiciel en prenant en compte la distribution granulaire, un modèle viscoélastique hétérogène par Eléments Finitis qui prend en compte également l'endommagement de la matrice bitumineuse. Enfin, l'objectif est de proposer, sur la base de plaques prélevées in-situ ou fabriquées en laboratoire, une cartographie spatiale des propriétés élastiques de l'enrobé étudié.

2 Matériau et méthodologie

2.1 Matériau

La plaque d'enrobé utilisée dans cette étude est fabriquée en laboratoire par l'entreprise MALET avec les dimensions suivantes : $L(60) \times l(40) \times H(12.5) \text{ cm}^3$. Le matériau constitutif est un enrobé bitumineux de type 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 utilisé est un bitume avec un indice de pénétrabilité de 32 (1/10 mm) à 25 °C et température de ramollissement de 59.3 °C. La MVRE (Masse Volumique Réelle de l'Enrobé) est de 2496 kg/m³.

2.2 Appareil ultrasonore

Un appareil ultrasonore (Pundit PL-200) est composé d'un générateur d'impulsion 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 de compression 'P' et de 40 kHz \pm 4 kHz pour les ondes de cisaillement 'S'. Un couplant acoustique est utilisé pour assurer un bon contact entre les transducteurs et le matériau. La Figure 1 présente le dispositif expérimental.

Le principe consiste à déterminer le temps de parcours de l'onde en transmission directe pour une température de mesure de 20°C. En connaissant la distance de propagation 'd' de l'onde, la vitesse est déterminée par le rapport (d/t_{vol}).

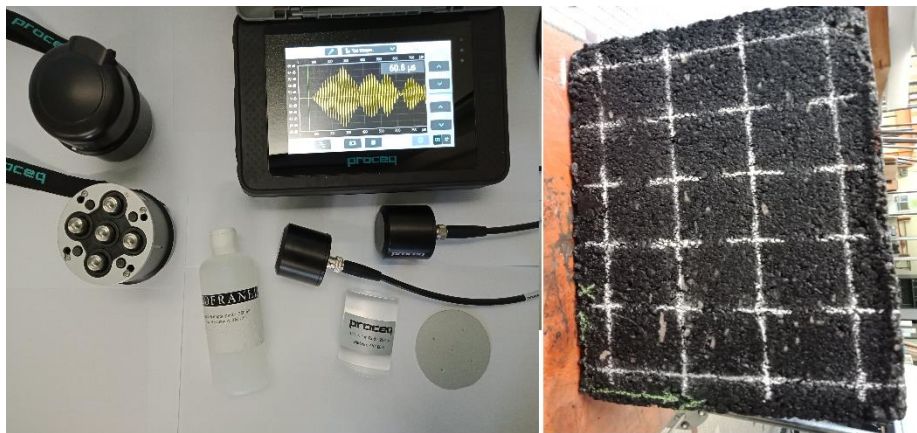


Figure 1. Dispositif expérimental : appareil ultrasonore et plaque d'enrobé de GB3

2.3 Détermination du temps de vol (TOF)

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 [7], [8], le critère de Hinkley [9] et le critère de Fisher [10]. Dans le cas de notre étude, le critère d'Akaike 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 [10]. Dans notre cas, le SNR minimal (observé pour les signaux expérimentaux) est de 14 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 [9], [10], [7] :

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

Avec :

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

Un exemple de détermination du TOF d'un signal expérimental est présenté en Figure 2. L'amplitude AIC a été normalisée par rapport à la valeur maximale.

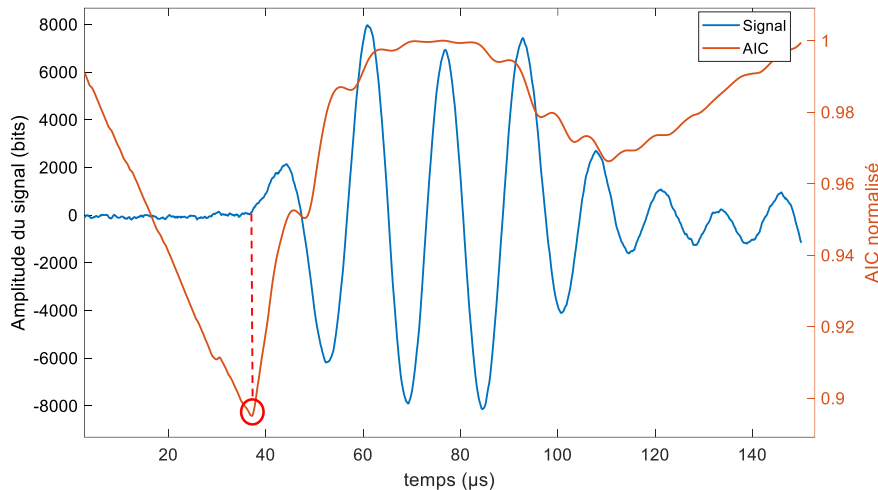


Figure 2. Exemple de détermination de TOF avec le critère d'Akaike

3 Propagation d'onde dans un milieu homogène, élastique et isotrope

La théorie de propagation des ondes mécaniques, dans un milieu ayant un comportement élastique, permet de déterminer les modules de Young "E", de cisaillement "G" et le coefficient de Poisson "ν" du matériau, et ce, en fonction de la vitesse de propagation des ondes de compression "P" et de cisaillement "S". Dans ces conditions, l'équation différentielle en déplacement, extraite du principe fondamental de la dynamique, admet la solution suivante :

$$u(x, t) = u_0 \exp(i\omega t - ikx) \quad [2]$$

u_0 représente le déplacement initial de l'onde dans la direction orientée par x , ω est la pulsation (rad.s^{-1}) et k est le nombre d'onde (m^{-1}). L'équation [2] se décline selon les indices de compression et de cisaillement.

Les caractéristiques mécaniques élastiques sont données en fonction de la vitesse de propagation de l'onde de compression "P" et de l'onde de cisaillement "S" par les équations suivantes :

$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \rho V_p^2 \quad [3]$$

$$G = \rho V_s^2 \quad [4]$$

V_p et V_s désignent respectivement les vitesses de propagation de l'onde "P" et "S".

L'hypothèse d'un matériau élastique permet de définir l'expression du coefficient de Poisson 'ν' comme suit :

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad [5]$$

4 Résultats préliminaires et discussion

Dans cette section, les résultats du calcul des propriétés mécaniques (E, G et ν) de la plaque d'enrobé sont présentés sous forme de cartographies, et ce, à partir des vitesses de propagation des ondes 'P' et 'S'. La Figure 3 présente les cartographies des vitesses V_p et V_s projetées suivant la direction de l'épaisseur de la plaque ($e = 12.5$ cm) correspondant à la direction de propagation.

Comme présenté dans la section 3, il est possible de remonter aux propriétés mécaniques du matériau (E, G et ν) à partir des cartographies de vitesses de propagation des ondes. Les cartographies sont obtenues en supposant une densité homogène du matériau composant la plaque.

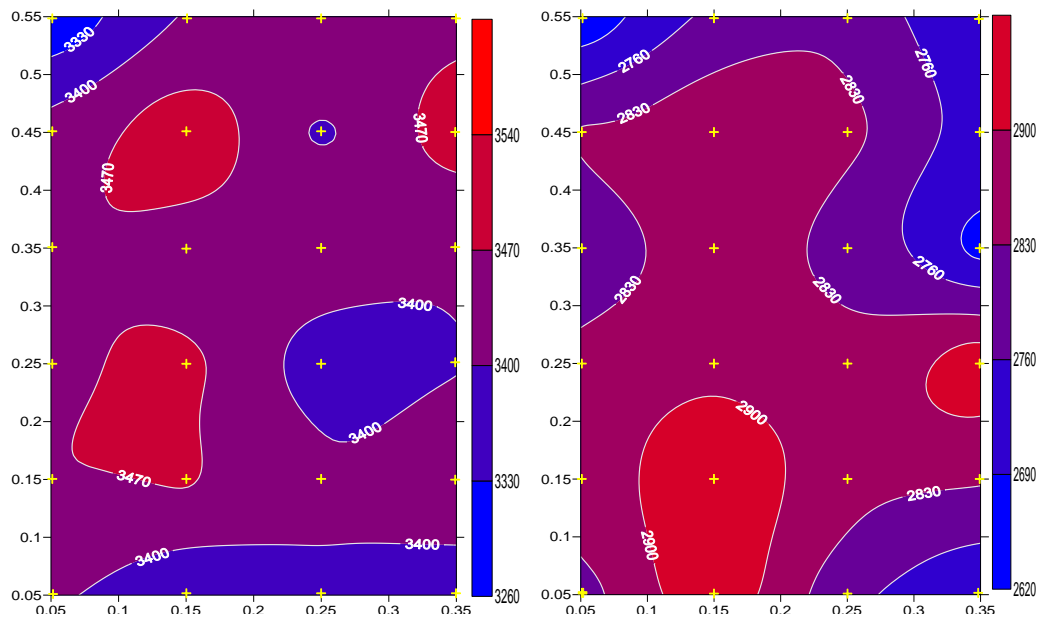


Figure 3. Cartographies des vitesses de propagation des ondes a) de compression à gauche et b) de cisaillement à droite (m/s)

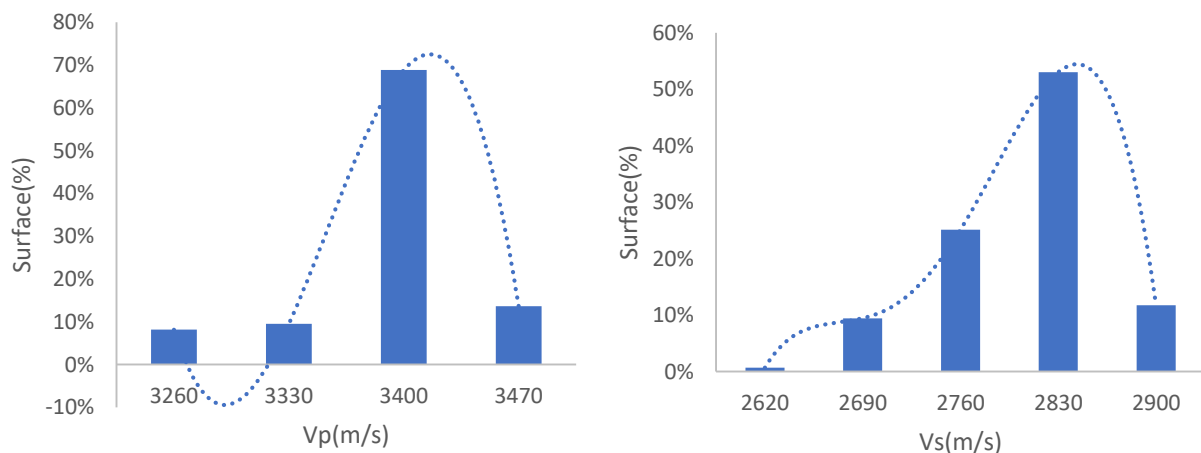


Figure 4. Distribution statistique des vitesses de propagation de l'onde ; à gauche de compression et à droite de cisaillement

La Figure 4 donne une distribution statistique vitesses issue des cartographies de vitesses présentées dans la Figure 3. Cette distribution suit une loi gaussienne. L'analyse statistique de ces résultats montre que la largeur de la courbe est plus étroite pour les vitesses de propagation des ondes de compression (V_p). En revanche, la courbe étant plus large dans le cas des vitesses des ondes de cisaillement (V_s). Cette dispersion revient à la forte atténuation et la polarisation des ondes de cisaillement.

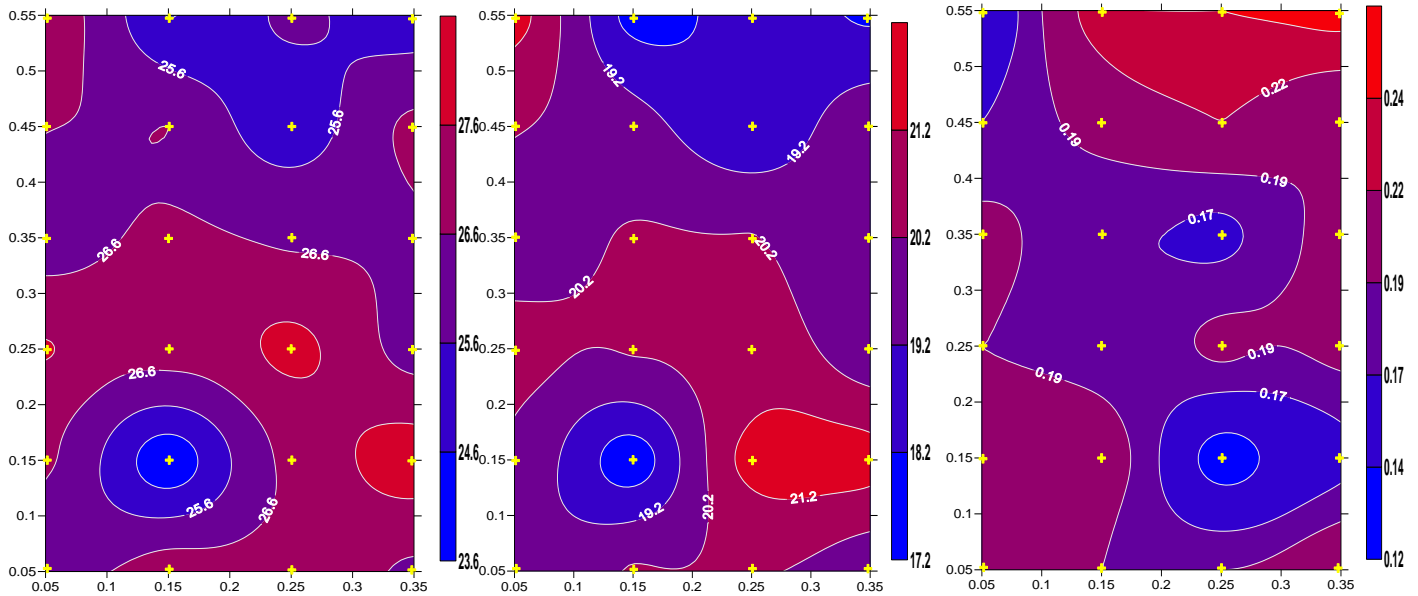


Figure 5. Cartographies des modules a) A gauche : module axial E b) Au milieu : module de cisaillement G en (GPa) c) A droite : Coefficient de Poisson ν

La distribution spatiale des modules (E et G) présentée dans la Figure 5 montre une relative homogénéité des propriétés mécaniques avec les valeurs les plus faibles situées aux deux extrémités de la plaque dans le sens de compactage (Effet de bords). Les valeurs du module axial "E" sont comprises entre 23.5 et 28.3 GPa et entre 17.3 et 21.8 GPa pour le module de cisaillement "G".

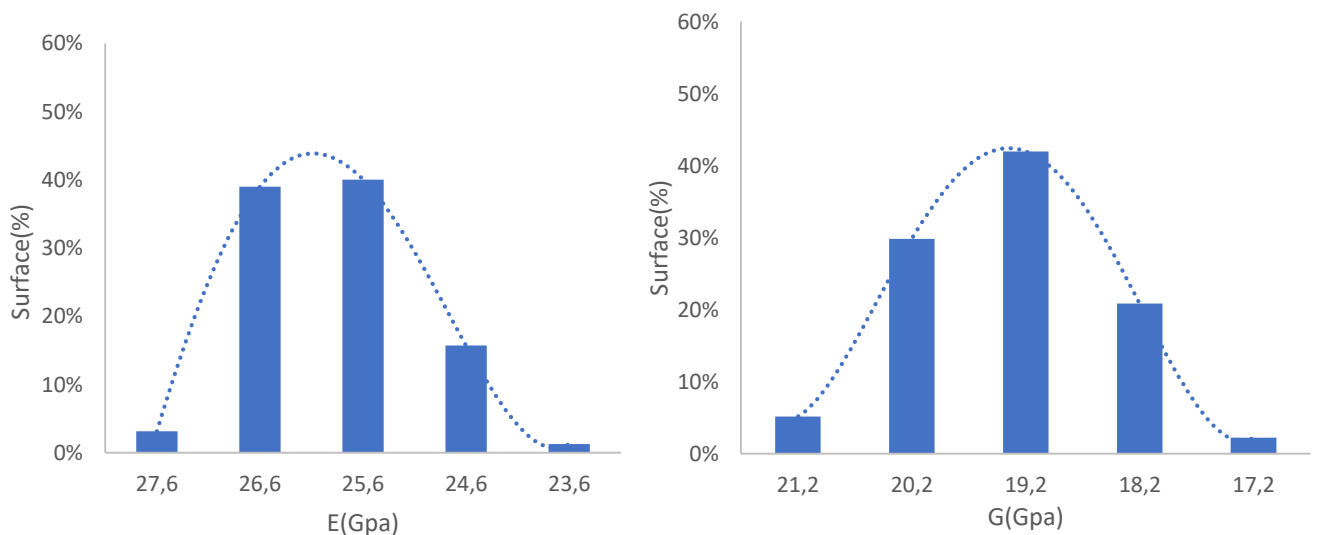


Figure 6. Distribution statistique des propriétés mécaniques ; à gauche le module axial E et à droit le module de cisaillement G

La Figure 6 donne une distribution statistique des modules issue des cartographies présentées dans la Figure 5. Cette distribution suit une loi gaussienne pour laquelle nous utilisons l'intervalle de fluctuation

au seuil de 95 % pour évaluer la dispersion des mesures et conclure sur l'homogénéité de la plaque d'enrobé. L'analyse statistique de ces résultats montre que les valeurs du module "E" sont comprise à 95 % entre 24.8 et 27.4 GPa et de 18.1 à 20 GPa pour le module de cisaillement. Ceci nous donne des intervalles de confiance relativement étroites de l'ordre de 2.6 GPa pour E et 1.9 GPa pour G, montrant ainsi une bonne homogénéité de la plaque fabriquée en laboratoire.

5 Conclusion et perspectives

Dans cette étude, une caractérisation des propriétés mécaniques d'une plaque d'enrobé fabriquée en laboratoire a été réalisée par le biais de vitesses d'ondes ultrasonores en compression et en cisaillement. Du fait de la thermo-sensibilité et la sensibilité cinétique de l'enrobé bitumineux les mesures ont été réalisées à une température constante de 20 °C et une bande de fréquences ultrasonores très étroite. Les résultats obtenus montrent l'importance d'adapter la méthode de détermination du TOF en fonction du SNR. Dans le cas présent le critère le plus approprié est celui proposé par Akaike. La distribution spatiale des vitesses montre une plus grande dispersion dans le cas de l'onde de cisaillement compte tenu de leur forte atténuation dans le matériau et les problèmes liés à la polarisation des ondes. La transformation des cartographies des vitesses en propriétés élastique E, G et ν par le biais de la théorie de propagation des ondes élastique montre une très bonne homogénéité des propriétés mécaniques de la plaque à l'exception des effets de bords. Cependant, il reste à conclure sur l'effet concomitant lié à la densité du matériau supposé constante dans l'ensemble de la plaque. Les futurs travaux porteront sur ce point particulier et étendant l'étude à une plus large gamme de température et de fréquence dans l'optique d'une confrontation avec les essais des modules complexes représentés généralement sous la forme d'une courbe maîtresse.

6 Remerciement

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR-MOVEDVDC soutenu par l'Agence National de Recherche (ANR-17-CE22-0014).

7 References

- [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] M. Diakhaté, N. Larcher, M. Takarli, N. Angellier, et C. Petit, « Acoustic Techniques for Fatigue Cracking Mechanisms Characterization in Hot Mix Asphalt (HMA) », dans *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, A. Scarpas, N. Kringos, I. Al-Qadi, et L. A., Éd. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012, p. 771-781.
- [3] J. R. Medina, B. S. Underwood, et M. Mamlouk, « Estimation of Asphalt Concrete Modulus Using the Ultrasonic Pulse Velocity Test », *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, vol. 144, n° 2, p. 04018008, juin 2018.
- [4] H. D. Benedetto, C. Sauzéat, et J. Sohm, « Stiffness of bituminous mixtures using ultrasonic waves propagation », p. Vol 10(4), pp 789-814, 2009.
- [5] D. Mounier, H. Di Benedetto, et C. Sauzéat, « Determination of bituminous mixtures linear properties using ultrasonic wave propagation », *Construction and Building Materials*, vol. 36, p. 638-647, nov. 2012.
- [6] B. Birgisson, R. Roque, et G. C. Page, « Ultrasonic Pulse Wave Velocity Test for Monitoring Changes in Hot-Mix Asphalt Mixture Integrity from Exposure to Moisture », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1832, n° 1, p. 173-181, janv. 2003.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.