

UNIVERSITE DE LIMOGES

Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et Aéronautique

Faculté des Sciences et Techniques

Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes – Génie Civil et Durabilité

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Spécialité : Génie Civil

présentée par

Nicolas LARCHER

le 16 juin 2014

Contribution à la caractérisation des matériaux au comportement viscoélastique par méthode ultrasonore
Application aux matériaux bitumineux

Thèse dirigée par Christophe PETIT

Président :

M. Christian LA BORDERIE

Professeur des Universités

Examineurs :

M. Ferhat HAMMOUM

Directeur de Recherche

M. Christophe PETIT

Professeur des Universités

M. Salim CHAKI

Enseignant Chercheur

M. Mokhfi TAKARLI

Maître de Conférences

M. Nicolas ANGELLIER

Maître de Conférences

Rapporteurs :

M. Hervé DI BENEDETTO

Professeur

M. François OLARD

Directeur de Recherche EIFFAGE Travaux Publics

Rien n'est jamais perdu tant qu'il reste quelque chose à trouver

Pierre Dac

AVANT PROPOS

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Christophe Petit, Professeur de l'Université de Limoges pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes (GEMH) équipe Génie Civil et Durabilité (GCD) situé à Egletons et d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse. Sans lui, ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Je remercie également mes encadrants Mokhfi Takarli et Nicolas Angellier, Maîtres de Conférences pour m'avoir apporté leur aide et leurs conseils avisés ainsi que Hamidou Sebbah, Ingénieur d'Etude, pour m'avoir transmis ses connaissances en matière de traitement de signal.

Un merci particulier à Monsieur Frédéric Dubois, Professeur à l'Université de Limoges et Monsieur Octavian Pop, Maître de Conférences H.D.R pour m'avoir donné le goût de la recherche pendant mon stage de fin d'étude de Master.

Je remercie Monsieur Christian La Borderie, Professeur de l'Université de Pau, qui a présidé le jury de thèse.

Que Messieurs Hervé Di Benedetto, Professeur à l'ENTPE et François Olard, Directeur Recherche et Innovation EIFFAGE Travaux Publics soient également remerciés pour avoir accepté de rapporter mes travaux de thèse.

Mes pensées vont aussi à l'ensemble des membres du laboratoire qui ont rendu cette thèse plus agréable.

A titre personnel, je tiens à rendre hommage à mes parents Pierre et Josiane, sans qui je ne serais jamais arrivé où j'en suis aujourd'hui, à mes sœurs Myriam et Jocelyne ainsi qu'à mon beau-frère Jean-François qui m'ont montré la voie quelques années auparavant. Je ne saurais oublier Cécile sans qui ces trois années auraient été beaucoup plus pénibles. Pour finir, je dédie cette thèse à mon fils, Yanis, dont l'arrivée a pimenté la fin de ce travail.

Merci à tous

Résumé :

Contribution à la caractérisation des matériaux au comportement viscoélastique par méthode ultrasonore : Application aux matériaux bitumineux

Ce travail de thèse se place dans le cadre de la problématique de la caractérisation des matériaux thermo-viscoélastiques en laboratoire avec une application sur les matériaux bitumineux. Actuellement, la caractérisation mécanique de ces matériaux nécessite des essais coûteux autant en termes de temps, que de matériel et de matériau. L'objectif est de proposer une alternative à ces essais par le biais d'un essai de Contrôle Non Destructif (CND) basé sur la mesure des grandeurs caractéristiques de la propagation des ondes ultrasonores. Les matériaux de l'étude, un bitume et deux enrobés bitumineux ont été développés par l'entreprise Eiffage Travaux Publics. Les enrobés bitumineux font l'objet d'une étude visant l'optimisation de la structure granulaire des enrobés bitumineux dans le but d'augmenter leurs performances mécaniques.

Une attention particulière est portée aux méthodes de détermination des grandeurs caractéristiques de la propagation d'ondes et à la prise en compte de leur dépendance fréquentielle.

Les données expérimentales de référence, issues des essais standards de module complexe (G^* et E^*), sont représentées et interprétées sur la base de différentes représentations : courbes maitresses, plan de Cole – Cole et espace de Black. Ces représentations sont également extrapolées à l'aide d'un modèle rhéologique à spectre continu, le modèle 2S2P1D.

La caractérisation de ces matériaux par la méthode ultrasonore repose sur deux aspects : d'une part la détermination de la vitesse de phase et du facteur d'atténuation des ondes de compression et de cisaillement ; d'autre part la détermination des grandeurs mécaniques (G^* ,

E^* et ν^*) par le biais des équations de propagation en 2D dans un milieu élastique ou viscoélastique isotrope.

Les résultats obtenus montrent une bonne adéquation entre les données ultrasonores, les mesures mécaniques et les prédictions du modèle rhéologique. Les représentations complexes par séparation des parties réelles et imaginaire montrent l'apport essentiel de l'hypothèse viscoélastique dans l'exploitation des données ultrasonores et la nécessité de la prise en compte des différents mécanismes dissipatifs conduisant l'atténuation des ondes dans un matériau hétérogène viscoélastique.

Mots clés : ondes ultrasonores, vitesse de phase, facteur d'atténuation, viscoélasticité, bitume, enrobé bitumineux, module complexe

Abstract :

Towards a viscoelastic characterization by ultrasonic measurements:
Application to bituminous materials

This work deals with a laboratory test applied to the thermo viscoelastic materials in particular the bituminous materials. Today, the mechanical characterization of the bituminous materials is very expensive in time, material and equipment. The aim of this study is to propose an alternative to the mechanical test by a Non Destructive Test (NDT) based on ultrasonic wave measurements. The materials of this study, a binder and two asphalt concretes, have been developed by Eiffage Travaux Publics company. These asphalt concretes are otherwise to improve the mechanical properties by an optimization the granular skeleton of the bituminous materials.

This study focuses to the different methods of determination of the acoustic parameters like velocity and attenuation factor. Moreover, their frequency dependence is highlighted.

Experimental data, obtained with the standard mechanical modulus test, have been taking into account as the reference and plotted in term of master curves and complex representations as Cole – Cole and Black spaces. A rheological model (2S2P1D) which has a continuum spectrum, is fitted to the mechanical representation.

The ultrasonic characterization of the materials is based on two aspects : on one side the determination of phase velocity and attenuation factor of compression and shear waves, on the other side the theory of 2D wave propagation in elastic and viscoelastic medium which allows to determining mechanical properties (G^* , E^* , ν^*).

A good agreement is showed between the ultrasonic data, the mechanical characterization and the rheological prediction. The complex representations which are based on the expression of real and imaginary parts of the complex modulus and the phase angle, are the major contribution of the hypothesis of wave propagation in a viscoelastic medium for the utilization

of the ultrasonic data. However, all mechanisms causing wave attenuation must be clearly identified.

Keywords: ultrasonic waves, phase velocity, attenuation factor, viscoelasticity, binder, asphalt concrete, complex modulus

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
 <i>Chapitre I : Comportement des matériaux bitumineux et revue bibliographique sur l'usage des techniques basées sur la propagation d'ondes ultrasonores.....</i>	
I - Introduction.....	5
II - Comportement mécanique des matériaux bitumineux.....	6
II - 1 - Le bitume	8
II - 1 - 1 - Définition	8
II - 1 - 2 - Domaines de comportement.....	8
II - 1 - 3 - Principaux essais sur les liants bitumineux	9
II - 2 - Les enrobés bitumineux	10
II - 2 - 1 - Définition	10
II - 2 - 2 - Domaines de comportement.....	10
II - 2 - 3 - Essais sur les enrobés bitumineux.....	11
II - 2 - 4 - Classification des essais	11
II - 3 - Essais de module complexe	13
II - 3 - 1 - Principe.....	13
II - 3 - 2 - Différents essais de modules complexes.....	14
III - Contrôle Non Destructif des matériaux bitumineux par méthodes sismiques.....	17
III - 1 - Phénomènes de propagation d'ondes mécaniques	17
III - 2 - Grandeurs caractéristiques de la propagation d'ondes mécaniques	18

III - 3 -	Types d'essais sismiques.....	21
III - 4 -	Caractérisation des propriétés physiques du matériau	23
III - 5 -	Fatigue et endommagement	31
III - 6 -	Détermination du module complexe	37
IV -	Synthèse et conclusion.....	52

Chapitre II : Principe théorique et démarche expérimentale...55

I -	Introduction.....	55
II -	Théorie de la propagation des ondes	56
II - 1 -	Principe fondamental de la dynamique.....	58
II - 2 -	Propagation dans un milieu homogène élastique continu isotrope.....	58
II - 3 -	Propagation dans un milieu homogène viscoélastique continu isotrope	59
III -	Démarche expérimentale.....	63
III - 1 -	Choix de la méthode ultrasonore et principe de l'essai.....	63
III - 2 -	Choix des transducteurs	65
III - 3 -	Dispositif expérimental	66
III - 4 -	Prélèvement des échantillons	69
III - 5 -	Dimensions des éprouvettes	70
III - 6 -	Conditionnement des éprouvettes	73
IV -	Acquisition et traitement des signaux.....	75
IV - 1 -	Acquisition des signaux	75
IV - 2 -	Déphasage des signaux dû à la chaîne de mesures.....	75
IV - 3 -	Type d'excitation des transducteurs.....	76
IV - 4 -	Répétabilité des mesures	76
IV - 5 -	Détermination de la vitesse de propagation	77
IV - 6 -	Quantification du facteur d'atténuation.....	80

IV - 7 -	Etude du contenu spectral des signaux.....	82
V -	Conclusion.....	86

Chapitre III : Présentation, caractérisation et modélisation du comportement mécanique des matériaux.....87

I -	Introduction	87
II -	Matériaux de l'étude.....	88
III -	Essais de modules complexes	90
III - 1 -	Dynamic Shear Rheometer (DSR)	90
III - 2 -	Essai de traction / compression	91
IV -	Principe d'Equivalence Temps – Température	95
V -	Représentations complexes et modélisation rhéologique.....	97
V - 1 -	Représentations complexes	97
V - 2 -	Modélisation rhéologique	98
V - 2 - 1 -	Cellules élémentaires	98
V - 2 - 2 -	Modèle de Huet.....	100
V - 2 - 3 -	Modèle de Huet – Sayegh.....	101
V - 2 - 4 -	Modèle 2S2P1D	102
V - 2 - 5 -	Comparaison des modèles rhéologiques.....	105
V - 3 -	Prédiction du module de l'enrobé à partir du module du bitume.....	106
VI -	Détermination théorique des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes	108
VI - 1 -	Prédiction de la vitesse de propagation	108
VI - 2 -	Prédiction du facteur d'atténuation	110
VII -	Conclusion.....	112

<u>Chapitre IV</u> : Matériau homogène au comportement thermo viscoélastique : application de la méthode ultrasonore au bitume 35/50.....	115
I - Introduction.....	115
II - Présentation des données expérimentales.....	117
II - 1 - Formes d'ondes expérimentales et transformées de Fourier.....	117
II - 2 - Atténuation préférentielle des hautes fréquences.....	119
II - 3 - Déphasage des signaux	123
III - Détermination expérimentale des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes.....	124
III - 1 - Vitesse de propagation	124
III - 2 - Facteur d'atténuation.....	127
III - 3 - Représentation des résultats	128
III - 3 - 1 - Isothermes des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes.....	129
III - 3 - 2 - Isochrones des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes.....	132
IV - Détermination des caractéristiques mécaniques à partir des mesures ultrasonores ...	136
IV - 1 - Détermination de la plage fréquentielle d'analyse.....	136
IV - 2 - Coefficient de Poisson.....	137
IV - 3 - Détermination des modules complexes.....	141
IV - 4 - Représentation des résultats dans les plans complexes.....	144
V - Conclusion.....	149

<u>Chapitre V</u> : Géomatériau à matrice thermo viscoélastique : application de la méthode ultrasonore aux graves bitumes GB3 et GB5	151
I - Introduction.....	151
II - Présentation des données acoustiques expérimentales.....	153
II - 1 - Formes d'ondes expérimentales et transformées de Fourier.....	153
II - 2 - Atténuation préférentielle des hautes fréquences.....	155
II - 3 - Déphasage des signaux	159
III - Détermination expérimentale des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes.....	161
III - 1 - Vitesse de propagation	161
III - 2 - Facteur d'atténuation.....	163
III - 3 - Représentation des résultats	164
III - 3 - 1 - Isothermes des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes.....	164
III - 3 - 2 - Isochrones des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes.....	168
III - 4 - Prédiction des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes dans les graves bitume à partir de celles du bitume.....	170
IV - Détermination des caractéristiques mécaniques à partir des mesures ultrasonores ...	174
IV - 1 - Coefficient de Poisson.....	174
IV - 2 - Détermination des modules complexes.....	181
IV - 3 - Représentation des résultats dans les plans complexes.....	182
V - Conclusion.....	185
 Conclusion générale	 187

Références bibliographiques	191
Annexes	205
Nomenclature	221
Table des figures	225
Table des tableaux	237

Introduction générale

Les matériaux bitumineux composent la quasi-totalité du réseau routier français qui représente à lui seul environ un million de kilomètres. En cette période de crise économique, il se montre judicieux pour les maitres d'ouvrages de réduire les coûts autant en termes de constructions neuves que de réparations de structures existantes. Dans le cadre de constructions neuves, plusieurs points peuvent permettre de réduire ces coûts. D'une part, un travail sur l'élaboration du matériau notamment au niveau des granulats le composant, permet de réduire les coûts de fabrication tout en conservant les propriétés mécaniques requises pour le type de structure souhaitée. D'autre part, il se montre primordial d'avoir une parfaite connaissance du matériau autant au niveau des caractéristiques physiques que mécaniques. Dans le cadre de constructions existantes, un suivi efficace de l'endommagement de la structure avec une identification des mécanismes et du niveau de dégradation permet d'intervenir au bon moment afin de réduire les coûts de réparations.

De nombreux essais laboratoires existent afin d'effectuer la caractérisation des matériaux bitumineux en prenant en compte leur comportement thermo-viscoélastique comme l'essai de module complexe. Seulement, ces essais se montrent couteux autant en termes de temps, de matériau que de matériel. Par ailleurs, dans le cadre d'un suivi d'endommagement d'une structure existante, les essais nécessitent la plupart du temps un prélèvement d'une partie de celle-ci.

Pour remédier à cela, une nouvelle génération d'essai est en pleine expansion, ce sont les essais non destructifs. Parmi ces essais, ceux utilisant la propagation d'ondes mécaniques (active ou passive) ont déjà fait leurs preuves sur les matériaux du Génie Civil comme le béton ou l'acier. Seulement, ces matériaux ont un comportement mécanique élastique qui facilite le traitement du signal acoustique. Or dans le cadre des bétons bitumineux, le

comportement mécanique thermo-viscoélastique entraîne un déphasage et une atténuation de l'onde. De plus, les hétérogénéités présentes dans le matériau peuvent être à l'origine de la diffusion de l'onde et perturber le parcours du signal.

Les travaux de ce mémoire de thèse présentent un essai de propagation d'ondes ultrasonores réalisé en laboratoire permettant la caractérisation des matériaux bitumineux (bitume et enrobés bitumineux) en tenant compte de leur comportement thermo-viscoélastique. En effet, de nombreuses études ont déjà été réalisées sur ce type de matériaux mais ce sont trop souvent cantonnées à une approche élastique de la propagation d'onde ou par une introduction du comportement viscoélastique par le biais de modèles de prédiction. Dans cette étude, le comportement viscoélastique est introduit principalement par le facteur d'atténuation des ondes. Cependant, l'atténuation de l'onde est un phénomène complexe composé de différents mécanismes. Ces différents mécanismes sont mis en évidence par l'étude à la fois de matériaux bitumineux homogènes et hétérogènes à l'échelle des longueurs d'ondes mis en jeu pendant les essais. De plus, dans la littérature, les valeurs du coefficient de Poisson sont souvent considérées comme constantes en fonction de la température et de la fréquence. Ici, la dépendance fréquentielle du coefficient de Poisson est étudiée grâce à la propagation d'ondes de compression et de cisaillement.

Le premier chapitre est composé des bases théoriques et bibliographiques nécessaires à la mise en œuvre de l'étude. Le comportement mécanique des matériaux étudiés est présenté ainsi que les essais permettant leur caractérisation en laboratoire en particulier les essais de module complexe. Puis, le phénomène de propagation d'ondes mécaniques est présenté à travers ses grandeurs caractéristiques et plus particulièrement les deux paramètres de propagation des ondes nécessaires à l'étude : la vitesse de propagation et le facteur d'atténuation. Ce premier chapitre se termine par une revue bibliographique concernant l'usage de la propagation d'ondes mécaniques dans les matériaux bitumineux, en mettant en avant les potentialités de celle-ci dans le cadre de la caractérisation des matériaux viscoélastiques.

Le second chapitre commence par une étude théorique de la propagation d'ondes en deux dimensions dans un milieu continu isotrope. Une comparaison entre un comportement élastique et viscoélastique est faite et montre les avantages de l'approche viscoélastique. En effet, cette approche, à l'encontre de l'approche élastique, permet en plus de la détermination

du module du matériau celles des parties réelles et imaginaires ainsi que de l'angle de phase. Ensuite, la démarche expérimentale adoptée pour le développement de l'essai est présentée. Pour finir, les méthodes de détermination des paramètres de propagation sont présentées en mettant l'accent sur les domaines d'analyse des signaux (temporel ou fréquentiel).

Dans le troisième chapitre, les propriétés physiques des matériaux de l'étude sont présentées, notamment les différences granulométriques entre les deux enrobés bitumineux (GB3 et GB5). Ces matériaux ont également fait l'objet d'une caractérisation mécanique dont les résultats sont représentés sous formes d'isothermes et d'isochrones. La modélisation rhéologique permettant la prédiction du comportement mécanique des matériaux notamment à des fréquences non atteintes par la construction de la courbe maîtresse est abordée avec une comparaison de trois modèles (Huet, Huet-Sayegh, 2S2P1D) largement utilisés pour ce type de matériaux. Pour finir, une méthode de prédiction des paramètres de propagation des ondes est proposée en s'appuyant sur la théorie de propagation des ondes et la modélisation rhéologique.

Le bitume 35 / 50 est alors étudié dans le quatrième chapitre selon la démarche expérimentale présentée. D'abord, l'étude se tourne vers une analyse des données acoustiques, enregistrées à différentes températures et fréquences, permettant de montrer la thermo-sensibilité des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes. Une comparaison des méthodes de détermination des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes est réalisée et montre la dépendance fréquentielle de ceux-ci. Ces grandeurs font aussi l'objet de représentations identiques aux propriétés mécaniques déterminées par les essais de module complexe, c'est-à-dire en termes de courbes isothermes et isochrones. Ensuite, les caractéristiques mécaniques sont déterminées en comparant l'hypothèse élastique et viscoélastique. Le coefficient de Poisson est d'abord déterminé ainsi que ses parties réelles et imaginaires. Il en est de même pour le module complexe. Ces caractéristiques sont représentées respectivement sur les courbes maîtresses, le plan de Cole – Cole et l'espace de Black. Ces représentations permettent une estimation des paramètres nécessaires au calage des modèles rhéologiques notamment le module vitreux (G_0 et / ou E_0).

Le dernier chapitre présente, cette fois-ci, les résultats obtenus sur les enrobés bitumineux GB3 et GB5. De même que pour le bitume les données ultrasonores sont d'abord présentées ainsi qu'une comparaison des méthodes de détermination des grandeurs caractéristiques de

propagation. Les représentations en termes d'isothermes et d'isochrones de ces dernières sont aussi présentées. Une méthode de prédiction de la vitesse de propagation des ondes dans les enrobés à partir de celle dans le bitume est proposée en se basant sur des relations existantes entre le module d'un bitume et celui d'un enrobé composé de ce même bitume. Les caractéristiques mécaniques sont ensuite déterminées en tenant compte du fait que le facteur d'atténuation expérimental issu des essais sur les enrobés est l'addition de plusieurs mécanismes alors que les formules théoriques nécessitent uniquement la part visqueuse de l'atténuation. On observe alors que les caractéristiques mécaniques déterminées par l'essai ultrasonore se montrent en accord avec celles issues des données mécaniques et la modélisation rhéologique. La représentation sur le plan de Cole – Cole montre que les données ultrasonores permettent d'estimer cette fois-ci en plus du module vitreux le paramètre k servant également au calage des modèles rhéologiques.

Pour finir, une conclusion générale sur l'apport de cette étude sera faite et est accompagnée de perspectives visant à améliorer les résultats présentés.

Chapitre I :

Comportement des matériaux bitumineux et revue bibliographique sur l'usage des techniques basées sur la propagation d'ondes ultrasonores

I - Introduction

Dans ce chapitre, les matériaux bitumineux sont tout d'abord présentés à travers leur comportement mécanique en fonction des sollicitations auxquelles ils sont soumis. Les essais permettant de définir leurs principales caractéristiques notamment l'essai de module complexe sont aussi présentés. Ces essais permettent de mettre en évidence la dépendance à la température et à la fréquence du comportement mécaniques de ces matériaux.

Ensuite, le contrôle non destructif des matériaux par méthodes sismiques est abordé avec une présentation du phénomène de propagation d'onde et des grandeurs caractéristiques de celle-ci. Une attention particulière est portée au phénomène d'atténuation qui est un phénomène complexe dont les différents mécanismes qui le composent sont passés en revue. Pour finir, une revue bibliographique sur l'emploi des méthodes sismiques dans le cadre d'essais non destructifs pour l'étude des matériaux bitumineux est faite. Elle permet de mettre en évidence leur potentiel dans le domaine de la caractérisation physique ou mécanique du matériau.

II - Comportement mécanique des matériaux bitumineux

Une chaussée routière est une structure composée d'une succession de couches de matériaux granulaires reposant sur un sol support. On distingue deux types de matériaux dans ces couches de chaussées : les matériaux granulaires non liés et les matériaux granulaires liés. Pour les matériaux granulaires liés deux types de liants peuvent être utilisés : les liants hydrauliques et les liants hydrocarbonés. Ici, nous nous intéressons aux matériaux granulaires liés avec des liants hydrocarbonés.

Les structures routières sont soumises à différents types de sollicitations : les chargements mécaniques causés par le trafic et les sollicitations climatiques.

Le trafic crée un chargement répété de fréquences variables en fonction de la vitesse des véhicules sur la surface de la chaussée. Les amplitudes de chargement sont faibles et les déformations sont de l'ordre de 10^{-3} . La Figure I. 1 montre les sollicitations induites par le trafic d'une chaussée multicouche.

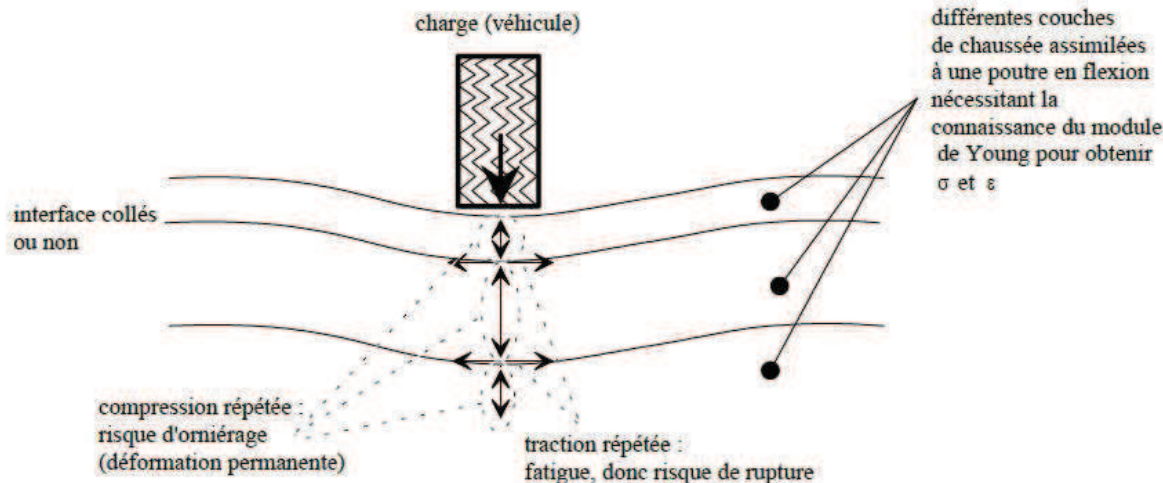


Figure I. 1 : Sollicitations induites par le trafic [Di Benedetto, 2005]

Les sollicitations cycliques du trafic impliquent une traction répétée pouvant entraîner des micro-dégradations et conduire à la ruine de la structure par fatigue par le biais de fissures au travers de la chaussée. De plus, les parties supérieures des couches sont, quant à elles,

soumises à des efforts de compression répétée entraînant un orniérage à la surface de la chaussée.

Les chaussées subissent aussi des chargements consécutifs aux variations de la température. Les variations thermiques entraînent des changements de rigidité du mélange. En effet, à basse température, les matériaux bitumineux sont rigides et fragiles tandis qu'à haute température leur rigidité diminue et leur comportement devient ductile. La Figure I. 2 montre que les variations de température peuvent entraîner des contraintes et des déformations dans les matériaux dues aux contractions – dilations thermiques qui peuvent conduire à des fissures.

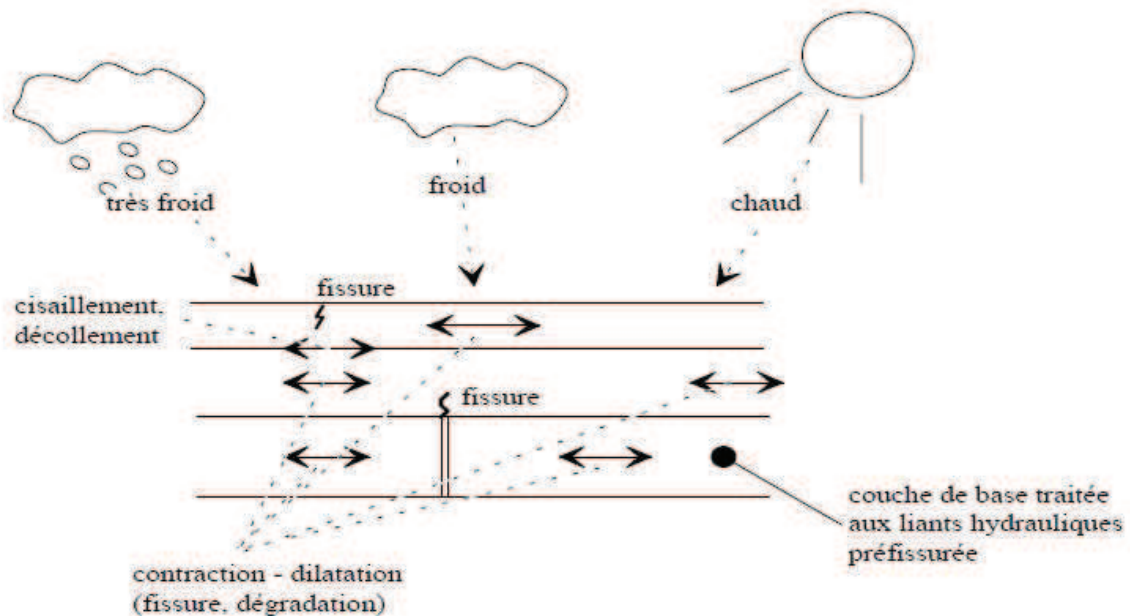


Figure I. 2 : Sollicitations induites par la température [Di Benedetto, 2005]

Le comportement mécanique des matériaux bitumineux est dépendant de la fréquence de sollicitation et de la température, on dit qu'il est thermo-viscoélastique. C'est pour cela que sa caractérisation passe notamment par un essai de module complexe qui prend en compte ces deux paramètres. De plus, des études [Olard, 2003] [Lytton, 1993] ont montré qu'il est possible de prédire le comportement mécanique d'enrobés bitumineux à partir du

comportement mécanique du bitume le constituant. Dans la suite, le comportement mécanique des bitumes est présenté puis celui des enrobés bitumineux également.

II - 1 - Le bitume

II - 1 - 1 - Définition

Le bitume est un mélange de carbone et d'hydrogène c'est pour cela qu'il est appelé hydrocarbure. Connue depuis l'antiquité sous sa forme naturelle, aujourd'hui il est presque exclusivement produit par distillation des pétroles bruts c'est-à-dire provenant directement d'un puits de pétrole. De part ses propriétés d'adhérence, de plasticité, d'élasticité, d'insolubilité dans l'eau, de résistance à de nombreux agents chimiques, d'étanchéité, de durabilité, il est devenu un matériau phare dans la construction routière utilisé notamment comme liant dans l'élaboration des enrobés bitumineux. Sa viscosité varie en fonction de la température : solide à température ambiante, il devient pompable et donc transportable à une température supérieure à 120°C. Différents bitumes peuvent être utilisés comme liants [Delorme, 2007] dans le cadre des constructions routières. On peut citer par exemple les bitumes purs, modifiés, pigmentables, de synthèse, d'origine agrochimique ou encore antikérozène.

II - 1 - 2 - Domaines de comportement

Les liants bitumineux peuvent exhiber différents types de comportement en fonction de l'amplitude de déformation et de la température auxquelles ils sont soumis [Olard, 2005] (Figure I. 3). Pour une vitesse de chargement donnée, les différents domaines de comportement sont :

- les domaines fragiles et ductiles lorsque l'on peut mesurer la résistance à la traction σ_p ;
- la rupture fragile caractérisée par sa ténacité K_c ;
- le domaine élastique linéaire caractérisé par les modules élastiques E et G ;
- le domaine viscoélastique linéaire caractérisé par les modules complexes E^* et G^* ;
- le domaine purement visqueux (Newtonien) caractérisé par la viscosité η ;
- le domaine de comportement fortement non linéaire pour des déformations de quelques pourcents.

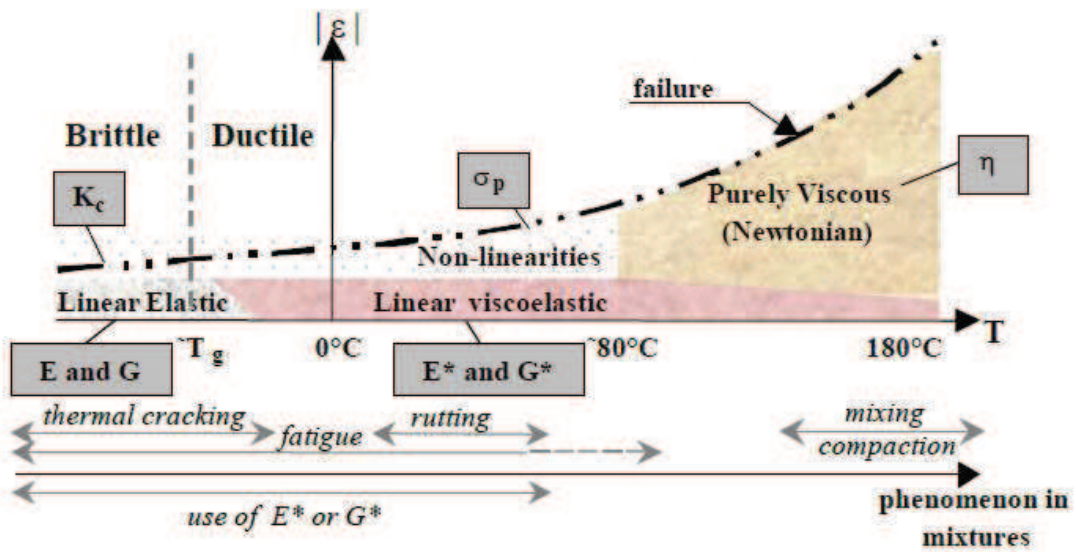


Figure I. 3 : Domaine de comportement du bitume [Olard, 2005]

On constate sur la Figure I. 3 que pour des températures comprises entre la température de transition vitreuse T_g du bitume (généralement comprise entre -50°C et -10°C [Planche, 1997]) et environ 80°C , le comportement du bitume est viscoélastique linéaire.

II - 1 - 3 - Principaux essais sur les liants bitumineux

Différents essais ont été développés dans le but de caractériser les différentes propriétés physiques ou mécaniques des bitumes :

- la consistance (essai de pénétrabilité), cet essai permet de déterminer la classe du bitume (exemple bitume 35/50 ou 50/70) ;
- la thermo-sensibilité avec les essais de pénétration « bille anneau » et de fragilité « FRAASS » ;
- le module du matériau.

II - 2 - Les enrobés bitumineux

II - 2 - 1 - Définition

Un enrobé bitumineux est le mélange de granulats et d'un liant hydrocarboné. Les granulats utilisés couramment sont des fines (passant inférieur à 63 μm), des sables et des gravillons qui constituent ce qu'on appelle le squelette granulaire. Le matériau ainsi constitué est caractérisé par sa courbe granulométrique [Delorme, 2007]. La cohésion du squelette granulaire est assurée par le bitume. Cependant, le pourcentage de bitume contenu dans l'enrobé bitumineux joue également un rôle très important. Dans un premier temps, couplé aux fines, il lubrifie le squelette granulaire et permet le compactage du matériau. La teneur en bitume dans un enrobé peut atteindre une valeur optimale. En dessous de cette valeur, une augmentation de la teneur en bitume entraînera une augmentation du module de l'enrobé. Au-delà de la teneur optimale, une augmentation de la teneur en bitume ne servirait qu'à combler les vides contenu dans l'enrobé et son module aurait tendance à diminuer.

II - 2 - 2 - Domaines de comportement

Lors d'essais de caractérisation mécanique des matériaux bitumineux, on peut distinguer différents domaines de comportement. En particulier, trois zones sont mises en évidence par Di Benedetto [Di Benedetto, 2001] en fonction du nombre de cycles et de l'amplitude de déformation (Figure I. 4) :

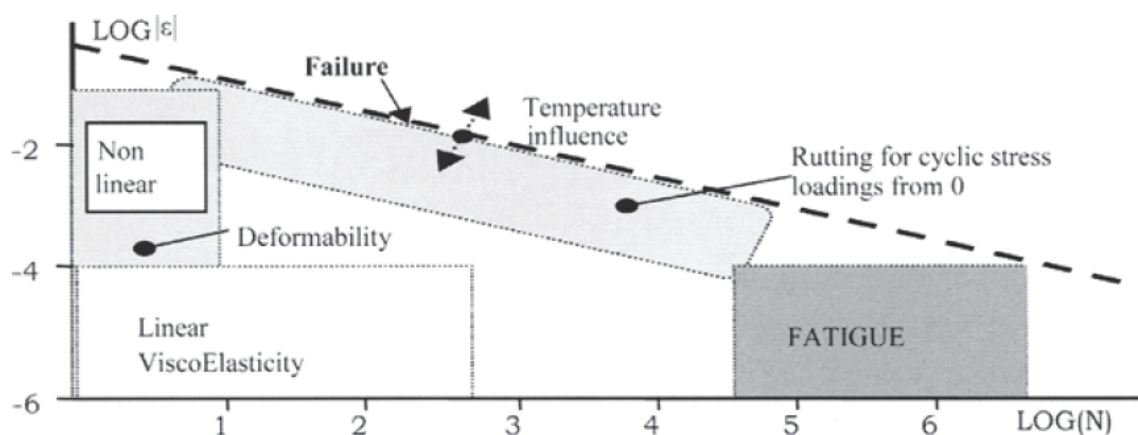


Figure I. 4: Domaines de comportement des enrobés bitumineux [Di Benedetto, 2001]

- une zone de comportement non linéaire pour un faible nombre de cycles de chargement ainsi que des déformations de quelques pour cents ;
- une zone de viscoélasticité linéaire (en première approximation) correspondant à des chargements de quelques centaines de cycles et des déformations « faibles » d'environ 10^{-4} ;
- une zone de fatigue où un endommagement du matériau apparaît pour des chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations « faibles ».

Les frontières entre les différentes zones de comportement peuvent sensiblement varier en fonction du matériau, de la température et de la direction de la sollicitation (compression ou cisaillement).

II - 2 - 3 - Essais sur les enrobés bitumineux

De nombreux essais permettant de mettre en évidence de nombreuses propriétés physiques ou mécaniques ont été développés sur les enrobés bitumineux. Les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux les plus étudiées en technique routière sont [Lefevre, 2001]:

- la rigidité ou le module du matériau (comportement viscoélastique linéaire) ;
- le comportement à la fatigue ;
- le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes ;
- la fissuration et la propagation des fissures.

Ces phénomènes sont liés à la thermo-sensibilité du matériau qui entraîne la création d'un couple thermo mécanique. Une autre cause de ces phénomènes peut être due aux attaques physico-chimiques.

II - 2 - 4 - Classification des essais

Les essais utilisés pour la caractérisation des matériaux bitumineux ont fait l'objet de différentes classifications en fonction du type d'interprétation considéré ou de l'état de

contrainte et de déformation. Suivant le type d'interprétation considéré, Bonnot [Bonnot, 1984] a défini trois catégories :

- les *essais empiriques*, dans lesquels le mode de sollicitation est très différent de celui existant dans la chaussée. Ils ne permettent donc pas de déterminer une propriété intrinsèque au matériau.
- les *essais de simulation*, qui correspondent à une première voie qui peut être suivie pour améliorer la représentativité des essais. Dans le cadre de ces essais, on utilise des sollicitations les plus proches possibles, bien qu'à échelle réduite, de celles existantes dans la chaussée, pour une propriété d'usage donnée. Malheureusement, les essais appartenant à cette catégorie restent empiriques. Néanmoins, cette catégorie d'essais est préférable à la précédente.
- les *essais de détermination*, qui correspondent à une voie toute différente pour assurer la représentativité des essais. Cette catégorie consiste à choisir des essais tels que l'on est capable de passer, par une méthode théorique, de leurs résultats à la propriété d'usage désirée. Pour cela, il faut avoir recours à une modélisation de la structure de l'ouvrage et à l'utilisation des lois de comportement de l'enrobé. Cette catégorie permet d'obtenir l'état de contrainte et de déformation du matériau considéré en suivant directement le schéma de la mécanique des milieux continus.

Une classification différente des essais a été proposée par Di Benedetto [Di Benedetto, 2004] en fonction de l'état de contrainte et de déformation. Il propose deux catégories distinctes :

- les *essais homogènes*, où l'état de contrainte et de déformation est le même en chaque point de l'éprouvette (Figure I. 5 (a)). Connaissant les contraintes et les déformations, on a accès aux lois de comportement sans hypothèses complémentaires.
- les *essais non homogènes*, correspondent à des essais de structure (Figure I. 5 (b)). Ils sont interprétés de manière empirique ou déterminent une caractéristique de l'ouvrage grâce à l'utilisation de lois de similitude en considérant une propriété d'usage donnée. Ils peuvent être utilisés dans le cadre d'un comportement du matériau simple de type viscoélasticité linéaire isotrope.

Il semble que les essais homogènes soient les plus appropriés pour décrire un comportement viscoélastique linéaire : en effet, les paramètres du comportement ainsi que les limites du domaine linéaire sont plus facilement déterminables. Cependant, il est important de noter que

dans le domaine viscoélastique linéaire, les résultats obtenus avec les essais non homogènes donnent des résultats tout à fait acceptables.

On peut constater que les essais non homogènes peuvent être interprétés, soit de manière empirique ou en utilisant une loi de similitude en considérant une propriété d'usage donnée, ce qui les rapproche des essais de simulation cités par Bonnot. Les essais homogènes utilisent des lois de comportement tout comme les essais de détermination.

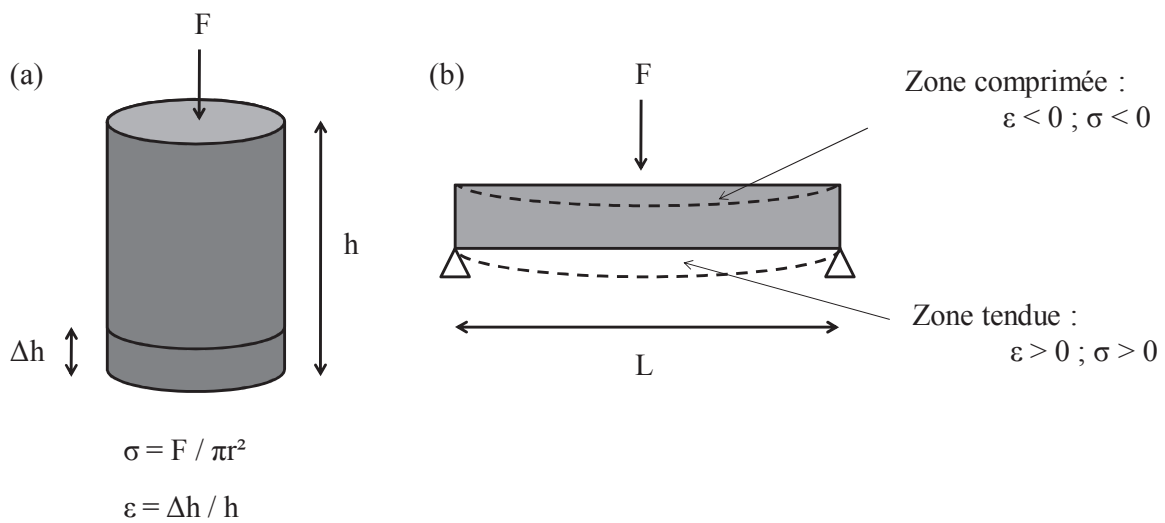


Figure I. 5 : Essais homogènes (a) et non homogènes (b)

II - 3 - Essais de module complexe

II - 3 - 1 - Principe

Le module complexe est la relation entre la contrainte et la déformation. Pour un matériau viscoélastique linéaire soumis à un chargement sinusoïdal en fonction du temps t , la contrainte appliquée $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$ entraîne une déformation $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$ où φ représente le déphasage (ou angle de phase) entre la contrainte et la déformation [NF EN 12697]. Le module complexe n'est pas une fonction du temps mais il dépend de la pulsation $\omega = 2\pi f$.

$$\sigma(t) = \text{Im}[\sigma^*(t)] \quad \text{avec} \quad \sigma^*(t) = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (\text{Eq I. 1})$$

$$\varepsilon(t) = \text{Im}[\varepsilon^*(t)] \quad \text{avec} \quad \varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (\text{Eq I. 2})$$

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 e^{-i\varphi}} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (\text{Eq I. 3})$$

Dans ces équations, on peut noter que i est le nombre imaginaire, $|E^*|$ la norme du module complexe. Il est aussi possible d'écrire le module complexe sous la forme suivante (Eq I. 4) :

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (\text{Eq I. 4})$$

Avec E_1 la partie réelle du module complexe que l'on peut également appeler le module instantané et E_2 la partie imaginaire du module complexe ou module de perte.

En assumant un comportement viscoélastique linéaire et isotrope, le module complexe de cisaillement G^* peut être exprimé en fonction du module complexe d'Young E^* et du coefficient de Poisson complexe ν^* (Eq I. 5).

$$G^* = \frac{E^*}{2(1+\nu^*)} \quad (\text{Eq I. 5})$$

Dans cette équation ν^* est un nombre complexe mais des mesures directes de ν^* à partir de mesures de déformation volumique sur des essais de module complexe en traction compression avec [Charif, 1991] ou sans pression de confinement [Doubbaneh, 1995] tendent à montrer que sa partie imaginaire est très petite. On peut donc le considérer comme réel.

II - 3 - 2 - Différents essais de modules complexes

Les essais de module complexe permettent d'étudier l'influence de la température et de la fréquence sur le comportement des matériaux bitumineux. En effet, le chargement est asservi soit en force soit en déplacement et les fréquences peuvent varier de 0,01 Hz à 50 Hz.

L'amplitude de chargement doit se faire dans le domaine des petites déformations de l'ordre de $50 \mu\text{m/m}$. Afin de vérifier que le matériau n'a pas été endommagé pendant l'essai une mesure à la fréquence de départ est nécessaire. De plus, les températures de stabilisation peuvent aller de -30°C à 70°C en évitant un écart supérieur à 10°C entre chaque température de test.

Dans le but d'étudier les *propriétés rhéologiques des bitumes* (module complexe de cisaillement, l'angle de phase...), l'essai Dynamic Shear Rheometer (DSR) est utilisé [McGennis, 1994]. Il consiste à imposer un cisaillement sur un anneau de bitume en appliquant une contrainte ou une déformation suivant le cycle présenté sur la Figure I. 6.

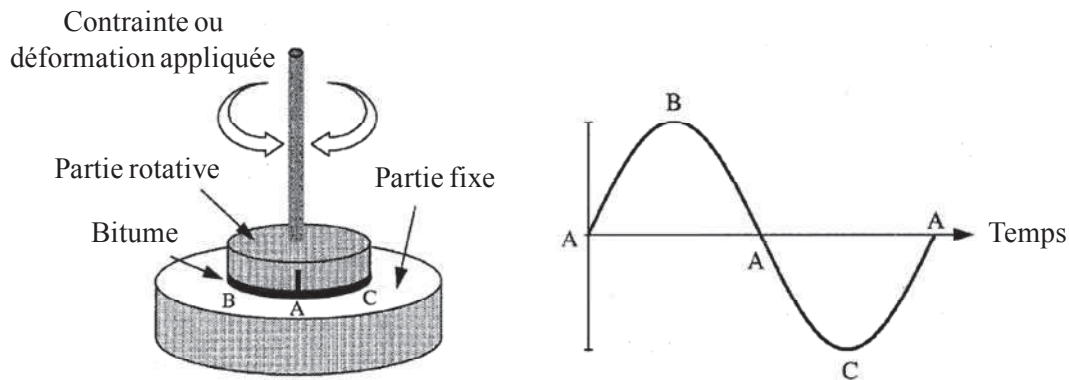


Figure I. 6 : Principe de l'essai Dynamic Shear Rheometer (DSR)

En première approximation, si on considère la relation $E^*=3G^*$ (isotropie et incompressibilité), il est possible de tracer la courbe maitresse du module d'Young complexe E^* du bitume uniquement avec les résultats du module complexe de cisaillement G^* .

En ce qui concerne les essais de module complexe pour les *enrobés bitumineux*, notons que différents types de charges peuvent être appliquées : cycliques mais également d'autres chargements contrôlés. Lorsque la charge appliquée est sinusoïdale, on peut effectuer différents essais [Norme NF EN 12697] :

- les essais de traction uniaxiale : il peut s'agir d'essais de traction / compression (Figure I. 5 (a)) ou de traction directe sur des éprouvettes cylindriques (ou prismatiques pour l'essai de traction directe) ;
- les essais de flexion deux (Figure I. 5 (b)), trois ou quatre points sur des éprouvettes prismatiques (ou trapézoïdale pour la flexion deux points) ;
- les essais de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques.

Notons que pour un enrobé bitumineux, la spécification française porte sur le module à 15°C et une fréquence de 10 Hz.

III - Contrôle Non Destructif des matériaux bitumineux par méthodes sismiques

Actuellement, les essais de Contrôle Non Destructif (CND), notamment les essais par méthodes sismiques sont en pleine expansion. Le principe de ces essais repose sur la propagation d'ondes mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel tels que les solides, gaz ou liquides et présentant une certaine élasticité.

Les méthodes sismiques ont déjà fait leurs preuves sur de nombreux matériaux du Génie Civil comme le bois [Landis, 2000] [de Oliviera, 2005] [de Oliviera, 2006], le béton [Sanish, 2012] ou les métaux [Ramuhalli, 2009] [Grove, 2010]. Ils ont permis une caractérisation physique et mécanique de ces matériaux mais également un suivi de l'endommagement ce qui permet une intervention avant la ruine de la structure. En effet, les variations des grandeurs caractéristiques (vitesse ou facteur d'atténuation) de propagation des ondes dépendent des propriétés mécaniques du milieu de propagation. Ainsi, l'étude de ces variations permet de traduire des changements dans la structure [Jiang, 2008].

III - 1 - Phénomènes de propagation d'ondes mécaniques

La propagation des ondes est un phénomène physique qui traduit la progression d'une onde ainsi que son évolution dans un matériau. Différents types d'ondes peuvent se propager dans un matériau (Figure I. 7) :

- Les ondes longitudinales ou encore ondes P (Primaires) sont des ondes de compression. Le mouvement du matériau engendré par le passage de l'onde se fait parallèlement à la direction de propagation de celle-ci. Ce sont les ondes qui ont la vitesse de propagation la plus élevée ;
- Les ondes transversales ou encore ondes S (Secondaires) sont des ondes de cisaillement. Le mouvement du matériau engendré par le passage de l'onde est perpendiculaire à la direction de propagation de celle-ci. Leur vitesse de propagation est généralement de l'ordre de 50% à 75% de celle des ondes de compression ;
- Les ondes de surface ou ondes R sont une combinaison des deux types d'ondes vues précédemment. Les plus connues sont les ondes de Rayleigh d'où le nom d'onde R

mais d'autres modes de propagation sont possibles comme les ondes rampantes de Love, les ondes de Bleustein – Gulyaev ou encore les ondes de Lamb dans les tôles.

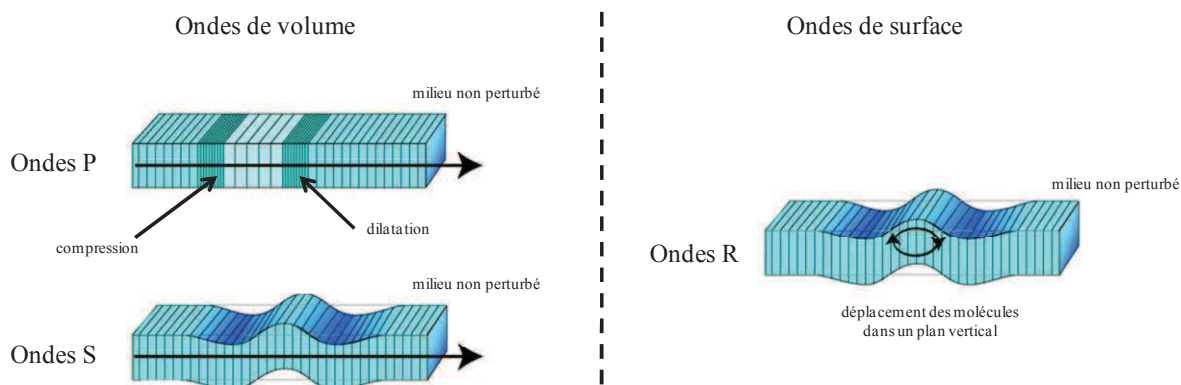


Figure I. 7 : Les différents types d'ondes

Les ondes mécaniques peuvent se déplacer dans toutes les directions de l'espace. Si la perturbation est créée d'un point source alors le front de l'onde est sphérique et on parle d'onde sphérique. Par contre, si la source est plane alors le front d'onde est plan et dans ce cas on parle d'onde plane.

III - 2 - Grandeurs caractéristiques de la propagation d'ondes mécaniques

La propagation d'ondes mécaniques dans un milieu est caractérisée par un certain nombre de grandeurs.

Différentes vitesses de propagation peuvent être introduites en fonction du type d'analyse effectué. Pour une analyse dans le domaine temporel, une vitesse de groupe notée V_g est définie et correspond au déplacement du paquet d'ondes. Dans le domaine fréquentiel, on parle de vitesse de phase notée V_ϕ , dépendante de la fréquence. Lorsque ces deux vitesses sont différentes alors on est dans un milieu dispersif. Dans le cas inverse, le milieu est non dispersif.

Le facteur d'atténuation de l'onde α correspond à la décroissance de l'amplitude d'une onde en fonction de sa distance de parcours. Elle s'exprime selon une loi exponentielle [Jiang, 2008] [Behroozi, 2010] suivant l'équation I. 6:

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \quad (\text{Eq I. 6})$$

Dans cette expression, le coefficient d'atténuation est noté α et s'exprime en Np/m. A_0 correspond à l'amplitude initiale de l'onde et $A(x)$ à l'amplitude à une distance x .

L'atténuation de l'onde résulte de la combinaison de plusieurs mécanismes :

- L'absorption : elle correspond à la conversion de l'énergie mécanique en chaleur autrement dit c'est une dissipation thermique [Jiang, 2008]. Dans les matériaux bitumineux, elle est principalement causée par la présence de bitume et représente donc les effets de la viscosité : on peut parler d'atténuation visqueuse. Dans le cas d'inclusions ayant également un comportement viscoélastique, elles peuvent aussi contribuer à ce phénomène. Dans les milieux dispersifs comme les matériaux bitumineux, l'absorption peut être attribuée à trois phénomènes [Bennamane, 2010]:
 - la conduction thermique causée par la succession de surpressions et de détonations lors du passage de l'onde dans le matériau. Elle conduit à la création de zones plus chaudes ou plus froides entraînant ainsi un flux de chaleur entre deux types de régions ;
 - le frottement visqueux, qui se produit surtout dans les milieux hétérogènes et qui est dû aux forces de friction qui s'opposent au mouvement des particules dans le milieu ;
 - le phénomène de relaxation qui relève de la présence de mécanismes de transfert d'énergie durant un temps fini. En traversant le matériau, l'onde lui transmet de l'énergie et celui-ci s'écarte alors de son équilibre énergétique. Si la durée du retour à l'équilibre d'un élément de volume est différente du temps de transit de l'onde dans cet élément alors il s'ensuit une déperdition d'énergie et un certain temps de relaxation pour le retour à l'équilibre.

- La diffusion : elle est liée au matériau et correspond à l'interaction des ondes avec les hétérogénéités. Le parcours initialement « prévu » pour l'onde est alors modifié. Ce mécanisme est variable en fonction de la taille, de la forme et de la répartition des hétérogénéités. Par ailleurs, dans les milieux anisotropes elle est également fonction de la direction de propagation.

Les équations I. 7 montrent qu'en fonction de la longueur d'onde λ , trois domaines de diffusion peuvent être définis [Biltugay, 1989] [Chekroun, 2008]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Rayleigh lorsque } \lambda \gg D, \alpha(f) = a_1 f + a_2 D^3 f^4 \\ \text{Stochastique lorsque } \lambda \approx D, \alpha(f) = b_1 f + b_2 D f^2 \\ \text{Diffusion lorsque } \lambda \ll D, \alpha(f) = c_1 f + \frac{c_2}{D} \end{array} \right. \quad (\text{Eq I. 7})$$

Dans ces expressions, le premier terme concerne l'atténuation causée par l'absorption du milieu, on voit d'ailleurs que celle-ci augmente de manière linéaire avec la fréquence tandis que la part de diffusion varie différemment en fonction du domaine auquel elle appartient. De plus, dans le domaine de Rayleigh, les particules hautes fréquences sont plus fortement rétro diffusées que les particules basses fréquences [Saniie, 1989]. Ceci s'explique par le fait que plus la fréquence est élevée plus les longueurs d'ondes sont petites et donc proches de la taille des hétérogénéités.

- L'étalement géométrique de l'onde qui dépend du diamètre du transducteur et de la fréquence d'excitation de celui-ci. Il est possible de s'affranchir de ce phénomène en travaillant à une distance suffisante de la source de l'onde afin que celle-ci devienne plane [Bourbié, 1986]. La décroissance de l'amplitude de l'onde due à l'anélasticité du matériau est alors exponentielle (Eq I. 6).

On peut donc écrire l'atténuation totale d'une onde comme la somme de ces différents phénomènes comme le montre l'équation I. 8 [Tie, 2010] [Bodian, 2011].

$$\alpha_{total} = \alpha_{visqueux} + \alpha_{diffusion} + \alpha_{étalement\ géométrique} \quad (\text{Eq I. 8})$$

Dans cette équation, on peut constater qu'une partie de l'atténuation est intrinsèque au matériau ($\alpha_{visqueux}$ et $\alpha_{diffusion}$) alors qu'une autre est extrinsèque à celui-ci ($\alpha_{étalement\ géométrique}$). Lors de mesures expérimentales, l'objectif est de diminuer voire d'éliminer l'atténuation extrinsèque au matériau afin de conserver uniquement celles qui lui sont propres.

III - 3 - Types d'essais sismiques

Les essais sismiques reposent essentiellement sur la réception et l'analyse d'une onde sismique. Parmi ces méthodes deux grandes familles se distinguent :

- Les méthodes passives qui « écoutent » ce qu'il se passe dans une structure sous sollicitations et qui permettent de statuer sur un éventuel endommagement de celle-ci. Un exemple de méthode passive bien connue est l'émission acoustique (AE : Acoustic Emission) [Grosse, 2008] ;
- Les méthodes actives qui reposent sur la génération volontaire d'une onde par un marteau impacteur ou un transducteur. Le signal reçu est alors analysé et permet de définir nombre de caractéristiques physiques ou mécaniques du matériau.

Dans cette étude, nous nous focalisons sur les méthodes actives qui peuvent également être séparées en trois catégories : soniques, dynamiques et ultrasoniques.

Les *méthodes soniques* comme l'impact écho (IE) [Dos Reis, 1999], ont été développées dans le but de pouvoir mesurer l'épaisseur d'une couche de matériau ou de mettre en évidence une zone de défauts. Ces méthodes se réalisent sur la même face du matériau. L'onde est provoquée par un marteau impacteur et est enregistrée par un microphone ou un transducteur. Les signaux enregistrés sont alors analysés dans le domaine fréquentiel notamment grâce à une transformée de Fourier, et la présence ou non de défauts peut être déterminée. Par ailleurs, en connaissant la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau il est possible de déterminer la profondeur du défaut.

Les *méthodes dynamiques* reposent sur l'étude de la mise en vibration volontaire d'un échantillon connaissant ses modes propres [Ryden, 2009] [Gudmarsson, 2012] [Mounier, 2012]. On peut citer par exemple la méthode RAS (Resonant Acoustic Spectroscopy). Ces méthodes permettent la détermination du module dynamique du matériau.

Les *méthodes ultrasonores* basées sur la génération et la réception d'une onde ultrasonore produite par un transducteur piézoélectrique dont la fréquence d'excitation est supérieure à 20 kHz [Di Bendedetto, 2009] [Norambuena – Contreras, 2010] [Mounier, 2012]. Ces méthodes permettent de mettre en évidence les propriétés physiques et mécaniques du matériau grâce notamment à l'étude des paramètres de propagation de l'onde (vitesse et facteur atténuation) associés aux lois de propagation des ondes. En fonction de la propriété recherchée, plusieurs protocoles expérimentaux sont réalisables :

- *Calcul de la vitesse de propagation de l'onde* (UPV : Ultrasonic Pulse Velocity) : cette méthode consiste à déterminer le temps de parcours de l'onde et, connaissant son chemin de propagation, la vitesse de propagation peut être calculée. Grâce à la vitesse de propagation de l'onde, il est possible de remonter aux propriétés du matériau. Cette méthode est principalement applicable pour une propagation d'onde par transmission directe car le chemin de propagation est connu.

Cette méthode a pour principales applications le monitoring des structures, la détermination des modules (d'Young ou de cisaillement en fonction du type d'onde enregistré). Par contre, il est nécessaire d'avoir des références mécaniques pour comparer les résultats obtenus. De plus, il est difficile d'interpréter des résultats obtenus lorsque les transducteurs sont sur la même face du matériau (modes semi-direct ou indirect car le chemin de propagation réel de l'onde est inconnu).

- *Calcul du temps de parcours entre l'impulsion et l'écho du signal* (UPE : Ultrasonic Pulse Echo) : le temps de parcours de l'onde est mesuré entre deux matériaux de densités différentes. En connaissant la vitesse de propagation dans le matériau avant réflexion de l'onde, il est alors possible de situer le défaut dans le matériau. Comme montré sur la Figure I. 8, cette méthode est réalisable avec un seul ou plusieurs transducteurs.



Figure I. 8 : Exemple d'application du calcul du temps de parcours de l'onde entre l'impulsion et la réception [Garbacz, 2003]

Très proche de l'impact écho, cette méthode a été développée dans le but de détecter des délaminations, des fissures ou des discontinuités dans le matériau ou de mesurer une épaisseur. L'inconvénient principal de cette méthode dans le cadre de l'application à un enrobé bitumineux est que sa forte hétérogénéité induit de nombreux échos qui deviennent alors difficiles à interpréter.

Les méthodes sismiques ont donc pour principal objectif la caractérisation physique ou mécanique du matériau. L'utilisation de ces essais peut se faire soit in situ, dans le cadre d'un suivi ou d'une mise en évidence d'un endommagement ou alors en laboratoire dans le but d'une caractérisation de matériau avant mise en application.

III - 4 - Caractérisation des propriétés physiques du matériau

De nombreux travaux ont porté sur l'étude de la variation des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes en fonction des variations des propriétés physiques du matériau comme le volume des vides, l'humidité, la teneur en bitume, les défauts de mise en œuvre, le compactage du matériau, l'anisotropie ou encore l'impédance acoustique.

L'influence du volume des vides sur la vitesse de propagation des ondes a été étudiée par plusieurs auteurs. Jurado a déterminé le module d'Young élastique d'un enrobé grâce à la propagation d'ondes de compression dans le matériau et a montré que les modules ultrasonores calculés diminuent linéairement avec l'augmentation des volumes des vides (Figure I. 9) [Jurado, 2008].

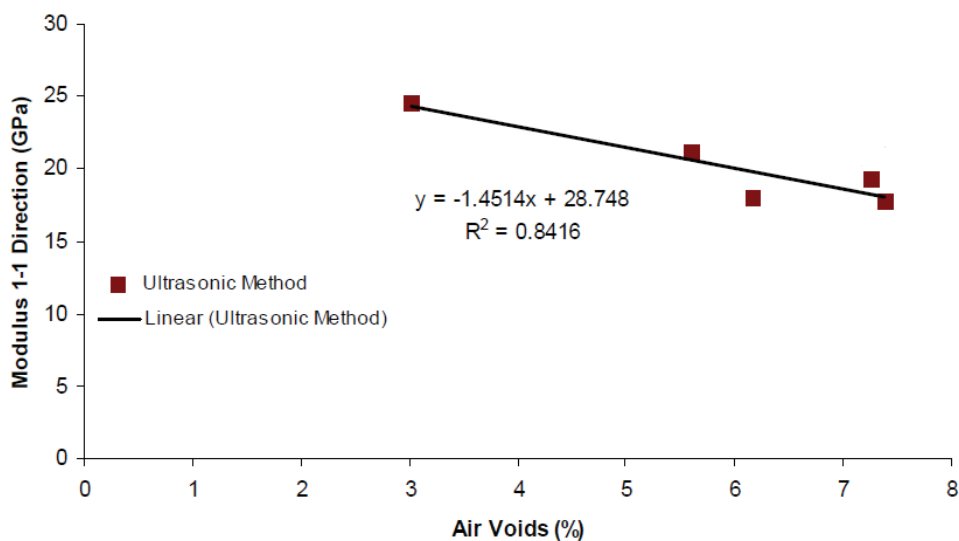


Figure I. 9 : Evolution du module d'Young élastique calculé avec des ondes de compression en fonction du volume des vides [Jurado, 2008]

Une tendance identique a été montrée par d'autres auteurs avec des ondes de compression [Rojas, 1999] [Birgisson, 2006] ainsi qu'avec des ondes de surface [Celaya, 2006] (Figure I. 10).

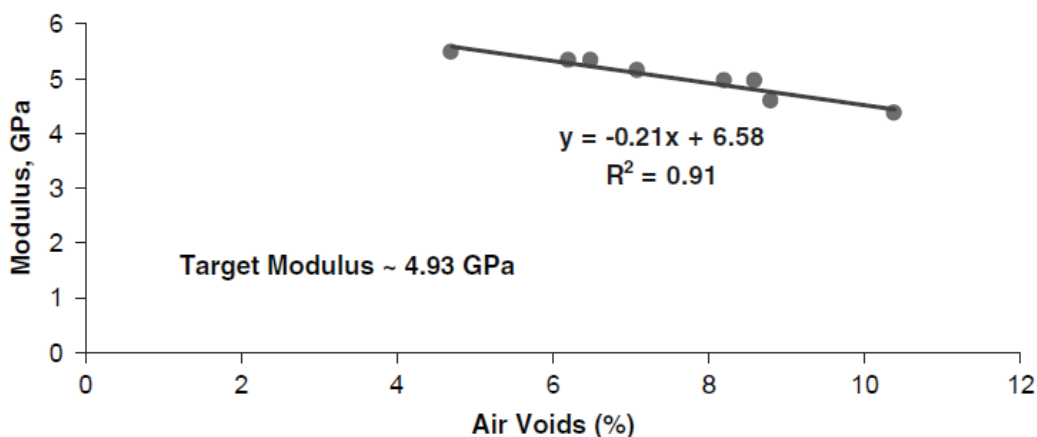


Figure I. 10 : Evolution du module calculé avec des ondes de surface en fonction du volume des vides [Celaya, 2006]

Le module d'Young élastique des matériaux étant proportionnel à la vitesse de propagation de l'onde, ces tendances signifient que les vitesses de propagation diminuent en fonction de l'augmentation du volume des vides. Par ailleurs, Dunning et al. [Dunning, 2004], ont étudié la réponse ultrasonore obtenue par un essai sans contact dans le domaine fréquentiel et ont montré que la réponse fréquentielle était corrélée à la variation de la densité pour un type de matériau donné (même teneur en bitume et même granulométrie).

L'*humidité dans le matériau* a également fait l'objet d'études diverses. Birgisson et al. [Birgisson, 2006] ont montré par le calcul du module d'Young, suivant une hypothèse élastique en utilisant la vitesse de propagation des ondes de compression, que les changements de teneur en humidité du matériau peuvent être mis en évidence. Barnes et al., [Barnes, 2010] ont, quant à eux, utilisé la propagation d'onde de surface et la méthode d'analyse Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). Ils ont testé différents enrobés ayant des volumes de vides différents puis après des cycles de conditionnement en humidité les modules ont été calculés. Les modules calculés par essais ultrasonores diminuent en fonction de l'augmentation de l'humidité (Figure I. 11 (a)).

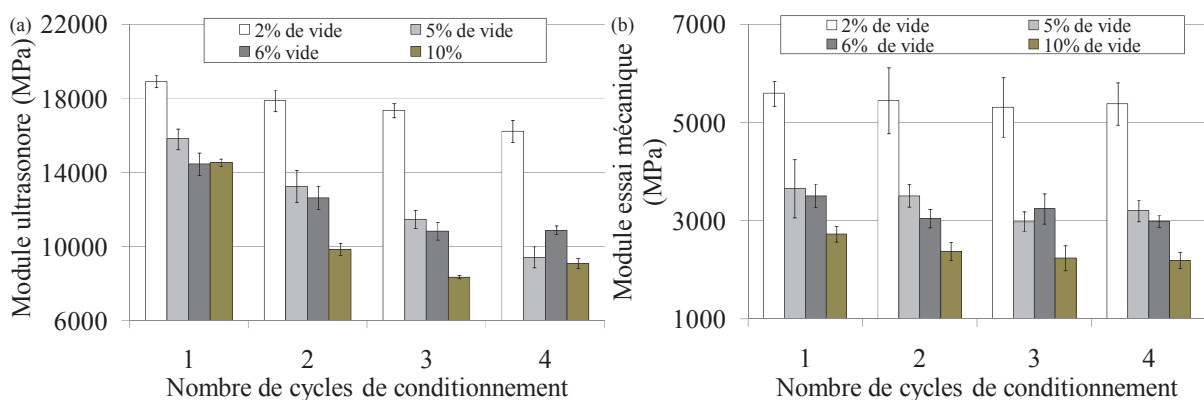


Figure I. 11 : Evolution des modules calculés avec les essais mécaniques et ultrasonores en fonction des cycles d'humidification pour les différents matériaux testés [Barnes, 2010]

Ces résultats ultrasonores ont été comparés (Figure I. 11 (b)) à des modules issus d'essais mécanique sur des matériaux identiques soumis aux mêmes cycles d'humidification. On peut voir qu'entre les essais ultrasonores et mécaniques la tendance sur l'évolution des modules

reste la même, cependant l'ordre de grandeur n'est pas identique. Ceci peut être expliqué par la dépendance fréquentielle du module du matériau. En effet, les fréquences de sollicitations lors d'un essai ultrasonore sont supérieures à celle d'un essai mécanique traditionnel.

L'obtention de *l'optimum de la teneur en bitume* a été étudiée par Arabani [Arabani, 2009] en réalisant des essais de propagation d'onde de compression et de cisaillement dans des enrobés ayant pour seule différence la teneur en bitume. Sur la Figure I. 12, on peut voir que les vitesses de propagation des ondes de compression comme de cisaillement augmentent jusqu'à atteindre un maximum avant de diminuer à nouveau. Ceci peut être expliqué par le fait que le module du matériau augmente (donc la vitesse de propagation des ondes également) jusqu'à l'obtention de l'optimum de bitume (paragraphe II – 2 – 1).

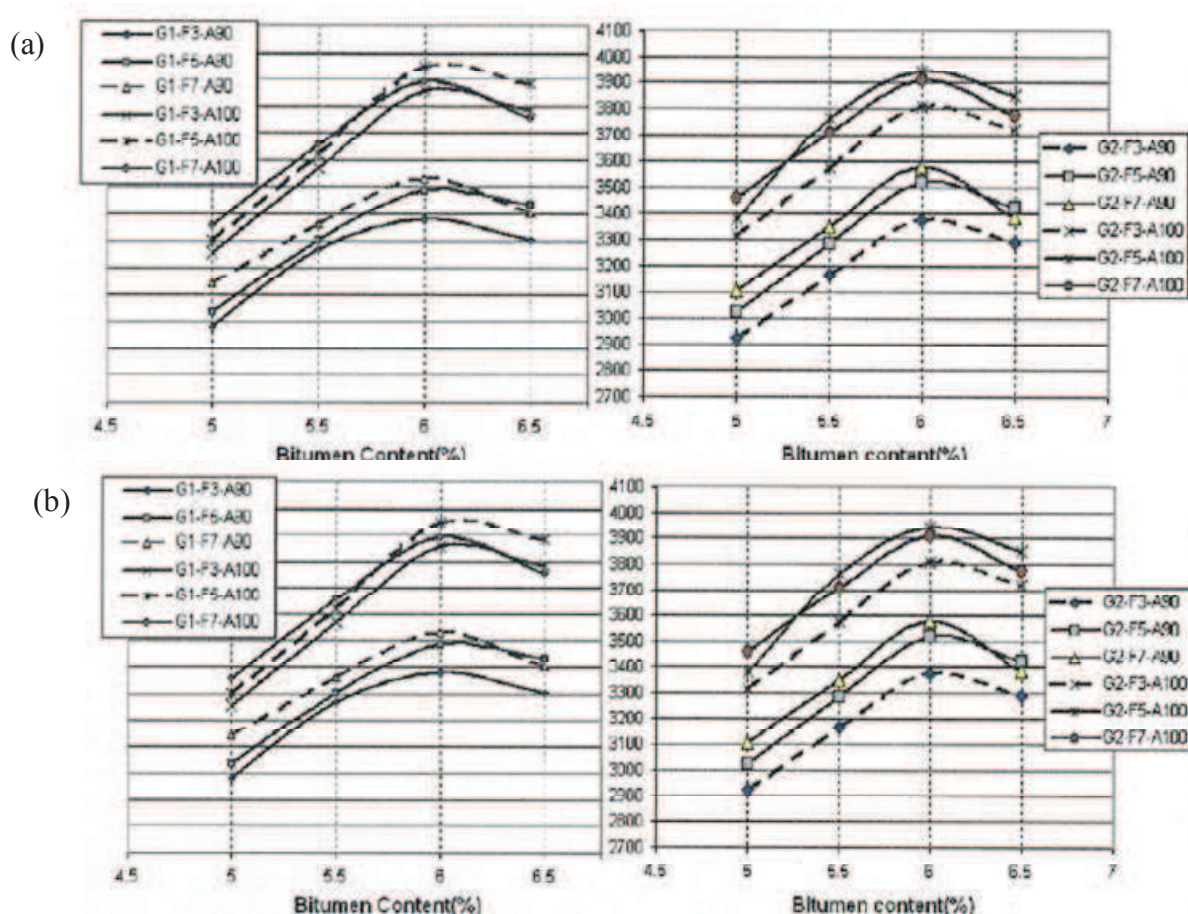


Figure I. 12 : Evolution des vitesses de compression (a) et de cisaillement (b) en fonction de la teneur en bitume [Arabani, 2009]

Cette valeur crête de vitesse correspond à l'optimum de bitume pour ces enrobés (environ 6%). Par ailleurs, on peut également remarquer que les vitesses des ondes de cisaillement diminuent beaucoup plus rapidement que celles de compression une fois l'optimum de bitume dépassé. On peut en conclure que les ondes de cisaillement sont plus sujettes à la viscosité que les ondes de compression.

Les *défauts de mise en œuvre* sont aussi une cause importante des dégâts occasionnés sur les chaussées. En effet lorsque la mise en œuvre n'est pas correcte, le matériau ne peut remplir ses tâches physico-chimiques (étanchéité, résistance aux sels de déverglaçage) et / ou mécaniques (résistance à la fatigue, à l'orniérage) correctement et son endommagement survient plus rapidement.

In et al., [In, 2009] se sont intéressés à la *ségrégation des granulats* en surface dans un enrobé bitumineux. L'étude laboratoire proposée consiste en la propagation et l'étude d'ondes de surfaces pour deux distances sur un matériau sain et un matériau présentant de la ségrégation. Dans un premier temps, la Figure I. 13 montre que le pic fréquentiel des signaux diminue en amplitude en fonction de la distance de propagation, cette diminution traduit la décroissance exponentielle de l'onde. Une diminution du pic de fréquence est également observable ce qui signifie qu'il y a un filtrage préférentiel des hautes fréquences par le matériau. Celui-ci est induit par la matrice viscoélastique du matériau [Bourbié, 1986].

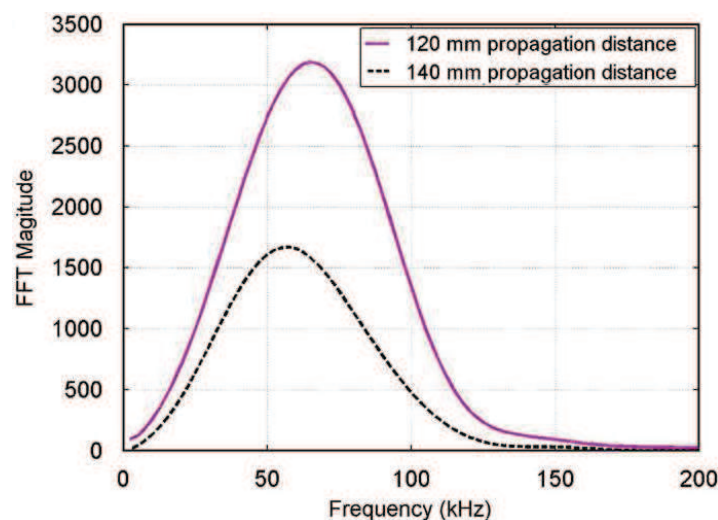


Figure I. 13 : Transformées de Fourier pour des signaux enregistrés à deux distances de propagation différentes [In, 2009]

Les auteurs ont souhaité mettre en évidence la ségrégation présente dans le matériau en représentant l'évolution du facteur d'atténuation en fonction de la fréquence. Ici le facteur d'atténuation a été calculé avec la méthode des pics fréquentiels des transformées de Fourier. Les résultats montrent que pour un matériau qui ne présente pas de ségrégation en surface le facteur d'atténuation suit une loi linéaire croissante en fonction de la fréquence (Figure I. 14). Cette tendance linéaire est typique d'une atténuation causée par l'absorption du milieu comme précisé au paragraphe III - 2.

Dans le cas du matériau présentant de la ségrégation, l'évolution du facteur d'atténuation montre une tendance linéaire puis une brusque augmentation. Ce saut d'atténuation peut être expliqué soit par le fait que l'augmentation du volume des vides causé par la ségrégation ne permet plus une transmission convenable de l'onde, soit par un changement de domaine d'atténuation c'est à dire qu'en plus de l'atténuation visqueuse (tendance linéaire) s'ajoute une atténuation causée par la diffusion de l'onde par les grains. L'onde est alors diffusée dans tout l'espace et l'énergie transmise au transducteur devient plus faible que dans un milieu sain ce qui explique une augmentation du facteur d'atténuation.

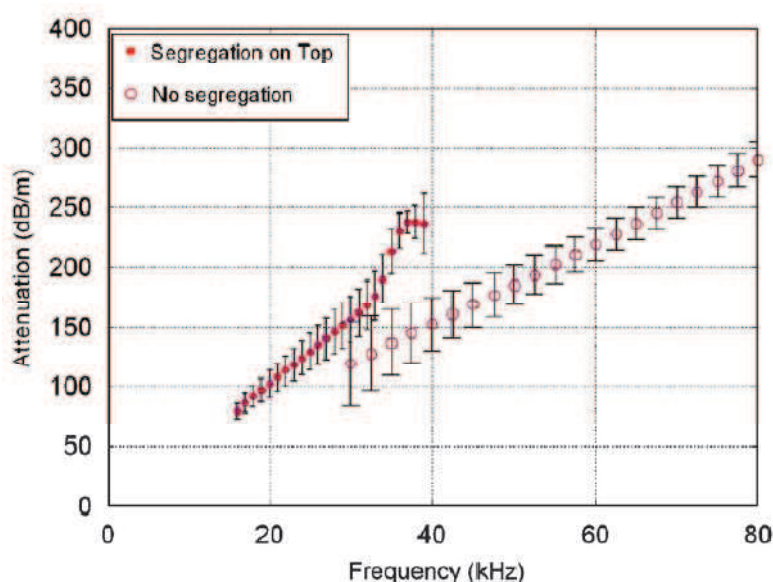
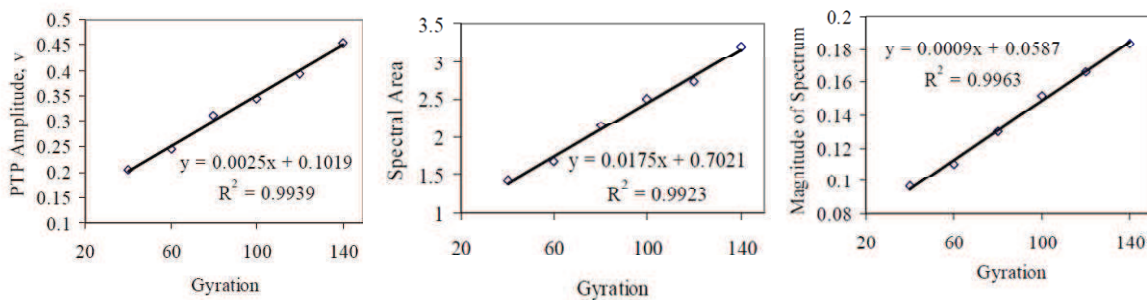


Figure I. 14 : Comparaison de l'évolution de l'atténuation en fonction de la fréquence entre un matériau sain et un matériau présentant de la ségrégation [In, 2009]

Grâce à une analyse temporelle et fréquentielle, Jiang et al. [Jiang, 2006] ont montré une corrélation entre les grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes et le compactage du matériau. On voit sur la Figure I. 15 que quel que soit le paramètre considéré (pic de l'onde, densité spectrale ou pic fréquentiel), il augmente de manière linéaire avec le nombre de gyration ce qui signifie que plus le matériau est compacté plus la transmission de l'onde est importante.

Au vu des relations linéaires montrées précédemment [Dunning, 2004] [Birgisson, 2006] [Celaya, 2006] [Jurado, 2008] entre la densité et le volume des vides avec l'évolution du module complexe, il semble admis que plus le matériau est compacté plus son volume des vides diminue donc plus son module augmente.



PTP Amplitude (V) : Amplitude du pic du signal temporel

Spectral Area : Densité spectrale de la transformée de Fourier

Magnitude of Spectrum : Amplitude maximale de la transformée de Fourier

Figure I. 15 : Evolution des paramètres ultrasonores en fonction du compactage [Jiang, 2006]

Au cours de ces travaux de thèse Jurado s'est intéressée à l'anisotropie d'un enrobé bitumineux [Jurado, 2008] en effectuant des essais de propagation d'onde de compression sur des éprouvettes cylindriques. Suivant les directions de propagation des ondes, les vitesses de propagation des ondes sont différentes comme le montre le Tableau I. 1 ce qui implique que les constantes élastiques du matériau le sont également.

Vitesse _{direction}	V ₁₁	V ₂₂	V ₁₂	V ₂₃	V ₅
Vitesse (m/s)	3221	3616	1848	2352	1997

Tableau I. 1 : Vitesses de propagation des ondes en fonction des directions de propagation

On peut voir sur le Tableau I. 2 qu'en fonction de la direction de propagation choisie, le rapport des modules d'Young et de cisaillement suivant deux directions différentes est respectivement d'environ 1,5 et 1,3 alors que celui du coefficient de Poisson est supérieur à 4,5. Cette forte anisotropie peut s'expliquer par le compactage appliqué au matériau. De plus, lors de cette étude les caractéristiques mécaniques du matériau ont été déterminées uniquement avec la propagation des ondes de compression dans les différentes directions du matériau et non par l'association de la propagation d'ondes de compression et de cisaillement.

Constantes	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	$\nu_{12} = \nu_{21}$	ν_{23}	G ₁₂ (GPa)	G ₂₃ (GPa)
Valeurs	14	21	0,34	0,07	8	11

Tableau I. 2 : Valeurs des modules d'Young, de cisaillement et coefficient de Poisson

Ces rapports indiquent donc que le matériau dans le cas de cette étude peut être considéré comme orthotrope avec une isotropie transverse.

Biligiri [Biligiri, 2009] a étudié quant à lui l'évolution de *l'impédance acoustique* toujours par rapport au volume des vides. Il a mis en évidence une diminution de l'impédance acoustique en fonction de l'augmentation du volume des vides mais cette fois ci sous forme exponentielle (Figure I. 16). Il utilise dans son étude le paramètre *EFR* (Effective Flow Resistivity) qui n'est autre que le dixième de l'impédance et s'exprime en cgs Rayls. Bien que les résultats soient assez dispersés, cette tendance peut s'expliquer par le fait que l'impédance acoustique de l'air est très faible par rapport aux impédances des autres constituants du matériau comme les granulats et le bitume (facteur 1000) donc plus le volume des vides augmente plus l'impédance totale du matériau diminue.

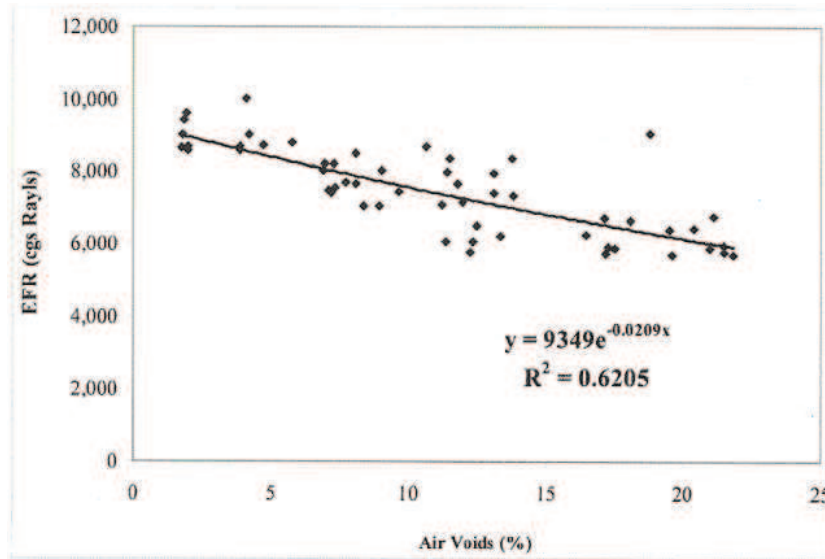


Figure I. 16 : Evolution de l'impédance acoustique (EFR) en fonction du volume des vides
[Biligiri, 2009]

III - 5 - Fatigue et endommagement

La propagation d'ondes permet également d'étudier la fatigue des matériaux ainsi que la détection de défauts pouvant entraîner un endommagement de la chaussée.

La *durée de vie en fatigue* des enrobés bitumineux a été étudiée par Tigdemir et al. [Tigdemir, 2004]. Pour cela, ils ont développé un modèle de prédiction prenant en compte les modules d'Young et de cisaillement calculés avec la propagation d'ondes de compression et de cisaillement ainsi que des paramètres affectant la durée de vie du matériau comme la charge appliquée, la teneur en bitume, la densité ou les dimensions de l'éprouvette. La comparaison des résultats (Figure I. 17) du modèle développé avec un essai de fatigue mécanique montre une assez bonne corrélation.

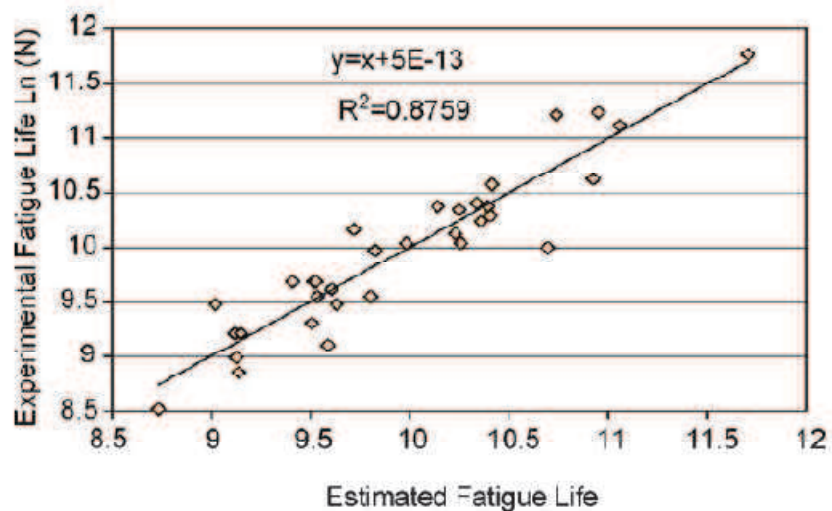


Figure I. 17 : Corrélation entre l'essai mécanique de fatigue et le modèle de prédiction [Tigdemir, 2004]

Par ailleurs, Houel et al. [Houel, 2009] ont montré qu'il y avait un lien entre la perte énergétique des ondes de compression pendant un essai de fatigue, la création de micro et macro fissures et la température (Figure I. 18).

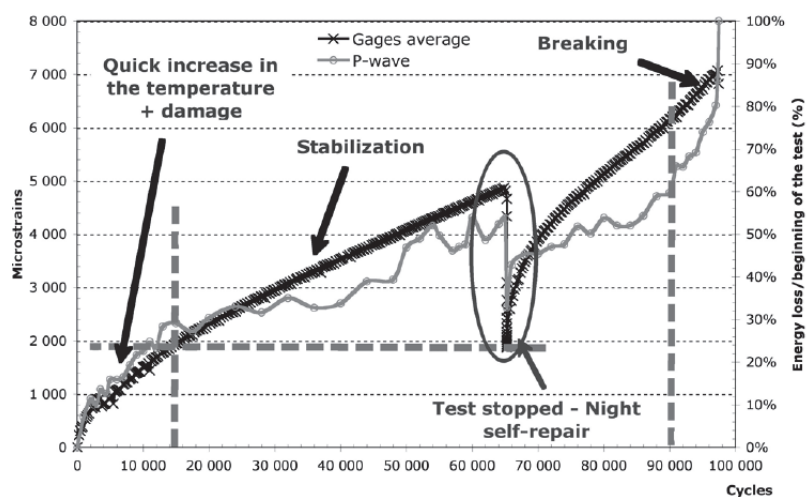


Figure I. 18 : Evolution de la micro déformation et de la perte d'énergie des ondes de compression pendant un essai de fatigue à la température -10°C [Houel, 2009]

Ils ont également montré dans des travaux précédents [Houel, 2007] qu'il y avait une relation linéaire entre la température du matériau et la vitesse des ondes de compression. La Figure I. 18 ci-dessus montre que la perte d'énergie dans la propagation des ondes de compression suit la même tendance que les capteurs de déformation. De plus, on peut voir que l'essai de fatigue se décompose en trois zones. La première qui correspond à un rapide endommagement et un échauffement de la matière où il se produit une grande perte d'énergie de propagation des ondes. Ensuite, il y a une stabilisation traduisant la création de microfissures dans l'enrobé, qui est également visible avec l'énergie de propagation des ondes. L'apparition de la macro fissure s'accompagne de la rupture du matériau. De plus, pendant l'essai, l'éprouvette a été déchargée et les auteurs ont conclu à une autoréparation du matériau bitumineux accompagnée d'une baisse de la température et d'un regain d'énergie de propagation des ondes. La relation entre l'évolution de la température et les propriétés mécaniques a été montrée par de la Roche [de la Roche, 2001] lors d'un essai de fatigue. Il a été constaté qu'il y a d'abord une chute brutale du module avec une évolution rapide de la température suivie d'une décroissance lente du module correspondant à un régime permanent en température. Pour finir, la propagation de fissures est accompagnée d'une décroissance rapide du module et d'une concentration de chaleur dans la zone de contraintes maximales. Les résultats de ces essais permettent de conclure que pendant un essai de fatigue, un dégagement de chaleur traduit une perte de résistance donc une baisse de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Notons tout de même que les résultats de cet essai sont donnés pour une température relativement basse de -10°C . Nous pouvons supposer qu'à cette température le bitume est suffisamment rigide pour permettre une bonne propagation des ondes.

La propagation d'ondes a aussi été utilisée en parallèle d'un essai de *fatigue sur un bitume* [Buannic, 2012] et a permis la comparaison de l'évolution des modules de cisaillement déterminés par chaque méthode. Les résultats montrent que les modules bien qu'ils ne soient pas du même ordre de grandeur évoluent de manière similaire. Cependant, il semble que le module ultrasonore soit moins affecté par certains effets tels que la température et la thixotropie en début d'essai. Le calcul de module à haute fréquence, bien qu'il ne permette pas de servir pour le dimensionnement des chaussées, permet tout de même de constater un endommagement et sa quantification.

Une étude *in situ* a été réalisée par Barnes [Barnes, 2009 (b)] dans le but de mettre en évidence un *endommagement dans les différentes couches de chaussée*. En utilisant la

propagation d'ondes de surface (MASW) et avec une hypothèse élastique, les modules de différentes couches ont été calculés. La comparaison entre les modules issus des essais ultrasonores, un modèle de prédiction et les résultats d'un essai mécanique en traction indirecte ont montré des tendances similaires en fonction de l'endommagement des différentes couches de chaussées bien que les modules ultrasonores et mécaniques ne soient pas du même ordre de grandeur.

Simonin s'est, quant à lui, intéressé à l'auscultation des interfaces des chaussées [Simonin, 2005]. Pour cela, le système « Colibri » est utilisé dont le principe repose sur l'application d'une série de chocs sur la chaussée par le biais d'un marteau instrumenté. La réponse verticale de la chaussée est, quant à elle, mesurée à l'aide d'un accéléromètre. Ainsi par une analyse spectrale des signaux enregistrés, il est possible de calculer l'inertance (rapport accélération / force) de la chaussée dont le module de cette fonction d'inertance est sensible à l'état des interfaces des chaussées. La Figure I. 19 présente une comparaison des résultats obtenus pour deux chaussées présentant une assise saine et une assise dégradée. On constate que pour une assise saine le module de l'inertance est relativement faible et constant alors que pour une assise dégradée celui-ci devient très variable.

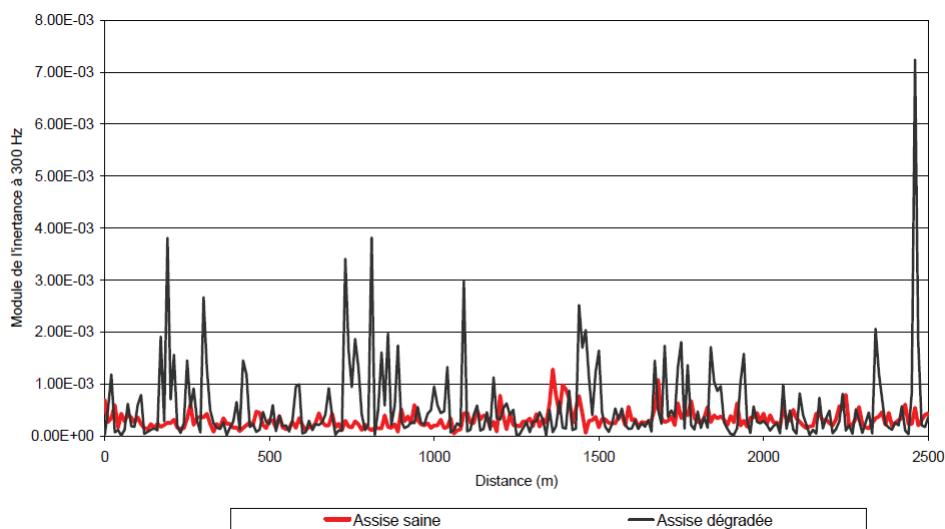
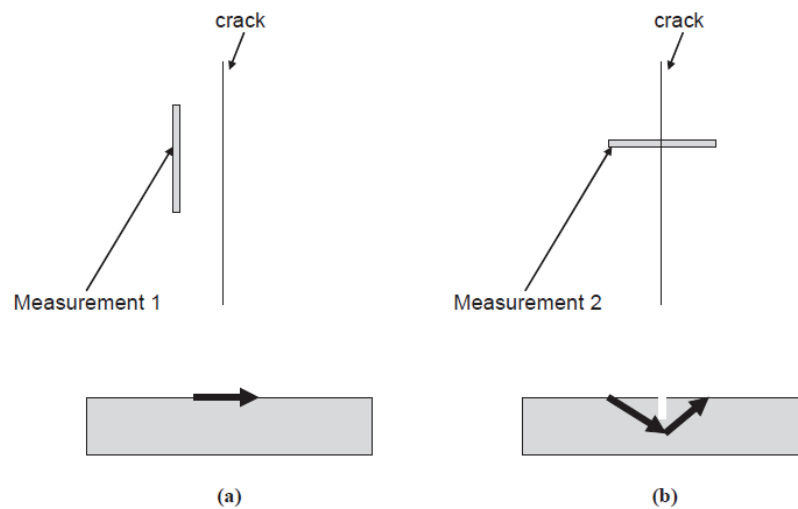


Figure I. 19 : Exemple de l'application « Colibri » pour deux chaussées présentant une assise saine et dégradée

La *détection de fissures* a été abordée par Khazanovich et al. [Khazanovich, 2005]. Cette étude permet en plus de la localisation de la fissure sur la structure de donner une estimation de sa profondeur grâce à la génération d'ondes de compression en surface sur des chaussées existantes. Le principe, comme montré sur la Figure I. 20, repose sur la comparaison des vitesses de propagation dans un matériau sain et dans un matériau endommagé.



*Figure I. 20 : Propagation d'onde parallèlement et perpendiculairement à la fissure
[Khazanovich, 2005]*

Cette méthode implique cependant de considérer que les caractéristiques de propagation de l'onde parallèlement et perpendiculairement à la fissure sont identiques ce qui semble une hypothèse convenable à l'échelle d'une chaussée. L'étude des rapports des vitesses parallèlement et perpendiculairement à la fissure montre (Figure I. 21) qu'il est possible d'établir une relation entre ce rapport et la profondeur de la fissure.

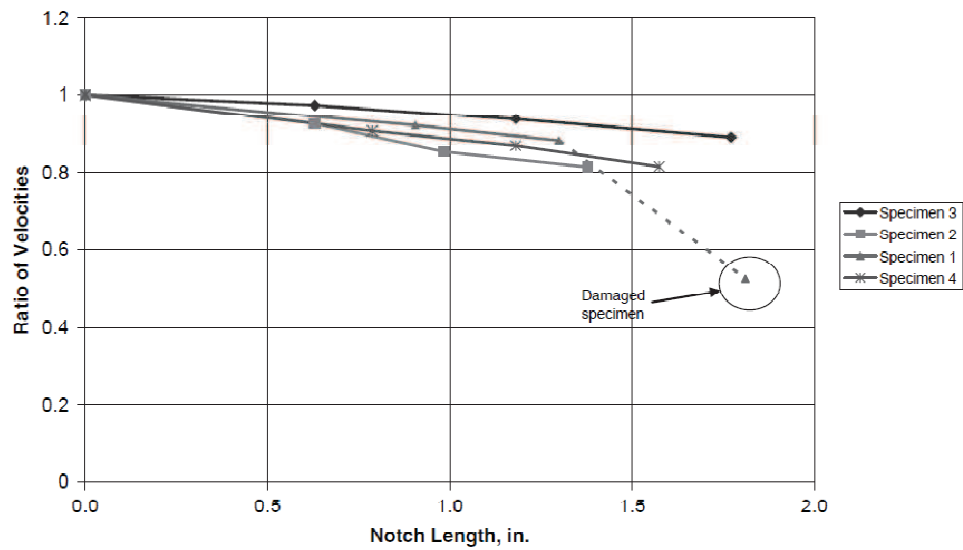


Figure I. 21 : Relation entre le rapport des vitesses et la profondeur de la fissure [Khazanovich, 2005]

Dans le même esprit, Underwood et al., [Underwood, 2003] ont montré que le rapport des vitesses de phase diminue en fonction de la profondeur de fissure tout comme l'énergie transmise (Figure I. 22).

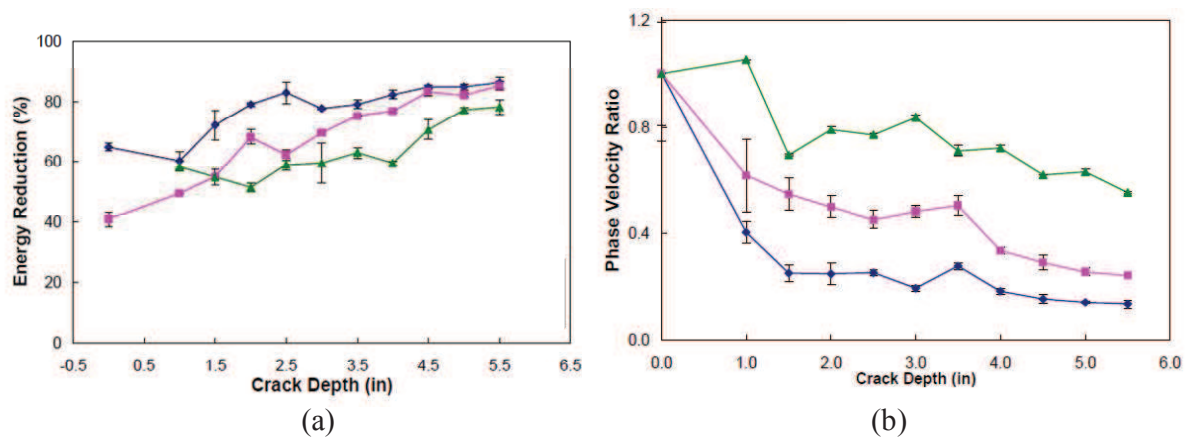


Figure I. 22 : (a) Baisse d'énergie transmise (b) ratio de la vitesse de phase en fonction de la profondeur de fissure [Underwood, 2003]

L'*intégrité des joints de chaussée* a été également abordée par Jiang et al. [Jiang, 2008] qui ont défini une méthode de caractérisation de l'état du joint reposant sur la détermination du facteur d'atténuation des ondes de surface. Pour cela, deux coefficients de transmission sont définis FTC (Fourier Transmission Coefficient) et WTC (Wavelet Transmission Coefficient). La Figure I. 23 montre la comparaison de ces coefficients sur trois dalles dont la densité du matériau près des joints varie afin de reproduire des joints respectivement en bon, moyen et mauvais état. Les coefficients donnent tout d'abord des valeurs identiques en fonction des dalles testées. Les coefficients de transmission sont également sensibles à l'état des joints, ceci peut s'expliquer par le fait qu'un joint en bon état a encore toutes ses propriétés mécaniques et permet la transmission de l'onde ce qui n'est certainement pas le cas d'un joint dégradé.

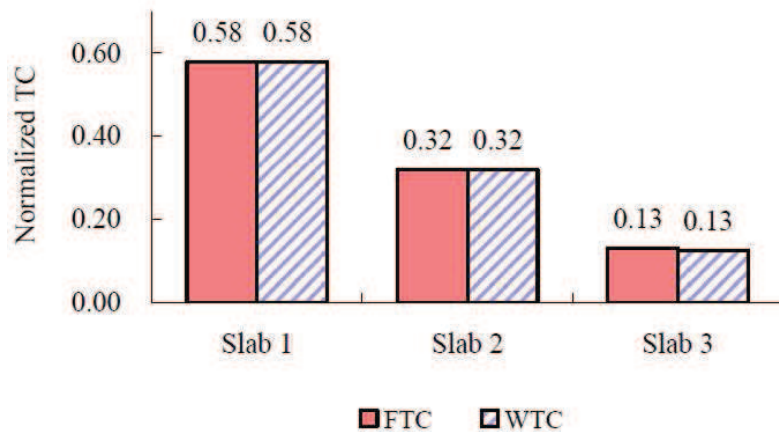


Figure I. 23 : Comparaison des coefficients de transmission pour différentes dalles testées
[Jiang, 2008]

III - 6 - Détermination du module complexe

La détermination du module complexe par propagation d'onde a donné lieu à de nombreuses études utilisant les méthodes actives présentées auparavant (soniques, dynamiques et ultrasonores).

Dos Reis et al., [Dos Reis, 1999] ont utilisé *la méthode de l'impact écho* dans le but d'estimer le module de différents matériaux. Basée sur une étude de la décroissance énergétique des

signaux en fonction du temps, une loi exponentielle est déterminée mettant en évidence la capacité de stockage énergétique et le taux de décroissance des différents matériaux (Figure I. 24). Ainsi, les matériaux montrant la plus grande capacité de stockage et le taux de décroissance énergétique le plus élevé se sont révélés être ceux ayant le module le plus élevé.

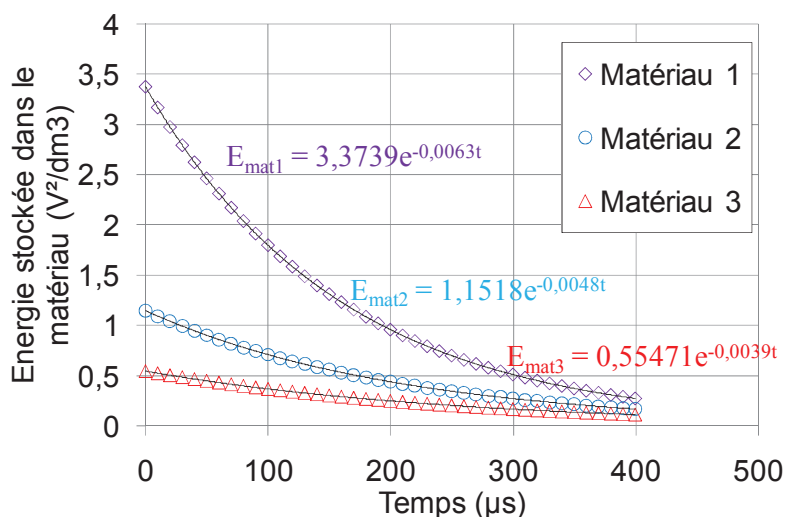


Figure I. 24 : Comparaison des lois de décroissance exponentielle énergétique des différents matériaux de l'étude [Dos Reis, 1999]

Les *méthodes dynamiques* ont été utilisées par plusieurs auteurs notamment celles reposant sur la résonance libre du matériau (RAS : Resonant Acoustic Spectroscopy). En effet, Ryden [Ryden, 2009] a étudié la résonance libre selon deux modes propres sur des éprouvettes cylindriques (Figure I. 25) pour des températures allant de $-10^{\circ}C$ à environ $55^{\circ}C$.

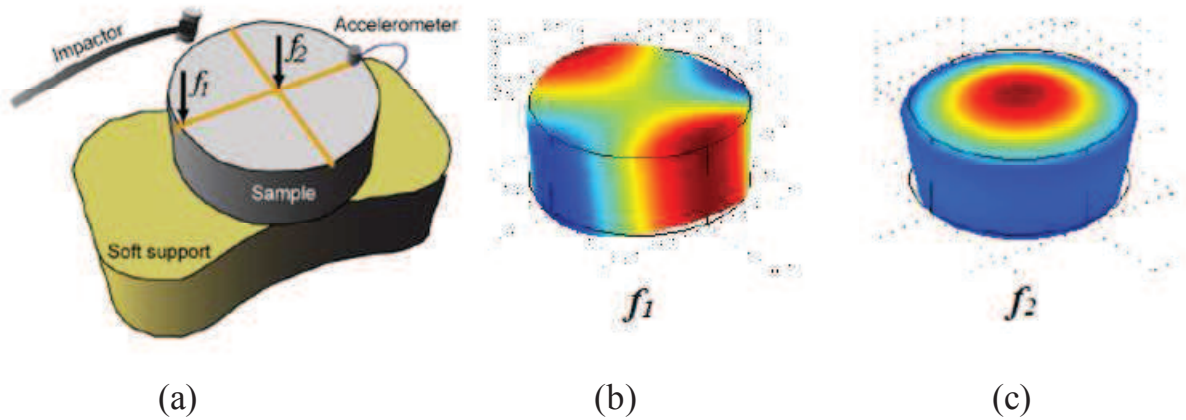


Figure I. 25 : (a) Principe de l'essai (b) Mode propre 1 (c) Mode propre 2 [Ryden, 2009]

L'auteur a montré dans un premier temps que la fréquence de résonance (quel que soit le mode de résonance considéré) diminuait lorsque la température augmentait mais également que le facteur d'amortissement augmentait avec la température (Figure I. 26).

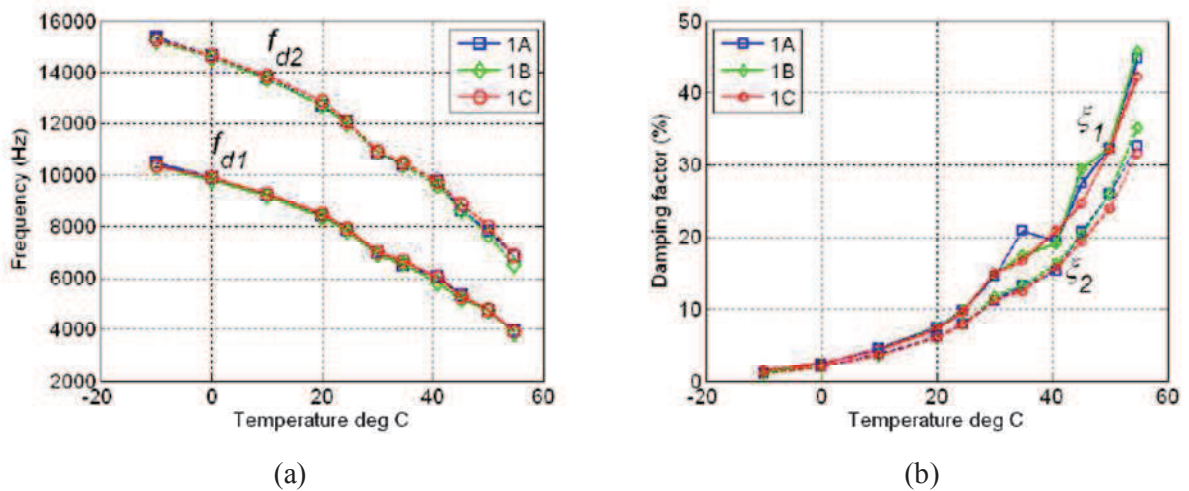


Figure I. 26 : Evolution de la fréquence de résonance (a) et du facteur d'amortissement (b) en fonction de la température [Ryden, 2009]

La Figure I. 27 montre les modules d'Young calculés en supposant un comportement élastique du matériau pour toute la gamme de températures testées et pour les modes propres

de résonance du matériau. Cette figure permet de mettre en évidence la dépendance à la fréquence et à la température du matériau. Par ailleurs, en utilisant le principe d'équivalence temps température l'auteur a pu reconstruire la courbe maîtresse.

Cette courbe maîtresse expérimentale a été confortée par une courbe maîtresse issue d'un modèle de prédiction du comportement mécanique. On peut voir, que pour la température de référence de 25°C, les modules peuvent être translatés jusqu'à la dizaine de Hertz. Par contre, bien que les données expérimentales soient en accord avec le modèle proposé, aucune comparaison n'a été faite avec des données expérimentales issues d'un essai mécanique.

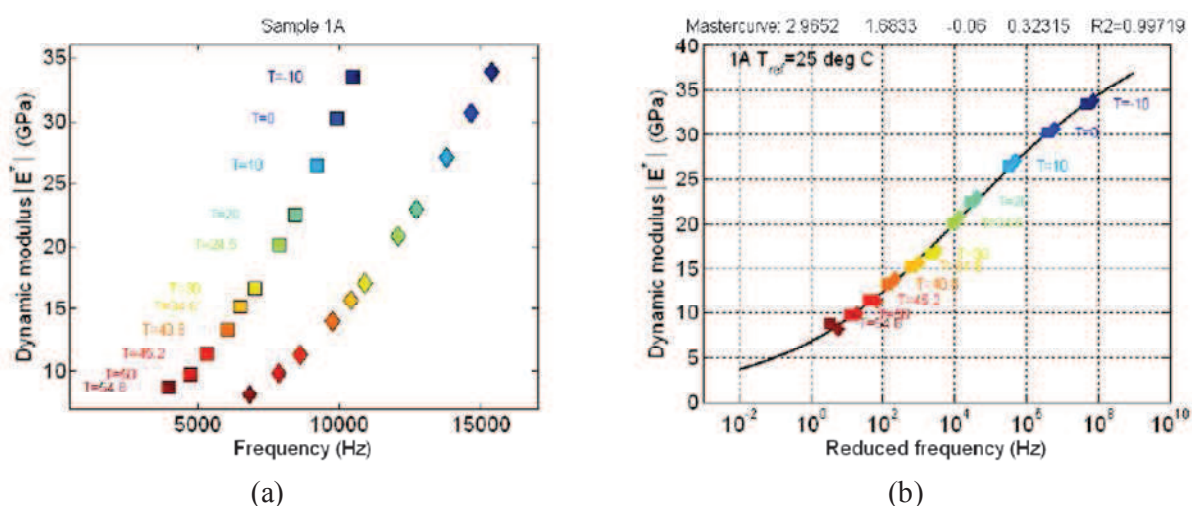


Figure I. 27 : (a) Modules calculés pour des températures allant de -10°C à 55°C pour les deux fréquences de résonance (b) Courbe maîtresse du matériau à 25°C [Ryden, 2009]

Toujours avec cette méthode, Gudmarsson et al. [Gudmarsson, 2012] ont utilisé des éprouvettes parallélépipédiques et étudié la vibration longitudinale et en flexion selon trois modes comme le montre la Figure I. 28. La vibration longitudinale a été utilisée pour la direction X tandis que la flexion a été réservée aux directions Y et Z. Dans le même esprit que précédemment, ils ont donc réalisé la courbe maîtresse à 10°C dans les trois directions. Par contre, les températures d'essais n'ont pas dépassé 30°C car des problèmes d'atténuation des ondes sont venus perturber les mesures.

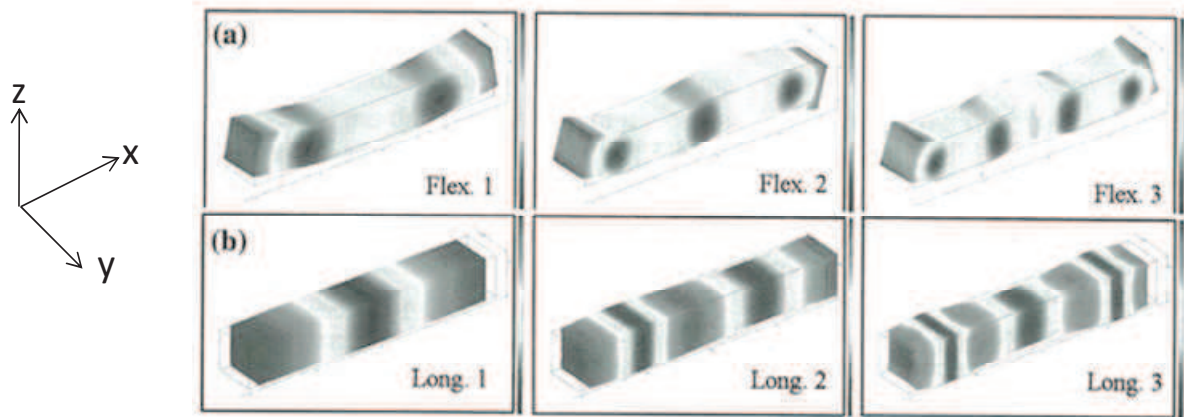


Figure I. 28 : Différents modes de vibrations (a) modes de flexion (b) modes longitudinaux
[Gudmarsson, 2012]

Par ailleurs, les vibrations longitudinales et en flexion ont des fréquences propres différentes, ce qui a permis de reconstruire des parties d'isothermes de modules à hautes fréquences des matériaux comme le montre la Figure I. 29.

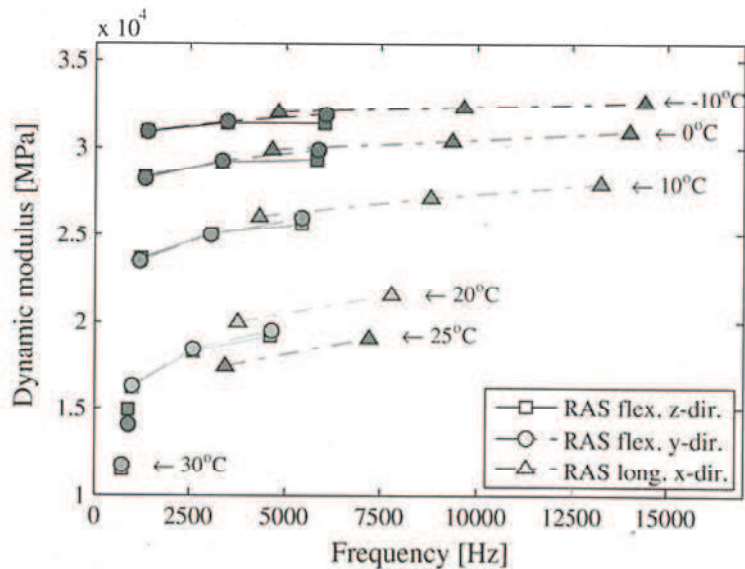


Figure I. 29 : Isothermes du matériau [Gudmarsson, 2012]

On peut noter que les fréquences et les modules obtenus par flexion sont très proches quelle que soit la direction (Y ou Z) de sollicitation alors que les résultats obtenus pour les vibrations

longitudinales sont plus hautes fréquences et supérieures en termes de modules. La Figure I. 30 montre les courbes maitresses déterminées en fonction de chaque mode et des différents axes. On peut voir que quel que soit le mode ou l'axe étudié les données issues de l'étude sont en adéquation avec le modèle de prédiction utilisé pour la comparaison. De plus, des isothermes d'angle de phase ont aussi été réalisées ainsi que des courbes maitresses (Figure I. 31).

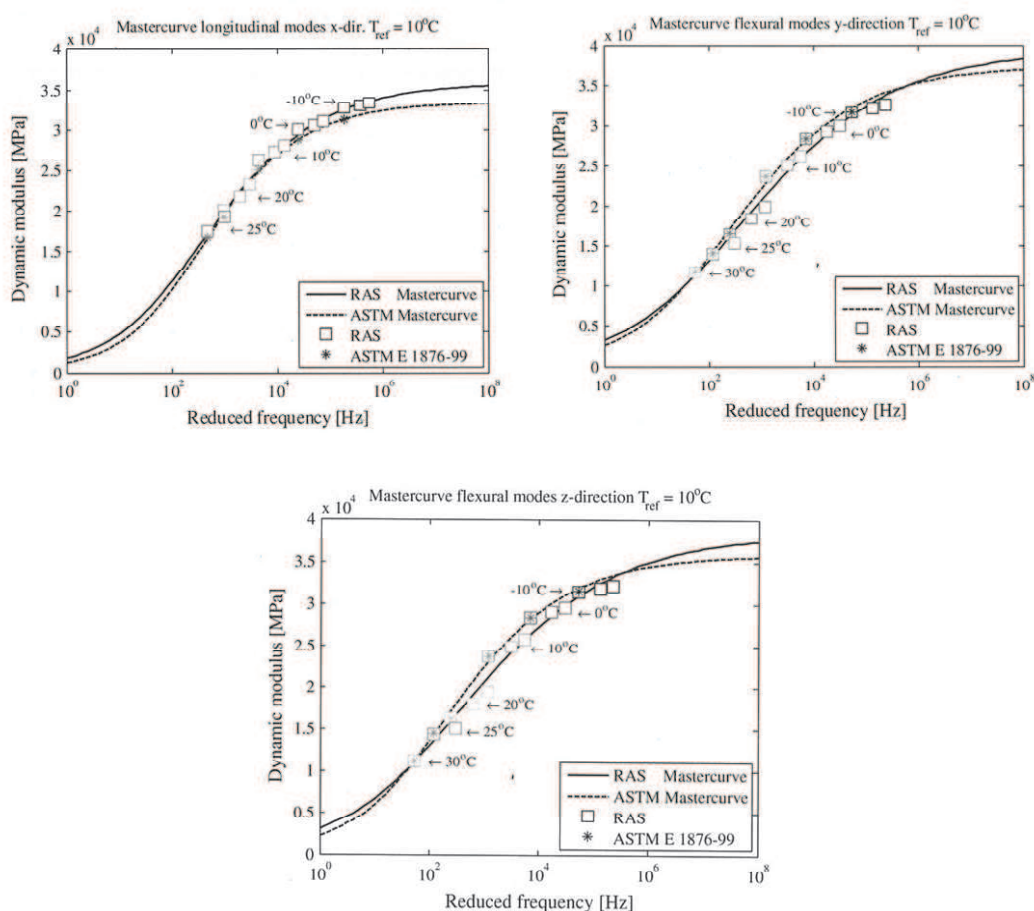


Figure I. 30 : Courbes maitresses en fonction des différents axes à la température de référence de 10°C [Gudmarsson, 2012]

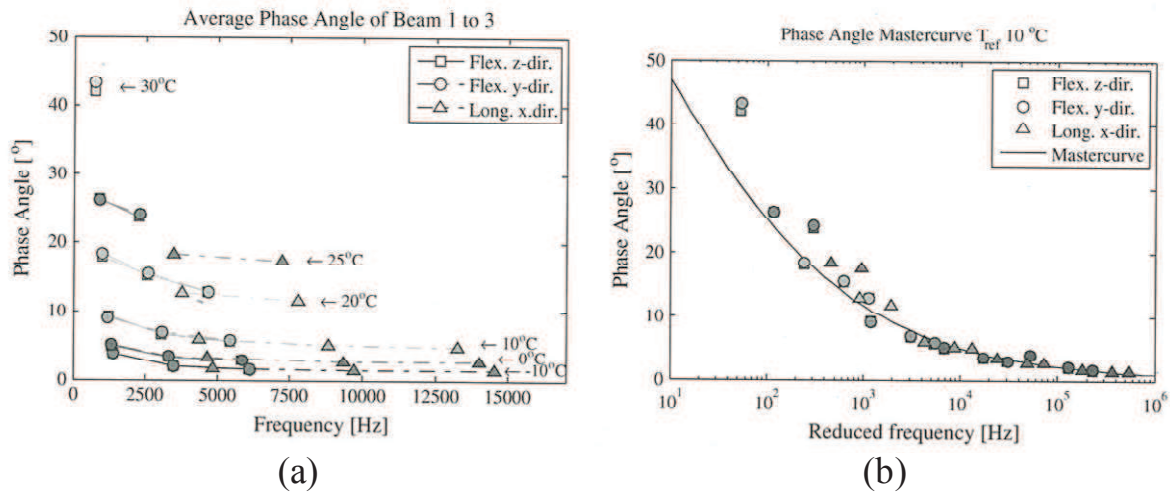


Figure I. 31 : (a) Isothermes d'angle de phase (b) Courbe maitresse de l'angle de phase à la température référence de 10°C [Gudmarsson, 2012]

Hochuli et al., [Hochuli, 2001] ont, quant à eux, utilisé une technique de vibration longitudinale forcée d'une éprouvette d'enrobé afin de calculer le module du matériau à plusieurs fréquences. Les résultats obtenus ont été comparés avec des modules obtenus par le biais d'ondes de flexion et ont montré une différence inférieure à 3%.

L'utilisation des *méthodes ultrasonores* a donné lieu à de nombreuses déterminations du module complexe des enrobés bitumineux en utilisant les différents types d'ondes existants et en faisant deux hypothèses de comportement mécanique majeures.

Le module complexe a d'abord été déterminé en faisant l'hypothèse d'un *comportement mécanique élastique isotrope*. Ainsi Norambuena-Contreras et al. [Norambuena – Contreras, 2010], ont utilisé la propagation d'ondes de compression sur des éprouvettes cylindriques. Après avoir déterminé la vitesse de propagation et supposé un coefficient de Poisson constant égal à 0,36, le module de deux enrobés différents a donc pu être calculé à la température de 22°C pour une fréquence d'excitation de 65 kHz. La Figure I. 32 montre que les modules mécaniques et ultrasonores sont en accord avec les courbes maitresses des matériaux. Cependant, bien que les modules ultrasonores ne soient pas du même ordre de grandeur que les modules issus des essais mécaniques, ceux-ci peuvent être utilisés dans le cadre d'une comparaison des propriétés mécaniques de matériaux différents.

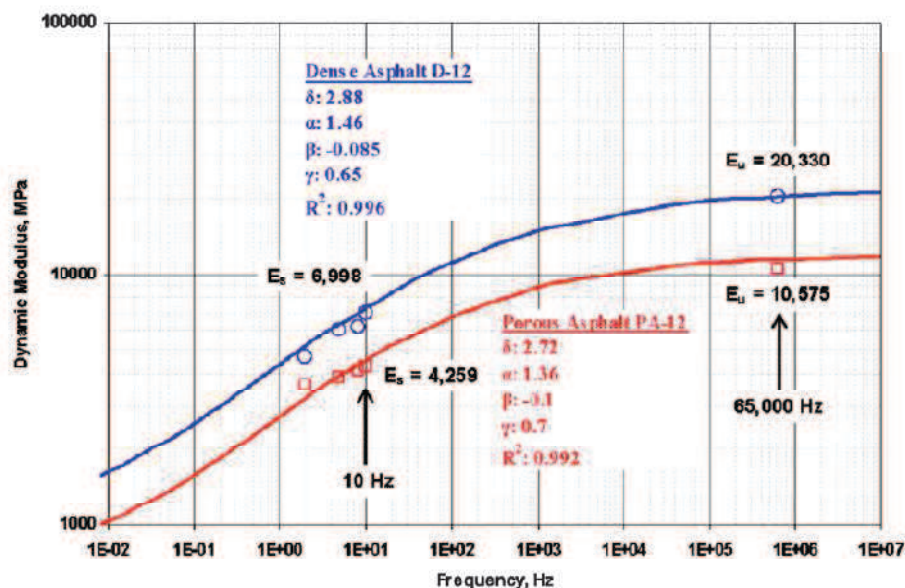


Figure I. 32 : Comparaison des modules ultrasonores avec les modules mécaniques et un modèle de prédiction [Norambuena – Contreras, 2010]

Les ondes de surface ont également été utilisées afin de déterminer le module complexe. Barnes et al., [Barnes, 2009 (a)] ont étudié la vitesse de phase des ondes de surface dans les matériaux bitumineux à une température de 23°C à plusieurs fréquences en utilisant parallèlement les méthodes SASW et MASW. Les modules des enrobés ont été calculés en se basant sur une hypothèse élastique et en supposant un coefficient de Poisson constant égal à 0,35. Ces résultats ont été comparés à des essais mécaniques ainsi qu'à un modèle de prédiction pour une température de référence de 18°C. De plus, une meilleure corrélation est montrée avec la méthode MASW. Une autre étude avec des ondes de surface a été menée par Celaya et Nazarian [Celaya, 2006] sur une chaussée existante. Les modules déterminés sur la chaussée par la propagation d'ondes de surface sont en accord avec les courbes maitresses mécaniques (Figure I. 33(a)).

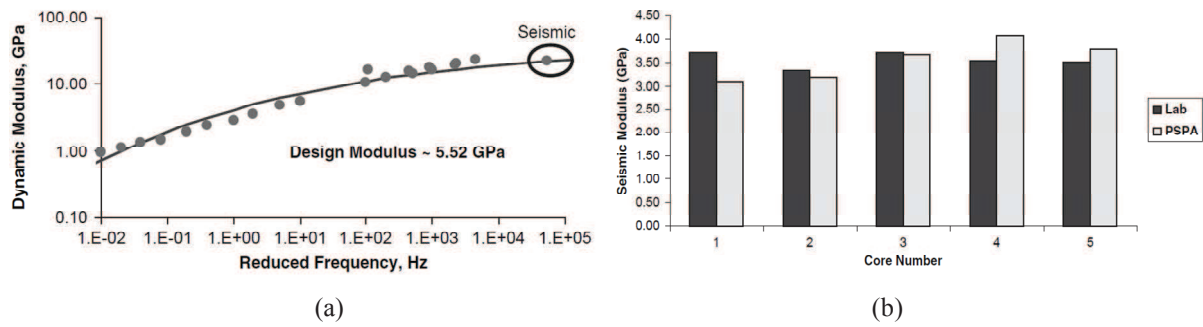


Figure I. 33 : (a) Modules déterminés sur la chaussée existante (b) Comparaison avec des modules déterminés en laboratoire [Celaya, 2006]

De plus, ces résultats ont été comparés à des essais ultrasonores effectués en laboratoire avec la propagation d'onde de compression (Figure I. 33 (b)). On voit que la différence entre les modules déterminés in situ avec l'utilisation des ondes de surface comparés avec des modules déterminés en laboratoire avec des ondes de compression n'excède pas 15%. Cette différence montre le potentiel des méthodes ultrasonores tant pour une utilisation in situ qu'en laboratoire pour la détermination du module des matériaux bitumineux à hautes fréquences.

Di Benedetto et al., [Di Benedetto, 2009] ont quant à eux, considéré la propagation d'ondes dans un *matériau viscoélastique isotrope* pour la détermination du module complexe de l'enrobé. L'étude est réalisée sur des éprouvettes cylindriques pour des températures variant de -19°C à 42°C . La vitesse des ondes de compression a été déterminée par la méthode du décrochement de zéro et leur fréquence par une transformée de Fourier (30 kHz). Parallèlement, un essai mécanique a été réalisé sur des matériaux identiques permettant ainsi de tracer les courbes maitresses mais également le calage du modèle rhéologique 2S2P1D. Ce modèle permet de déterminer l'angle de phase et le coefficient de Poisson en fonction de la température et de la fréquence.

On voit en effet dans le Tableau I. 3 que le coefficient de Poisson varie de 0,15 à 0,35 et l'angle de phase de $0,3^{\circ}$ à $15,5^{\circ}$ pour des températures allant de -19°C à 42°C ce qui signifie donc que le coefficient de Poisson n'est pas constant en fonction de la température et / ou de la fréquence. De même, l'angle de phase est très faible pour la température de -19°C mais il avoisine les 15° à 42°C ce qui n'est pas négligeable en terme de déphasage. Les modules ultrasonores sont donc calculés en prenant en compte les différentes valeurs de coefficients de

Poisson et d'angle de phase et sont positionnés sur la courbe maitresse en étant translatisés à la température de référence avec les mêmes coefficients de translation que les données mécaniques (Figure I. 34).

Température (°C)	Matériau 1		Matériau 2	
	Phase φ (°)	Coefficient de Poisson ν	Phase φ (°)	Coefficient de Poisson ν
-19	0,3	0,15	0,3	0,22
26	7,5	0,24	7,2	0,30
42	15,5	0,31	14,3	0,35

Tableau I. 3 : Angle de phase et coefficient de Poisson déterminé avec le modèle 2S2P1D [Di Benedetto, 2009]

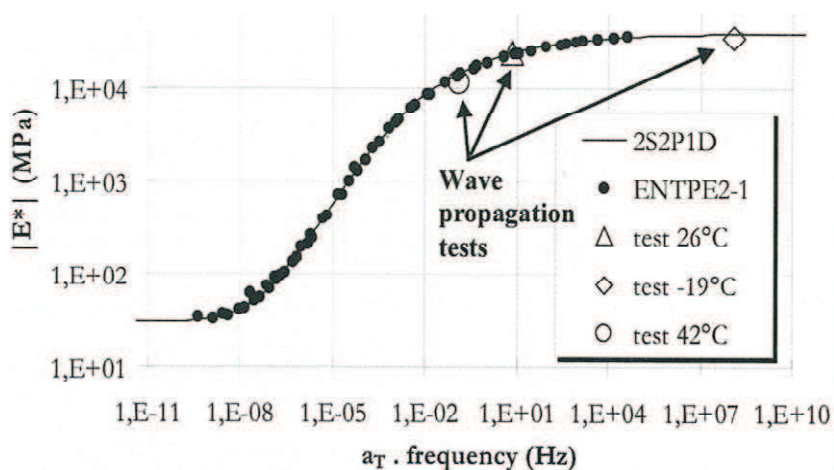


Figure I. 34 : Comparaison des courbes maitresses ultrasonores avec les courbes maitresses mécaniques et le modèle 2S2P1D [Di Benedetto, 2009]

Une étude identique a été réalisée par Mounier et al. [Mounier, 2012] en ajoutant la propagation d'onde de cisaillement. Le fait de coupler les ondes de compression et de cisaillement permet la détermination expérimentale du coefficient de Poisson. Par contre, dans un matériau viscoélastique, le coefficient de Poisson est dépendant de la fréquence. Il a été mis en avant que les vitesses respectivement de compression et de cisaillement n'avaient pas

les mêmes fréquences (Figure I. 35) ce qui explique le pourcentage d'erreur (de 12% à 37%) entre le coefficient de Poisson obtenu expérimentalement comparé à celui issu du modèle 2S2P1D dans le Tableau I. 4 (a).

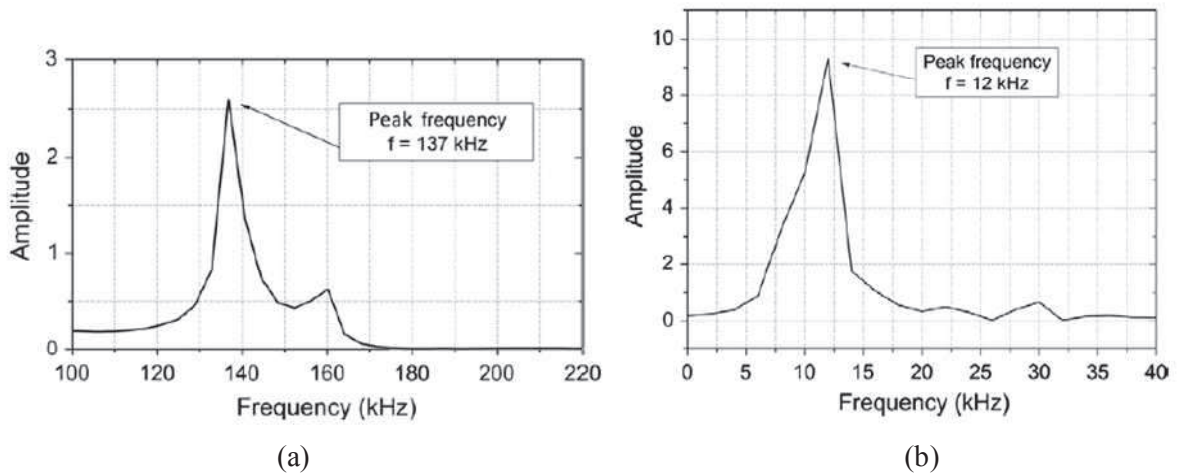


Figure I. 35 : Pic fréquentiel des ondes de compression (a) et de cisaillement (b)

[Mounier, 2012]

En corrigeant, cette différence fréquentielle par le biais du modèle 2S2P1D, en considérant le temps d'arrivée des ondes de compression non plus pour 137 kHz mais pour 12 kHz (la fréquence des ondes de cisaillement) l'erreur maximale obtenue sur la détermination du coefficient de Poisson est d'environ 13% (Tableau I. 4 (b)).

Cette différence sur la détermination des coefficients de Poisson en fonction de la fréquence souligne la dépendance fréquentielle des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes dans les matériaux bitumineux.

	$ v^* $	$ v^* _{2S2P1D}$	Différence relative (%)	
(a)	Echantillon 1	0,358	0,31	16,6
	Echantillon 2	0,336	0,24	37,6
	Echantillon 3	0,339	0,29	16,4
	Echantillon 4	0,334	0,29	16,8
	Echantillon 5	0,352	0,31	13,3
	$ v^* $	$ v^* _{2S2P1D}$	Différence relative (%)	
(b)	Echantillon 1	0,32	0,31	3,3
	Echantillon 2	0,28	0,24	13,7
	Echantillon 3	0,30	0,29	2,2
	Echantillon 4	0,30	0,29	6,1
	Echantillon 5	0,30	0,31	-1,9

Tableau I. 4 : Comparaison des coefficients de Poisson obtenus de manière expérimentale et par le modèle 2S2P1D (a) pour des fréquences différentes (b) après recalage des fréquences [Mounier, 2012]

La Figure I. 36 présente les résultats en termes des modules obtenus par l'essai ultrasonore et par la méthode de la résonance libre du matériau. Les modules issus des méthodes sismiques sont comparés par rapport à une courbe maitresse mécanique et le modèle rhéologique 2S2P1D [Mounier, 2012] à la température de référence de 0°C.

On constate que les modules obtenus par méthodes sismiques (quelle que soit la méthode choisie) se montrent en accord avec les données mécaniques et le modèle rhéologique.

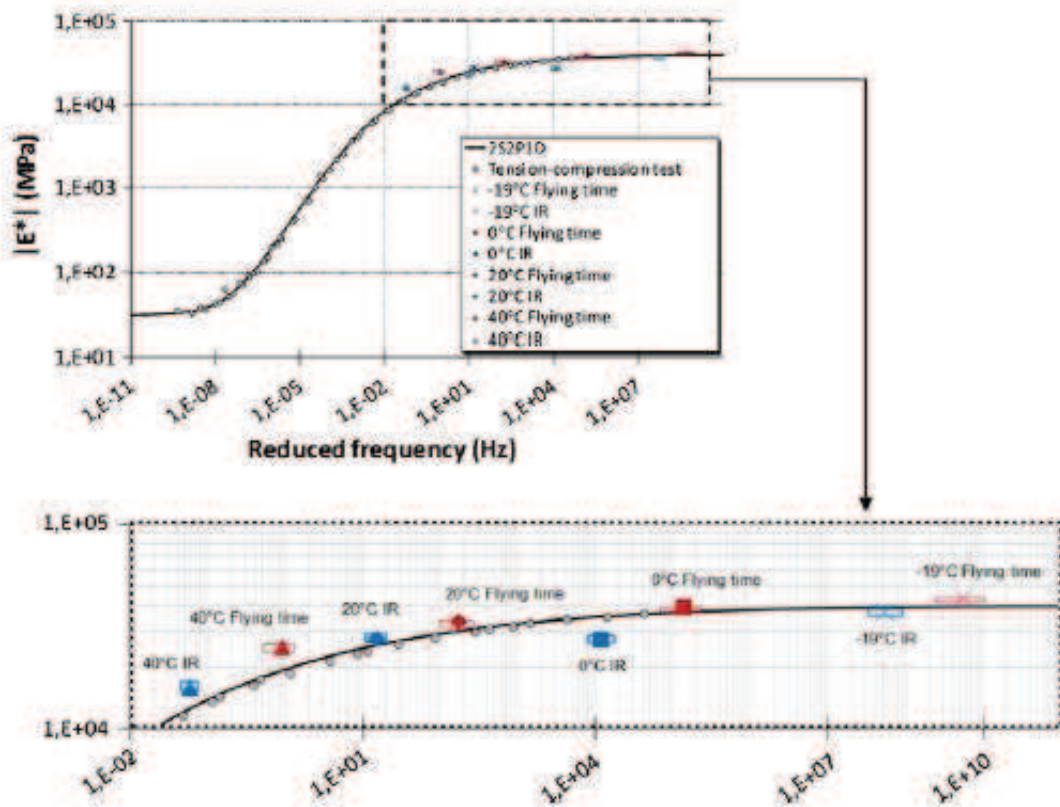


Figure I. 36 : Comparaison de modules complexes obtenus avec la méthode de la résonance libre et de propagation d'ondes ultrasonores [Mounier, 2012]

L'hypothèse viscoélastique a aussi été utilisée par Van Velsor et al., [Van Velsor, 2011]. Pour cela, la propagation d'ondes ultrasonores de compression et de cisaillement a été utilisée sur deux échantillons de longueurs différentes (environ 5 mm de différence). Le comportement visqueux du matériau a été introduit par le facteur d'atténuation qui est calculé avec les amplitudes des transformées de Fourier sur toute la bande passante du transducteur pour les deux types d'ondes. Son évolution en fonction de la fréquence est globalement linéaire (Figure I. 37) avec localement des tendances différentes.

On peut remarquer également que le coefficient directeur des régressions linéaires est plus faible pour les ondes de compression que pour les ondes de cisaillement. Ce coefficient directeur qui représente l'évolution de l'atténuation expérimentale en fonction de la fréquence, montre une fois de plus que les ondes de cisaillement sont plus sujettes à l'atténuation que celles de compression.

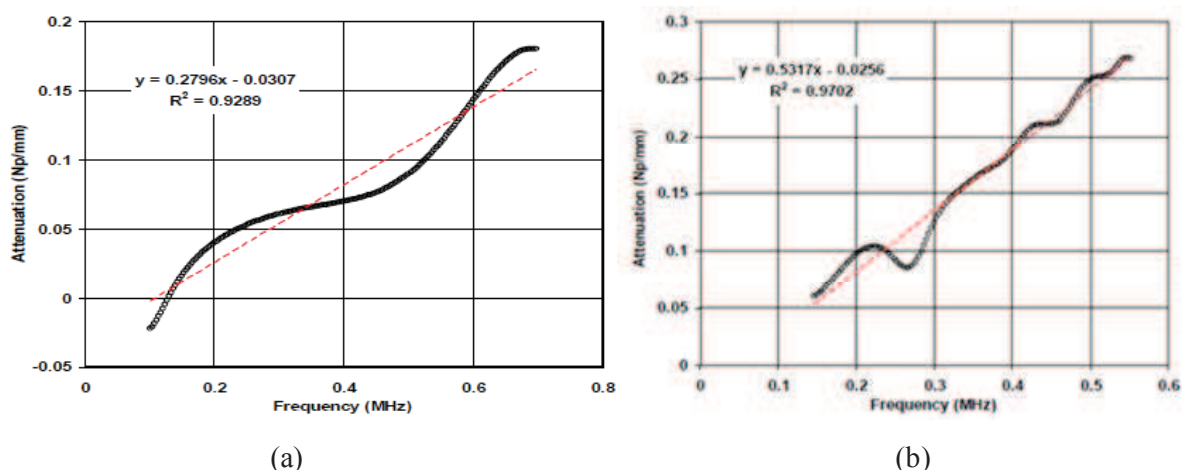


Figure I. 37 : Evolution du facteur d'atténuation en fonction de la fréquence pour les ondes (a) de compression (b) de cisaillement [Van Velsor, 2011]

En déterminant les paramètres de propagation tels que la vitesse de propagation et l'atténuation, les modules de cisaillement et d'Young à hautes fréquences ont été calculés.

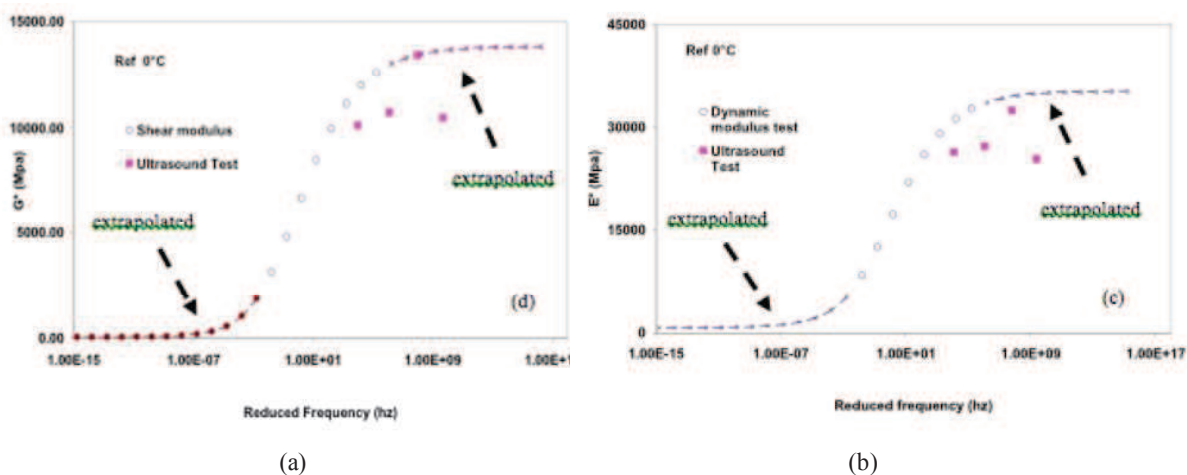


Figure I. 38 : Courbe maitresse du module (a) de cisaillement complexe (b) d'Young complexe [Van Velsor, 2011]

La Figure I. 38 montre les modules complexes calculés à hautes fréquences. On peut voir sur celle-ci que les modules ultrasonores sont inférieurs aux valeurs extrapolées des données

mécaniques. Cette sous-estimation des modules est causée par une mauvaise détermination de la vitesse de propagation. En effet, on verra dans les chapitres suivant, que pour la détermination d'un module à hautes fréquences, l'utilisation d'une hypothèse élastique ou viscoélastique donne des résultats similaires, on ne peut donc pas imputer cette sous-estimation à une mauvaise détermination du facteur d'atténuation. Cette même remarque est valable également pour la détermination de l'angle de phase qui est logiquement surestimé comme le montre la Figure I. 39.

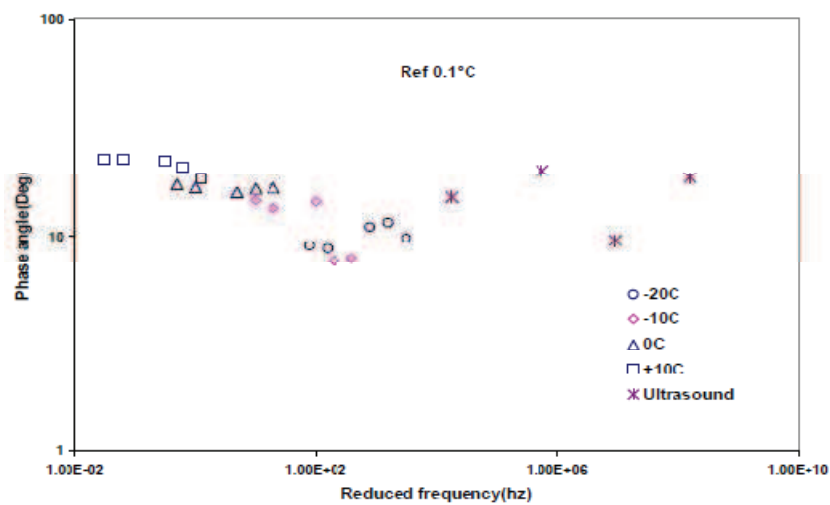


Figure I. 39 : Angle de phase en fonction de la fréquence équivalente [Van Velsor, 2011]

IV - Synthèse et conclusion

L'utilisation des méthodes sismiques, notamment ultrasonores dans le cadre de Contrôle Non Destructif des matériaux bitumineux se montre prometteuses. En effet, nous avons vu que la propagation d'ondes est tout d'abord sensible aux changements au niveau microstructural du matériau. En effet, des relations linéaires ou exponentielles ont été établies en fonction des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes aussi bien dans un domaine d'analyse temporel que fréquentiel. L'évolution de la vitesse de propagation donne, notamment par un calcul de module élastique, une indication sur la densité, le volume des vides ou la teneur en bitume. Par ailleurs, ces caractéristiques physiques peuvent également être mises en évidence par une analyse dans le domaine fréquentiel par le biais d'un facteur de transmission. Ces études en laboratoire peuvent avoir des applications in situ avec la propagation des ondes de surface et permettent le suivi et / ou la mise en évidence des défauts de mise œuvre.

D'un point de vue de la caractérisation mécanique, les essais sismiques permettent un suivi de l'endommagement. Plusieurs méthodes ont été proposées. On peut par exemple réaliser des essais de propagation d'ondes et entrer les paramètres dans un modèle de prédiction ou encore évaluer un endommagement en comparant deux modules déterminés par ultrasons à deux instants différents. Une étude laboratoire a montré que l'énergie transmise par les ondes diminuait en fonction de l'endommagement. De même, des études in situ, dans le cadre d'un monitoring, ont été menées avec la propagation d'ondes de surface. Ces études permettent de statuer sur la présence ou non de fissures et de déterminer leur profondeur. L'état des joints de chaussée a également été abordé.

Au sujet de la détermination du module complexe, de nombreux travaux ont été réalisés utilisant les trois principaux types d'ondes et différentes méthodes sismiques. Bien que des hypothèses majeures sur le comportement mécanique du matériau soient faites, toutes les études ont montré que les modules calculés à hautes fréquences étaient supérieurs aux modules issus des essais mécaniques. Il se montre alors nécessaire d'effectuer une prédiction du comportement mécanique du matériau par le biais d'un modèle afin de conforter les résultats ultrasonores par rapport aux résultats issus d'essais mécaniques de module complexe.

Par ailleurs, les enrobés bitumineux sont des matériaux hétérogènes. Ces hétérogénéités peuvent être à l'origine d'une interaction avec les ondes provoquant ainsi une source

d'atténuation. Or dans les travaux récents, il semble que cette source additionnelle d'atténuation due à la diffusion de l'onde ne soit pas prise en compte. De plus la présence dans le matériau, de bitume et de granulats est à l'origine d'une dépendance thermique et fréquentielle des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes.

Les enrobés bitumineux sont également des matériaux anisotropes. Cette anisotropie est causée par la répartition aléatoire des granulats ainsi que par la direction de compactage du matériau. Cette anisotropie a pu être mise en évidence par des essais de propagation d'ondes notamment par la détermination du coefficient de Poisson suivant des directions différentes. Cependant, de nombreuses études considèrent les enrobés bitumineux comme isotropes en première approximation. Il a par ailleurs été montré que le coefficient de Poisson n'était pas constant mais bien dépendant de la température et de la fréquence.

Chapitre II :

Principe théorique et démarche expérimentale

I - Introduction

Ce chapitre commence par une présentation théorique de la propagation d'onde. Deux hypothèses de comportement mécanique sont comparées en considérant le matériau isotrope : l'hypothèse élastique et l'hypothèse viscoélastique. Suivant ces deux approches, les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes et les caractéristiques mécaniques des matériaux sont exprimées pour les ondes de compression et de cisaillement. Le coefficient de Poisson est également abordé. Notons que l'application de l'hypothèse viscoélastique est accompagnée de l'introduction du facteur d'atténuation visqueux qui traduit l'absorption du milieu.

La démarche expérimentale concerne l'ensemble des paramètres et des préconisations pris en compte pour l'élaboration de l'essai ultrasonore. Ces paragraphes traitent des aspects matériels en tenant compte des différentes technologies existantes et des dispositions à respecter pour le bon déroulement de l'essai. Les propriétés des matériaux sont aussi abordées, notamment l'atténuation, la thermo-sensibilité et les hétérogénéités (pour les enrobés bitumineux) du matériau pour le dimensionnement des éprouvettes.

La dernière partie traite de l'acquisition des signaux notamment du choix de la fréquence d'échantillonnage qui est un paramètre important pour la bonne retranscription d'un signal réel. Ensuite, les différentes méthodes utilisées pour la détermination des paramètres de propagation des ondes dans les domaines temporel et fréquentiel sont présentées.

II - Théorie de la propagation des ondes

Prenons un cube (Figure II. 1) ayant pour référence un repère de coordonnées 1,2 et 3, alors l'état de contrainte sur les côtés du cube peut être représenté par neuf composantes σ_{ij} ($ij = 1,2,3$).

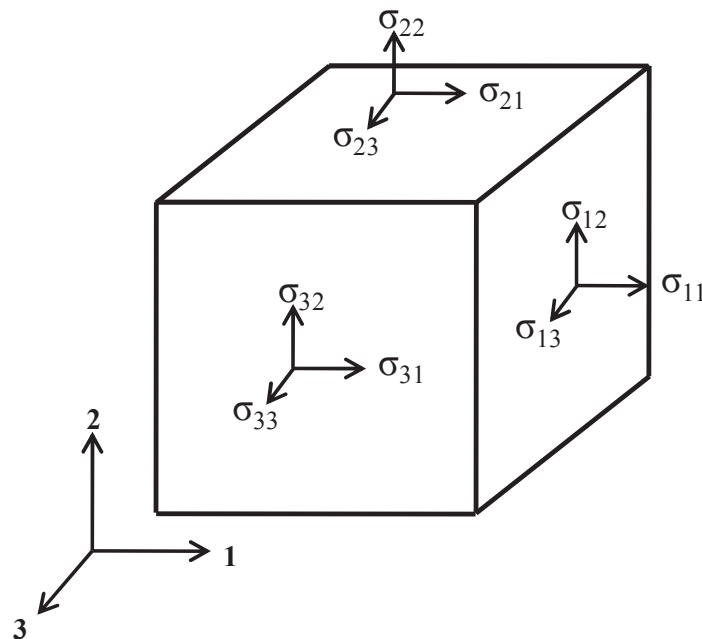


Figure II. 1: Etat des contraintes

Les déformations sont également représentées par neuf composantes ε_{ij} ($ij = 1,2,3$). Les contraintes et les déformations sont alors généralement reliées par la loi de Hooke (Eq II. 1) par le biais de la matrice de rigidité C_{ijkl} (ou inversement par la matrice de complaisance S_{ijkl}).

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{ij} \quad (ijkl = 1,2,3) \quad (\text{Eq II. 1})$$

Dans le cas d'un matériau isotrope, c'est-à-dire un matériau dans lequel les propriétés physiques sont invariantes en fonctions des directions de sollicitations, le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est alors réduit à deux : les constantes de Lamé λ et μ .

Les contraintes normales σ et de cisaillement τ peuvent alors s'écrire d'après l'équation II. 2 telles que :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu & 0 & 0 \\ & \text{Sym} & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq II. 2})$$

Les équations II. 3 et II. 4 relient les constantes de Lamé aux modules d'Young et de cisaillement :

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = G \quad (\text{Eq II. 3})$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (\text{Eq II. 4})$$

On peut alors exprimer la matrice de rigidité C en utilisant les modules d'Young, de cisaillement et le coefficient de Poisson (Eq II. 5).

$$C = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ & & & G & 0 & 0 \\ & \text{Sym} & & & G & 0 \\ & & & & & G \end{bmatrix} \quad (\text{Eq II. 5})$$

II - 1 - Principe fondamental de la dynamique

Les trois composantes du champ de déplacement peuvent être reliées aux contraintes par la loi de conservation de mouvement (Principe Fondamental de la Dynamique) en négligeant les champs de force de volume (Eq II. 6) :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sigma_{ij,j} \quad (\text{Eq II. 6})$$

Ou encore avec la loi de Hooke (Eq II. 7) :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (\text{Eq II. 7})$$

Avec ρ la masse volumique du matériau.

Par le biais de cette dernière relation, il est alors possible d'écrire les propriétés mécaniques des matériaux avec les paramètres de propagation des ondes dans un milieu isotrope en adoptant une approche élastique ou viscoélastique.

II - 2 - Propagation dans un milieu homogène élastique continu isotrope

On peut tout d'abord considérer la propagation d'ondes dans un milieu au comportement mécanique élastique afin de déterminer les modules d'Young et de cisaillement du matériau en fonction de la vitesse de propagation des ondes de compression et de cisaillement. Pour cela, on introduit une solution élastique (Eq II. 8) [Bourbié, 1986] dans l'équation issue du principe fondamental de la dynamique (Eq II. 6 ou Eq II. 7).

$$u(x, t) = u_o \exp(i\omega t - ikx) \quad (\text{Eq II. 8})$$

Avec dans cette équation, u_o le déplacement initial de l'onde, ω la pulsation (rad.s^{-1}), k le nombre d'onde (m^{-1}).

L'écriture élastique dans un milieu isotrope du module d'Young E (respectivement de cisaillement G) en fonction de la vitesse de propagation des ondes de compression (respectivement de cisaillement) est donnée par l'équation II. 9 (respectivement II. 10).

$$E = \frac{\rho V_p^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (\text{Eq II. 9})$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (\text{Eq II. 10})$$

Avec V_p et V_s les vitesses de propagations des ondes de compression et de cisaillement, ν le coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson ν avec cette hypothèse élastique peut s'écrire suivant l'équation II. 11.

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2V_p^2 - 2V_s^2} \quad (\text{Eq II. 11})$$

II - 3 - Propagation dans un milieu homogène viscoélastique continu isotrope

Dans le but de se rapprocher un peu plus du comportement réel du matériau étudié une solution viscoélastique (Eq II. 12) [Bourbié, 1986] peut également être introduite dans l'équation II. 6.

$$u(x, t) = u_o \exp(i\omega t - ik^*x) \quad (\text{Eq II. 12})$$

Cette solution se différencie de la solution élastique principalement par l'introduction du nombre d'onde complexe k^* qui peut également s'écrire $k^* = k - i\alpha_{vis}$ où α_{vis} est l'atténuation due au comportement visqueux du matériau. L'équation II. 12 peut alors s'écrire de la manière suivante (Eq II. 13) :

$$u(x, t) = u_o \exp(i\omega t - ikx) \exp(\alpha_{vis}x) \quad (Eq II. 13)$$

Cette solution correspond à une onde progressive d'atténuation $\alpha_{vis}(\omega)$ à la pulsation ω .

L'introduction d'une solution viscoélastique entraîne une dépendance à la fréquence des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes. On parle cette fois ci de vitesse de phase car le déphasage ϕ (différent de l'angle de phase mécanique φ obtenue lors des essais de module complexe) entre le signal d'impulsion et de réception n'est pas constant en fonction de la fréquence. De plus, une deuxième grandeur caractéristique de propagation des ondes est exprimée, c'est l'atténuation visqueuse α_{vis} .

L'expression de la vitesse de phase et de l'atténuation visqueuse pour les ondes de compression (Eq II. 14 et II. 15) et de cisaillement (Eq II. 16 et II. 17) dans un milieu viscoélastique isotrope se fait en fonction du module et de la phase mécanique qui caractérise le déphasage entre la contrainte et la déformation.

$$V_{\phi,p} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \sqrt{\frac{|E^*|(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (Eq II. 14)$$

$$\alpha_{v,p} = \omega \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sqrt{\frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{|E^*|(1-\nu)}} \quad (Eq II. 15)$$

$$V_{\phi,s} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \sqrt{\frac{|G^*|}{\rho}} \quad (Eq II. 16)$$

$$\alpha_{v,s} = \omega \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sqrt{\frac{\rho}{|G^*|}} \quad (Eq II. 17)$$

En combinant les équations des vitesses de phase et des atténuations visqueuses pour chaque type d'onde, on arrive à l'expression des modules d'Young (Eq II. 18) et de cisaillement (Eq II. 19) complexes en fonction des paramètres de propagation d'ondes.

$$|E^*| = \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{\left(\frac{\alpha_{v,p}^2}{\omega^2} + \frac{1}{V_{\phi,p}^2}\right)(1-\nu)} \quad (\text{Eq II. 18})$$

$$|G^*| = \frac{\rho}{\left(\frac{\alpha_{v,s}^2}{\omega^2} + \frac{1}{V_{\phi,s}^2}\right)} \quad (\text{Eq II. 19})$$

L'écriture des parties réelles et imaginaires en fonction des paramètres de propagation des ondes de compression et de cisaillement est donnée par les équations II. 20 à II. 23 pour un matériau viscoélastique isotrope.

$$E_1 = \frac{\rho \left(1 - \frac{V_{\phi,p}^2 \alpha_{v,p}^2}{\omega^2}\right) (1+\nu)(1-2\nu)}{\left(\frac{\alpha_{v,p}^2}{\omega^2} + \frac{1}{V_{\phi,p}^2}\right)^2 V_{\phi,p}^2 (1-\nu)} \quad (\text{Eq II. 20})$$

$$E_2 = \frac{\frac{2V_{\phi,p} \alpha_{v,p} \rho}{\omega} (1+\nu)(1-2\nu)}{\left(\frac{\alpha_{v,p}^2}{\omega^2} + \frac{1}{V_{\phi,p}^2}\right)^2 V_{\phi,p}^2 (1-\nu)} \quad (\text{Eq II. 21})$$

$$G_1 = \frac{\rho \left(1 - \frac{V_{\phi,s}^2 \alpha_{v,s}^2}{\omega^2}\right)}{\left(\frac{\alpha_{v,s}^2}{\omega^2} + \frac{1}{V_{\phi,s}^2}\right)^2 V_{\phi,s}^2} \quad (\text{Eq II. 22})$$

$$G_2 = \frac{\frac{2V_{\phi,s} \alpha_{v,s} \rho}{\omega}}{\left(\frac{\alpha_{v,s}^2}{\omega^2} + \frac{1}{V_{\phi,s}^2}\right)^2 V_{\phi,s}^2} \quad (\text{Eq II. 23})$$

Par ailleurs, le coefficient de Poisson peut également s'écrire en fonction des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes suivant une hypothèse de propagation d'ondes dans un milieu viscoélastique (Eq II. 24).

$$\nu^* = \frac{\frac{\alpha_s^2}{\omega^2} + \frac{1}{v_s^2} - \frac{2\alpha_p^2}{\omega^2} - \frac{2}{v_p^2}}{2\left(\frac{\alpha_s^2}{\omega^2} + \frac{1}{v_s^2} - \frac{\alpha_p^2}{\omega^2} - \frac{1}{v_p^2}\right)} \quad (\text{Eq II. 24})$$

De plus, les parties réelles et imaginaires du coefficient de Poisson sont exprimées à partir des équations II. 25 à II. 26 [Waterman, 1977] :

$$\nu_1 = \frac{E_1 G_1 + E_2 G_2}{2(G_1^2 + G_2^2)} - 1 \quad (\text{Eq II. 25})$$

$$\nu_2 = \frac{E_1 G_2 - E_2 G_1}{2(G_1^2 + G_2^2)} \quad (\text{Eq II. 26})$$

L'angle de phase mécanique en fonction des grandeurs caractéristiques de propagation d'onde est également présenté dans l'équation II. 27. Elle est identique quel que soit le type d'onde.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2\alpha_v}{\omega - \frac{v_\phi^2 \alpha_v^2}{\omega}} \right) \quad (\text{Eq II. 27})$$

III - Démarche expérimentale

L'essai ultrasonore mis en place a pour objectif la propagation d'ondes ultrasonores (compression et cisaillement) à travers des échantillons de matériaux bitumineux (bitume et enrobés) afin de déterminer expérimentalement les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes (vitesse et facteur d'atténuation).

III - 1 - Choix de la méthode ultrasonore et principe de l'essai

Plusieurs modes de propagation d'ondes par transmission sont disponibles dans la littérature. On note les modes directs, semi directs et indirects [Bourbié, 1986] [Birgül, 2009]. Notre choix se tourne vers un essai de propagation par transmission directe. En effet, l'essai étant réalisé en laboratoire, il est possible de disposer facilement les transducteurs de part et d'autre d'un échantillon. Il faut noter que dans cette disposition les transducteurs sont alignés sur la même direction de propagation ce qui permet la plus grande transmission d'énergie [Norambuena-Contreras, 2010], ce qui n'est pas négligeable dans le cadre d'essais sur des matériaux ayant de fortes propriétés atténuantes comme les matériaux bitumineux. De plus dans cette configuration, le chemin de propagation de l'onde est facilement identifiable et simplifie les calculs de vitesse et de facteur d'atténuation. Notons tout de même, que l'essai développé dans cette étude reste réalisable in situ en utilisant les modes de propagation semi direct ou indirect.

L'essai ultrasonore est réalisé pour deux longueurs de propagation différentes L_1 et L_2 telles que $L_1 < L_2$ (Figure II. 2). Les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes sont alors déterminées en considérant le signal reçu à la distance L_1 comme le signal source (émetteur). La distance de propagation de l'onde prise en compte est alors $\Delta L = L_2 - L_1$.

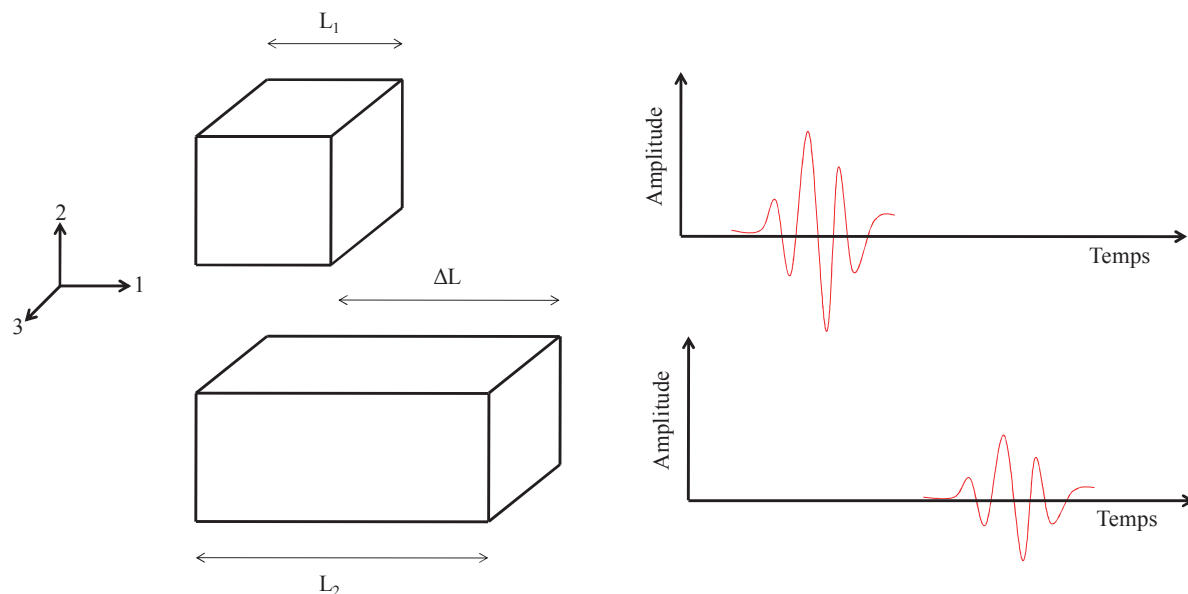


Figure II. 2 : Mode opératoire de l'essai ultrasonore

Ce mode opératoire permet de s'affranchir du retard temporel dû à la chaîne d'acquisition. De plus, le fait de travailler avec deux signaux ayant traversé le matériau permet le calcul de du facteur d'atténuation. En effet, il se montre compliqué de calculer ce paramètre en utilisant une seule distance de propagation car l'amplitude source bien quelle soit choisie et connue avec le logiciel de génération d'onde n'est pas vérifiée et une erreur sur celle-ci entraîne inéluctablement une erreur sur le calcul du facteur d'atténuation. La détermination des grandeurs caractéristiques de propagation (vitesse et facteur d'atténuation) dans le domaine fréquentiel n'est également pas réalisable avec un seul signal.

Par ailleurs, lorsqu'un transducteur en contact sur un matériau génère une onde ultrasonore de compression ou de cisaillement, il se crée en plus de ces ondes de volume, des ondes de surface (Figure II. 3). Ces ondes de surface ne sont pas enregistrées par le transducteur placé en réception. Ce mode opératoire permet donc le calcul du facteur d'atténuation uniquement avec les ondes de volume ayant traversées le matériau.

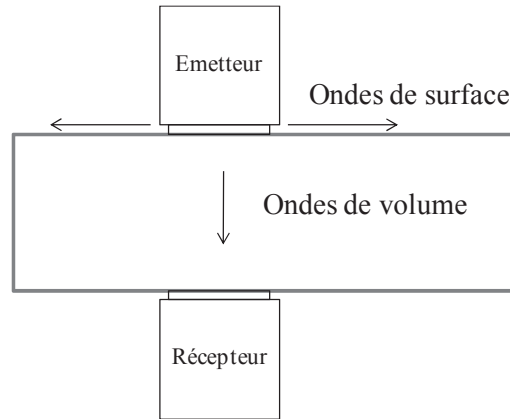


Figure II. 3 : Principe de génération d'onde par un transducteur

III - 2 - Choix des transducteurs

Les transducteurs utilisés sont des transducteurs haute sensibilité non accordés qui présentent un amortissement élevé et une large bande passante. Ce type de transducteur est particulièrement recommandé dans le cadre de l'étude de matériaux atténuants ou dispersifs exigeant un bon rapport signal / bruit. Pour l'étude réalisée ici, deux paires de transducteurs de compression et de cisaillement sont utilisés dont les calibrations sont présentées dans la Figure II. 4.

On remarque que les transducteurs de compression et de cisaillement ont des bandes passantes identiques relativement larges couvrant une gamme de fréquences allant d'environ 250 kHz à 800 kHz.

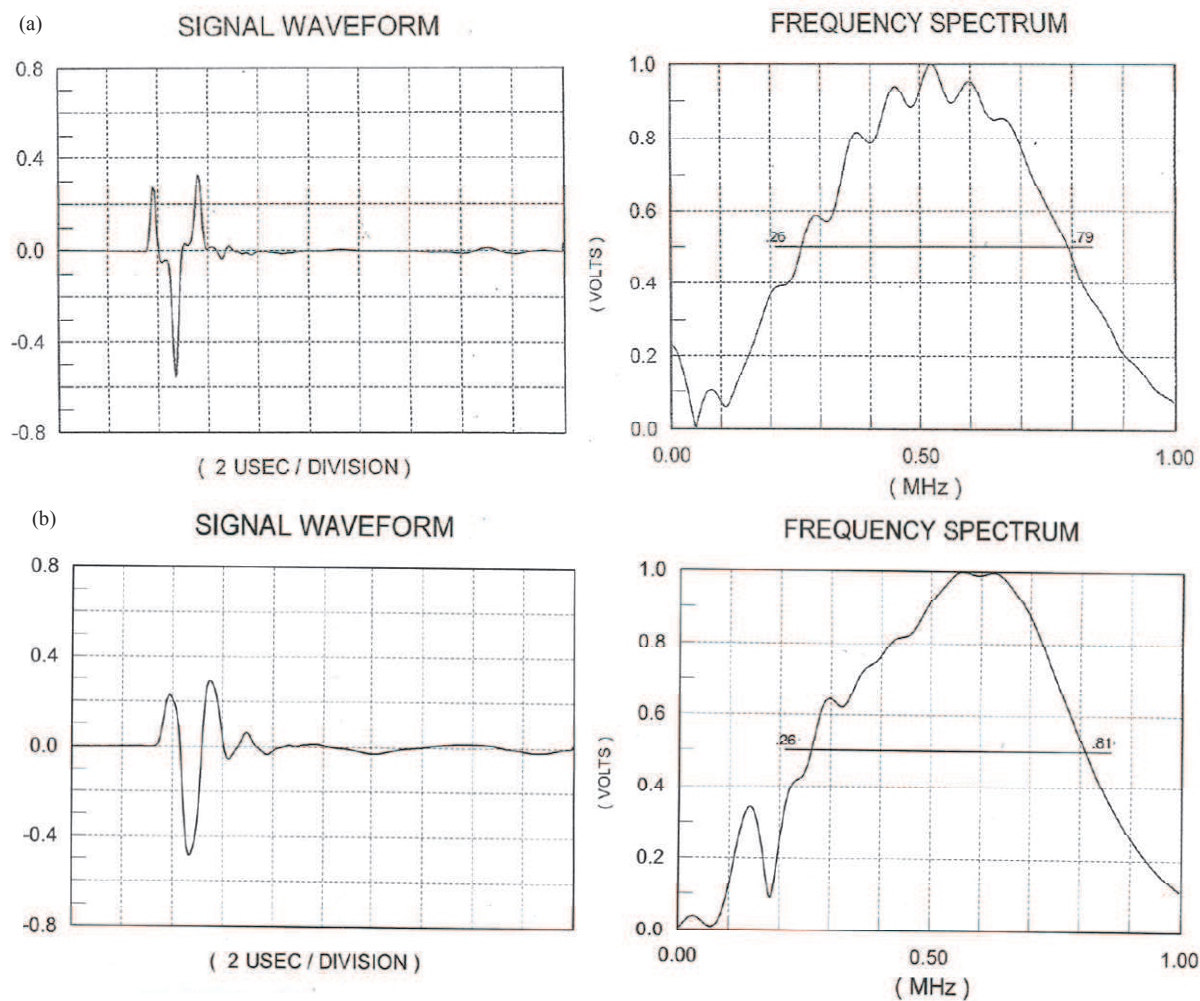


Figure II. 4 : Calibration des transducteurs (a) de compression (b) de cisaillement

III - 3 - Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental permettant la réalisation de l'essai est composé des éléments suivants :

- Une carte « ARB » permettant la génération de forme d'ondes. Cette carte a la possibilité de produire de la basse tension (0V à 10V) et de la haute tension (10V à 150V). L'utilisation de la haute tension se montre utile dans le cadre d'essais sur des matériaux atténuants et thermosensibles. Cette carte est pilotée par le logiciel de génération de signaux « WAVE GENERATOR » qui permet le choix de la fréquence d'émission (100 kHz à 700 kHz) et de la forme du signal (sinus, dirac, dent de scie....);

- Une carte d'acquisition « PCI 2 » couplée au logiciel d'acquisition de signal « AE WIN ». Ce logiciel permet l'acquisition des formes d'ondes ;
- Un préamplificateur 2/4/6 qui offre un gain au choix de 20, 40 ou 60 dB ;
- Deux paires de transducteurs de compression et de cisaillement (paragraphe III – 2) ;
- Un couplant acoustique à base de graisse permettant la transmission aussi bien des ondes de compression que celles de cisaillement. La plage de température d'usage de ce couplant est de -30°C à 200°C ;
- Le post traitement des signaux est assuré par une interface spécialement conçue au cours de cette thèse avec la plateforme de développement « LABVIEW ». Il permet le calcul de l'intégralité des grandeurs caractéristiques de propagation d'onde nécessaires à l'étude.

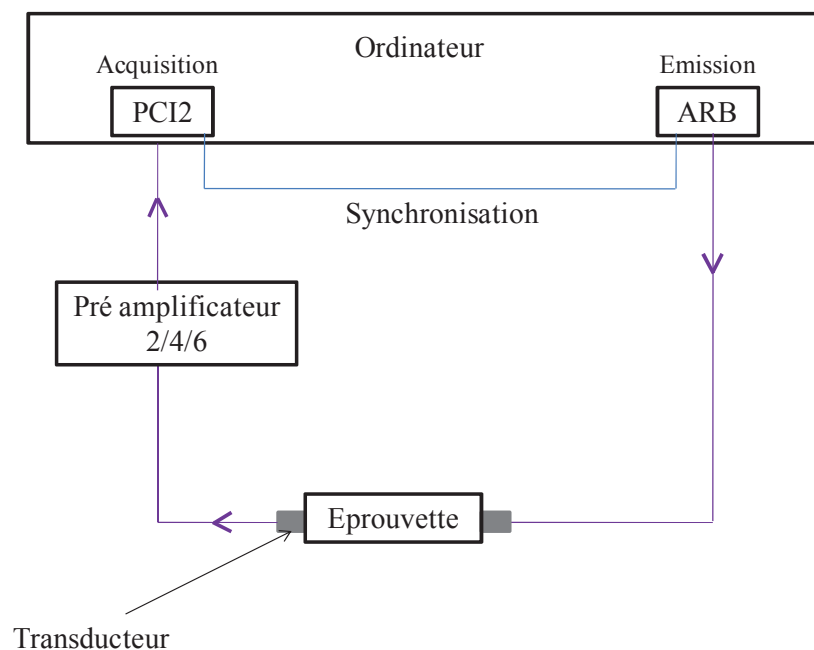


Figure II. 5 : Schéma de principe du dispositif expérimental

Pour la réalisation des essais, des bâtis ont été conçus afin de maintenir les transducteurs sur les éprouvettes pendant les manipulations. Sur la Figure II. 6, on peut voir les deux bâtis fabriqués pour chaque type de transducteurs (compression et cisaillement) afin d'assurer le

déroulement de tous les essais dans des conditions identiques. En effet, ces bâtis permettent de contrôler certains aspects de l'essai :

- L'alignement des transducteurs est réglé grâce aux supports en PVC fixés eux-mêmes sur les montants en aluminium ;
- Une pression constante des transducteurs sur les éprouvettes est assurée grâce à des ressorts de maintien ;
- Le couplant a toujours été appliqué de la même manière sur la pastille du transducteur afin que tous les essais soient réalisés dans des conditions similaires ;
- Les éprouvettes sont disposées entre les transducteurs et reposent sur une mousse qui a pour fonction d'absorber les ondes parasites extérieures.

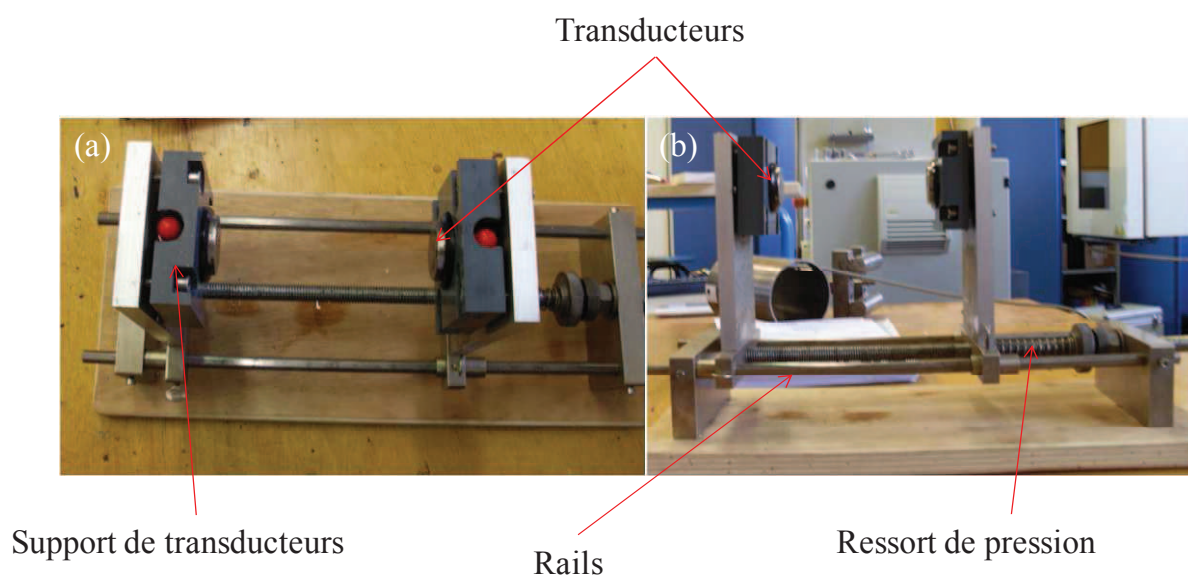


Figure II. 6 : Photographie des bâtis (a) vue de dessus (b) vue de côté

Pour les essais sur le bitume, deux moules en aluminium ont été conçus permettant dans un premier temps de couler à chaud (180°C) les éprouvettes aux dimensions souhaitées. Dans un deuxième temps, ces moules ont également servi à réaliser les essais sur le bitume. En effet, les deux côtés du moule amovibles sont remplacés par des plaques de PVC de 2 mm d'épaisseur permettant le seul passage de la pastille des transducteurs. Bien que l'utilisation de ces moules pendant les essais ait pour principal usage de maintenir le bitume en place pour

des températures d'essais élevées (supérieures à 20°C), ils ont été conservés pour les températures basses afin de garder les mêmes conditions d'essai.

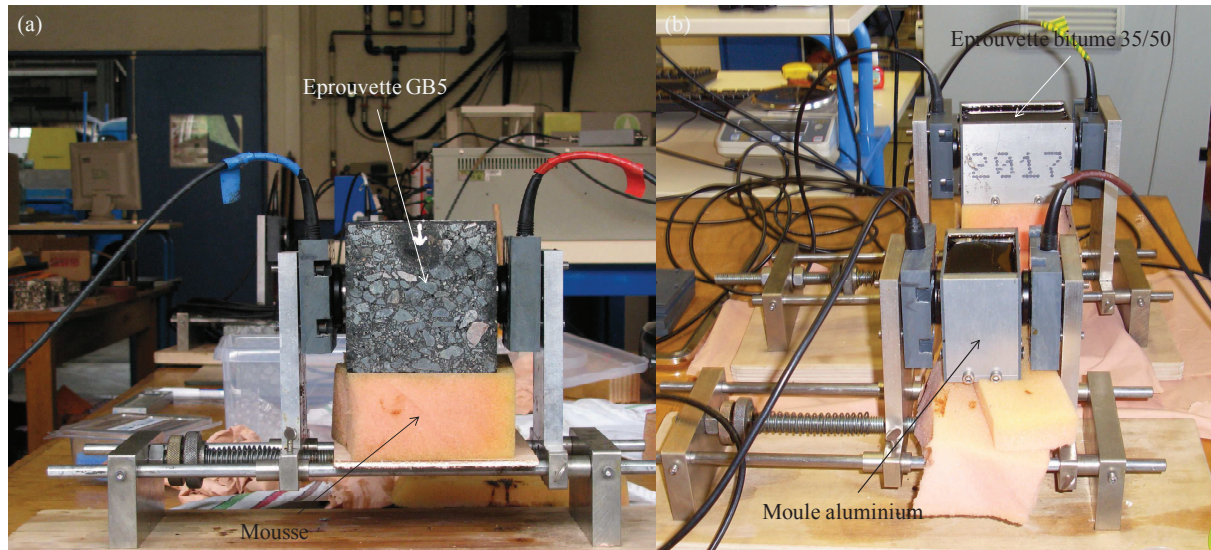


Figure II. 7 : Bâtis avec les éprouvettes (a) de GB5 (b) de bitume 35/50

III - 4 - Prélèvement des échantillons

Si la question de l'hétérogénéité n'a pas lieu pour les éprouvettes de bitume qui sont coulées en place dans leurs moules, elle se pose pour celles des enrobés. Avant la découpe des éprouvettes, des cartographies de vitesses ont été réalisées sur les deux plaques d'enrobés bitumineux GB5 et GB3 afin de mettre en évidence des zones où la vitesse de propagation des ondes est la plus homogène. La Figure II. 8 présente cette cartographie que les deux faces de la plaque pour le matériau GB5 (les résultats du matériau GB3 sont présentés en Annexe A – I). Celle-ci a été réalisée selon la direction du compactage (direction 2) avec un maillage de 2 cm.

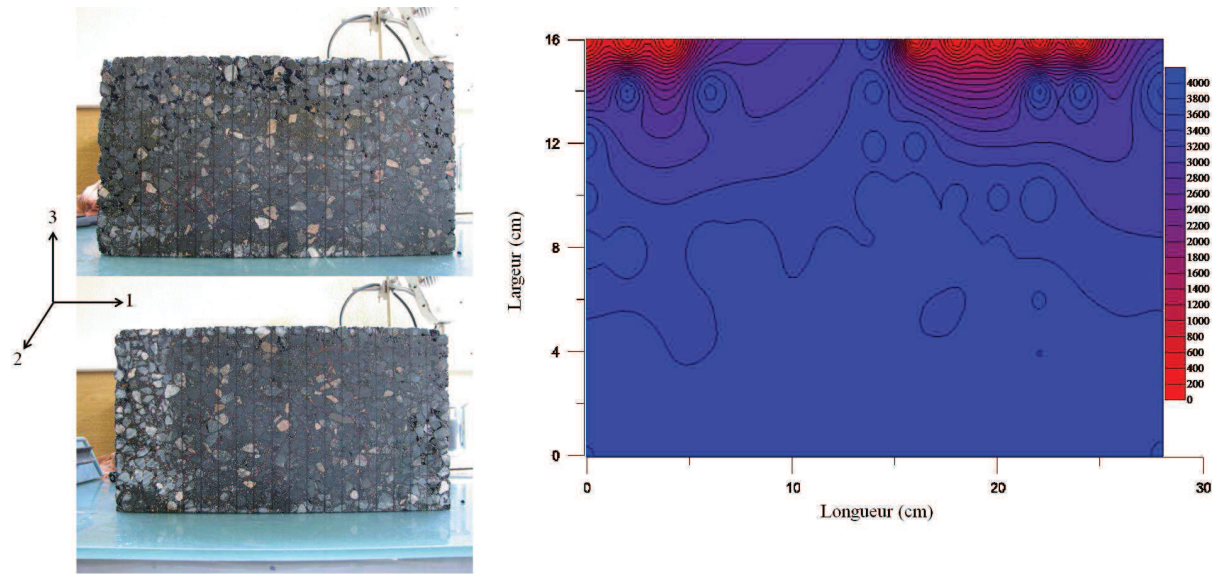


Figure II. 8 : Cartographie de vitesses de propagation de l'éprouvette GB5 suivant la direction 2

On peut constater que la partie correspondant au bord de la plaque donne des valeurs de vitesse de propagation plus faibles (voire nulles) et dispersées ce qui est certainement causé par des effets de bords pendant le compactage. L'éprouvette est donc découpée dans une zone où la répartition spatiale des vitesses est la plus homogène.

Lors de la découpe des éprouvettes une attention toute particulière a été portée à la planéité des faces et à leur parallélisme. En effet, les petites longueurs d'ondes mises en jeu lors d'essais ultrasonores impliquent que ces deux conditions soient respectées [Bourbié, 1986].

III - 5 - Dimensions des éprouvettes

Le rayonnement des transducteurs ultrasonores peut être modélisé par la surpression relative (Eq II. 28) causée par la propagation de l'onde [Chekroun, 2008].

$$\left| \frac{\delta p}{\delta p_0} \right| = 2 \left| \frac{\pi(\sqrt{x^2 + D^2} - x)}{\lambda} \right| \quad (\text{Eq II. 28})$$

Dans cette équation, δp_0 et δp représentent la surpression respectivement initiale et à une distance x du transducteur, D est le rayon de la pastille du transducteur et λ la longueur d'onde.

Cette modélisation permet d'identifier un premier paramètre à prendre en compte dans le dimensionnement des éprouvettes : le *champ de Fresnel*. Le champ de Fresnel est une zone proche du transducteur qui se trouve fortement perturbée par une alternance de maximums et minimums d'amplitude. Ce phénomène conditionne donc le choix de la dimension minimale de l'éprouvette L_1 . La fin du champ de Fresnel $L_{Fresnel}$ peut se déterminer graphiquement par le dernier maximum d'amplitude en utilisant la modélisation de la surpression de l'onde (Figure II. 9) ou avec l'équation II. 29 [Chekroun, 2008] [Hende, 2002] qui donne directement la longueur de champ de Fresnel pour les ondes de compression :

$$L_{Fresnel \text{ Onde } P} = \frac{D^2}{4\lambda} - \frac{\lambda}{4} \quad (Eq \text{ II. } 29)$$

Dans cette équation, D est le diamètre de la source (m).

A l'étude de cette formule, pour un même transducteur on peut voir que la longueur du champ de Fresnel dépend uniquement de la longueur d'onde or la longueur d'onde est dépendante de la vitesse de propagation dans le milieu et de la fréquence du signal.

Pour les ondes de cisaillement, certains auteurs dans la littérature [Chan, 2012] [Zarrabi, 2005] ont proposé de prendre une longueur de champ de Fresnel égal à 2 fois la longueur d'onde de cisaillement (Eq II. 30).

$$L_{Fresnel \text{ Onde } S} = 2\lambda \quad (Eq \text{ II. } 30)$$

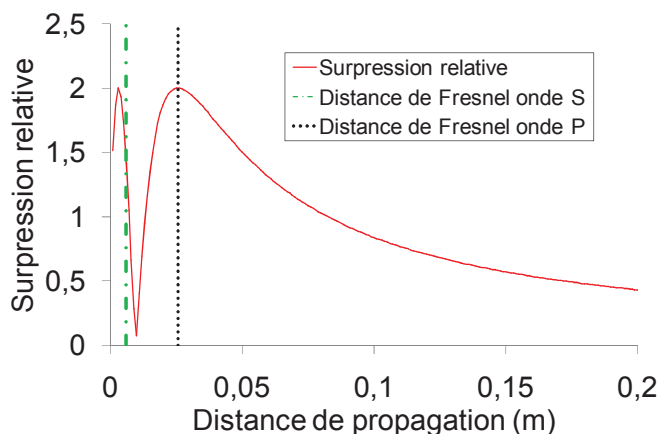


Figure II. 9 : Détermination du champ de Fresnel et du champ de Fraunhofer pour le bitume 35/50

Il est important de noter qu'une fois la distance du champ de Fresnel dépassée, on se trouve dans le champ lointain (ou encore champ de Fraunhofer) et le front d'onde devient plan. Il est alors possible de considérer la part d'atténuation due à l'étalement géométrique $\alpha_{\text{étalement géométrique}}$ de l'onde donc nulle.

Le choix de la dimension maximale de l'éprouvette dépend de plusieurs critères. Dans un premier temps, compte tenu des fortes propriétés atténuantes des matériaux, si cette dimension est trop élevée le signal peut ne pas être enregistré (hautes températures et hautes fréquences sont les cas les plus défavorables). Par ailleurs, afin de considérer un comportement macroscopique des matériaux hétérogènes, il faut prendre en compte le volume minimum d'homogénéisation pour définir la distance ΔL [Bourbié, 1986]. Dans le cadre de notre étude, cela signifie que la distance ΔL doit être supérieure à au moins deux diamètres du plus gros grain, c'est-à-dire dans le cadre des graves bitumes étudiées ici 28 mm. Les dimensions retenues pour les éprouvettes sont résumées dans le Tableau II. 1 pour les trois matériaux de l'étude.

On remarque que pour le bitume, les éprouvettes pour les ondes de cisaillement et de compression ont des dimensions différentes. Ceci s'explique par le fait que les ondes de cisaillement ne pouvaient être enregistrées au-delà de 5 cm à cause des propriétés atténuantes du matériau.

Matériau	Distance de propagation des ondes de compression	Distance de propagation des ondes de cisaillement
Bitume 35 / 50	L ₁ : 5 cm	L ₁ : 3 cm
	L ₂ : 10 cm	L ₂ : 5 cm
GB3 et GB5	L ₁ : 5 cm	L ₁ : 5 cm
	L ₂ : 10 cm	L ₂ : 10 cm

Tableau II. 1 : Dimensions des éprouvettes

Pour les essais sur le bitume, deux éprouvettes différentes ont été utilisées car le matériau est considéré comme homogène à l'échelle des longueurs d'ondes des ondes ultrasonores, on peut donc considérer ces deux éprouvettes comme jumelles. Ce n'est pas le cas pour les enrobés bitumineux qui sont des matériaux hétérogènes à l'échelle des longueurs d'onde des ondes ultrasonores dont on ne maîtrise pas la répartition des hétérogénéités. L'utilisation de deux éprouvettes différentes ne peut qu'entraîner des erreurs sur la détermination des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes notamment le facteur d'atténuation. Pour palier à cela, l'éprouvette a d'abord été découpée à la dimension L₂ (la plus grande) et les mesures ultrasonores ont été effectuées. Ensuite, la même éprouvette a été redécoupée à la dimension L₁ (la plus petite) pour effectuer la seconde mesure. Les signaux comparés ont donc traversé le même matériau sur la distance L₁ et l'onde a été perturbée de manière identique par les hétérogénéités.

III - 6 - Conditionnement des éprouvettes

Les éprouvettes sont conditionnées pendant les essais dans une enceinte thermique. Les intervalles entre les températures sont choisis inférieurs ou égaux à 10°C comme stipulé dans la norme de l'essai de module complexe [NF EN 12697]. Les temps de stabilisation en température sont donc préalablement estimés pour un écart de température de 10°C en prenant en compte les coefficients de conductivité thermique λ_{th} et les chaleurs massiques C de chaque matériau. Le calcul a été réalisé sur les éprouvettes aux dimensions les plus défavorables.

Dans le cas du bitume (hauteur : 0,07 m ; largeur : 0,07 m ; longueur : 0,1 m), $\lambda_{th\text{bitume}} = 0,17$ W/mK et $C_{\text{bitume}} = 2000$ J/kgK (valeurs définies à 20°C), on trouve que le régime établi

est atteint entre 4 et 5 heures. Dans ce calcul, le fait que cinq faces de l'éprouvette soient en contact avec le moule aluminium a été négligé. En effet, l'aluminium étant très conducteur, la face en contact avec l'éprouvette en bitume est très rapidement à la température ambiante.

Pour les éprouvettes en enrobés (cube de 0,1 m de côté), le temps de stabilisation en température a été évalué à environ 3 heures en prenant $\lambda_{th_{enrobé}} = 1,5 \text{ W/mK}$ et $C_{bitume} = 1000 \text{ J/kgK}$ (valeurs définies à 20°C). Ces trois heures sont en accord avec la norme du module complexe.

Afin de s'assurer de bonne stabilisation en température des éprouvettes, il a été choisi de prendre une durée de stabilisation de 6 heures.

De plus, pendant les manipulations, une éprouvette témoin aux dimensions similaires est placée dans l'enceinte avec une sonde PT100 placée son cœur. Cette éprouvette permet de confirmer la stabilisation en température de l'éprouvette. La partie extérieure de la sonde est entourée par un isolant thermique et l'orifice est bouché par du silicone.

Un suivi de stabilisation a également été réalisé. Des signaux acoustiques ont été propagés à intervalle de temps réguliers et la stabilisation de l'onde en amplitude a été étudiée. Ainsi, il a été montré qu'au bout de 4 heures, la variation de l'amplitude maximale de l'onde reçue varie de moins de 1% (Figure II. 10).

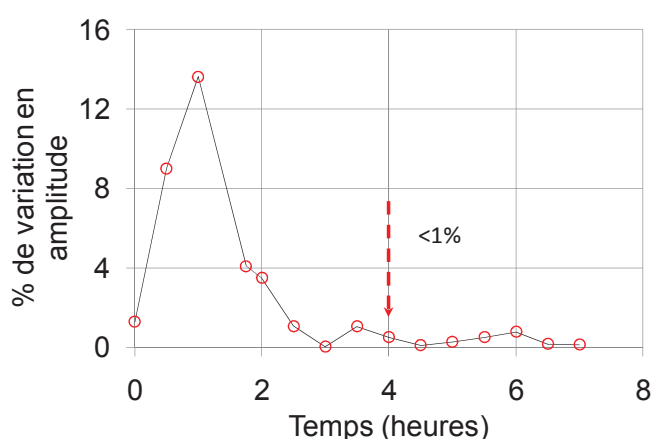


Figure II. 10 : Exemple de suivi de stabilisation pour le bitume 35/50 pour une augmentation de température de 10°C

IV - Acquisition et traitement des signaux

IV - 1 - Acquisition des signaux

L'acquisition des signaux doit se faire selon une fréquence d'échantillonnage permettant de reconstituer le plus fidèlement le signal. En effet, si la fréquence d'échantillonnage choisie est trop faible on assiste au phénomène de repliement c'est-à-dire que la fréquence du signal enregistré est inférieure à la fréquence réelle du signal. De plus, bien que le critère de Nyquist – Shannon permette de rendre compte de la fréquence du signal, celui-ci n'est pas suffisant. Dans le cas où l'on cherche à effectuer des mesures précises en utilisant des données échantillonnées, la fréquence d'échantillonnage doit être suffisamment élevée c'est-à-dire de l'ordre de 5 à 10 fois la composante fréquentielle la plus élevée du signal.

Lors de l'essai ultrasonore, les signaux sont échantillonnés à une fréquence de 10 MHz ce qui correspond à une résolution temporelle de 100 ns ($T_{\text{échantillonnage}} = 1/f_{\text{échantillonnage}}$).

IV - 2 - Déphasage des signaux dû à la chaîne de mesures

Dans le cadre d'essais ultrasonores sur des matériaux bitumineux, un déphasage entre les signaux reçus aux différentes distances de propagation dû au caractère visqueux de ceux-ci est prévisible. Cependant afin de pouvoir attribuer ce déphasage uniquement aux propriétés mécaniques des matériaux, il est important de s'assurer que le système d'acquisition ne crée pas de déphasage électronique. Pour cela, un essai a été réalisé sur de l'acier qui est un matériau élastique suivant deux distances de propagation différentes. La Figure II. 11 (a) montre que les spectres de fréquence des signaux sont identiques et que la différence de phase entre les signaux reçus aux différentes distances de propagation (Figure II. 11 (b)) est constante en fonction de la fréquence. Il n'y a donc pas de déphasage supplémentaire apporté par la chaîne d'acquisition.

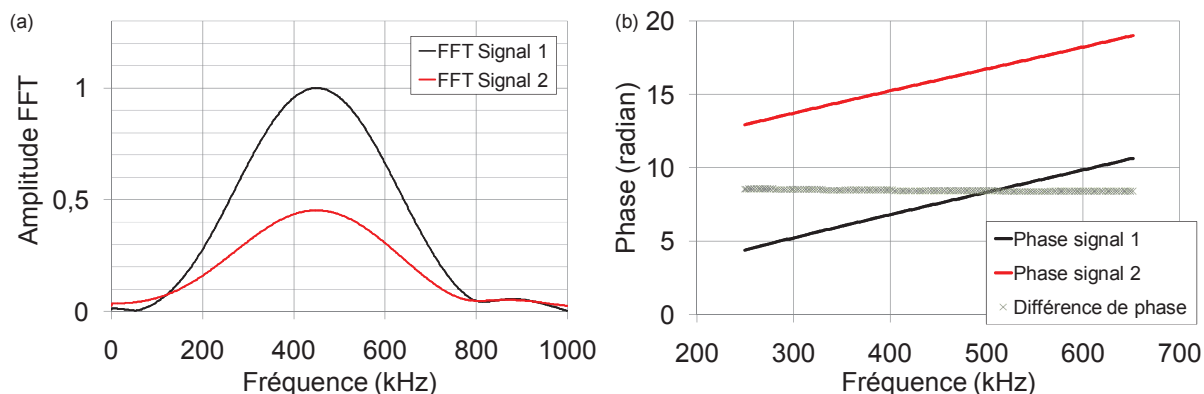


Figure II. 11 : (a) FFT et (b) phase et différence de phase des signaux ayant traversé deux distances différentes d'acier

IV - 3 - Type d'excitation des transducteurs

Le logiciel de génération des signaux offre un large choix concernant l'émission des signaux. La forme du signal choisi est un sinus. Ce choix a été adopté car il se rapproche de la sollicitation utilisée pour les essais mécaniques de module complexe bien que les transducteurs n'étant pas collés à l'éprouvette ne puissent pas transmettre de la traction à celle-ci.

Lors des essais, les fréquences d'excitation des transducteurs ont varié de 300 kHz à 700 kHz avec un pas de 100 kHz afin de couvrir la bande passante des transducteurs (paragraphe III – 2). Il n'a pas été possible d'utiliser la même tension du signal pour toute la gamme de températures couverte en raison de la forte augmentation de l'atténuation des matériaux en fonction de la température. Des essais préalables ont montré que les grandeurs caractéristiques de propagation d'onde (vitesse et facteur d'atténuation) ne différaient pas en fonction de la forme et de la tension du signal.

IV - 4 - Répétabilité des mesures

Les essais ultrasonores reposent sur la génération de dix signaux (sinus) à intervalle de temps réguliers. Les valeurs des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes prises en compte dans les calculs sont la moyenne des grandeurs caractéristiques de propagation déterminées pour chacun des dix signaux. Afin que ces valeurs soient représentatives, la répétabilité des signaux a été étudiée. Cette étude de répétabilité a été réalisée pour une seule configuration de

montage. Ainsi, la Figure II. 12 (a) représente la superposition de dix signaux enregistrés dans des conditions identiques. La Figure II. 12 (b) montre quant à elle, le rapport des écarts types des amplitudes des dix signaux sur l'amplitude moyenne de ceux-ci.

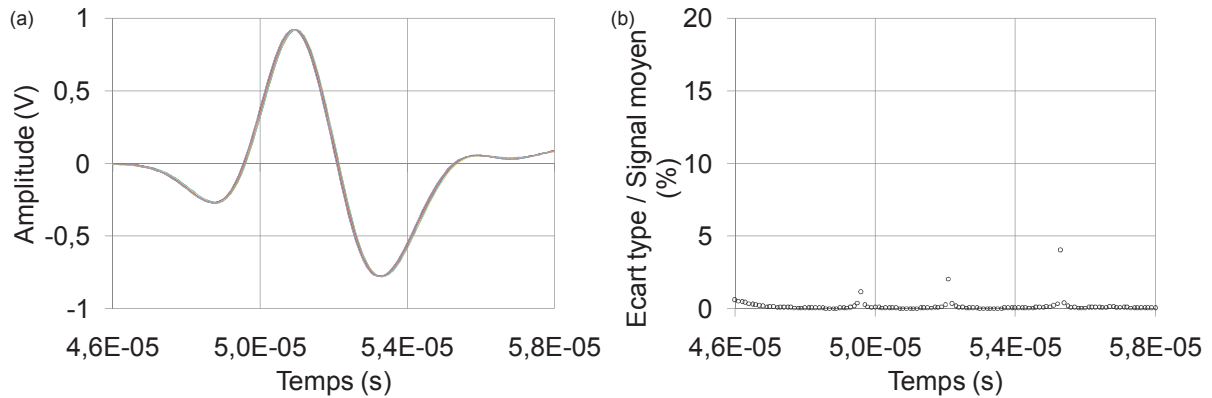


Figure II. 12 : (a) Superposition de dix signaux enregistrés à une distance de 10 cm (b) Rapport de l'écart type des dix signaux sur le signal moyen pour le matériau GB3 à la température de 10°C

La différence entre les signaux est inférieure à 1% hormis pour trois points singuliers ayant des différences plus importantes allant jusqu'à 4% qui correspondent au passage du signal par zéro.

IV - 5 - Détermination de la vitesse de propagation

La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore peut être déterminée dans deux domaines distincts. En effet, on peut travailler dans le domaine temporel ou le domaine fréquentiel.

Dans le domaine temporel, la vitesse déterminée sera la vitesse du paquet d'onde appelée vitesse de groupe V_g . Plusieurs méthodes (Figure II. 13) sont disponibles pour obtenir cette vitesse :

- Une estimation de la vitesse de groupe peut être obtenue en utilisant les temps d'arrivée des amplitudes maximales (négatives ou positives) des signaux [Molyneux, 2000] ;

- La méthode de l'enveloppe du signal obtenue par une transformée de Hilbert [Taner, 1979] ;
- La méthode du premier décrochement de zéro est également utilisable mais son utilisation dans les milieux dispersifs n'est pas aisée et peut être une source d'erreur car sa détermination peut être perturbée par le bruit contenu dans le signal. [Le Huérou, 2003].

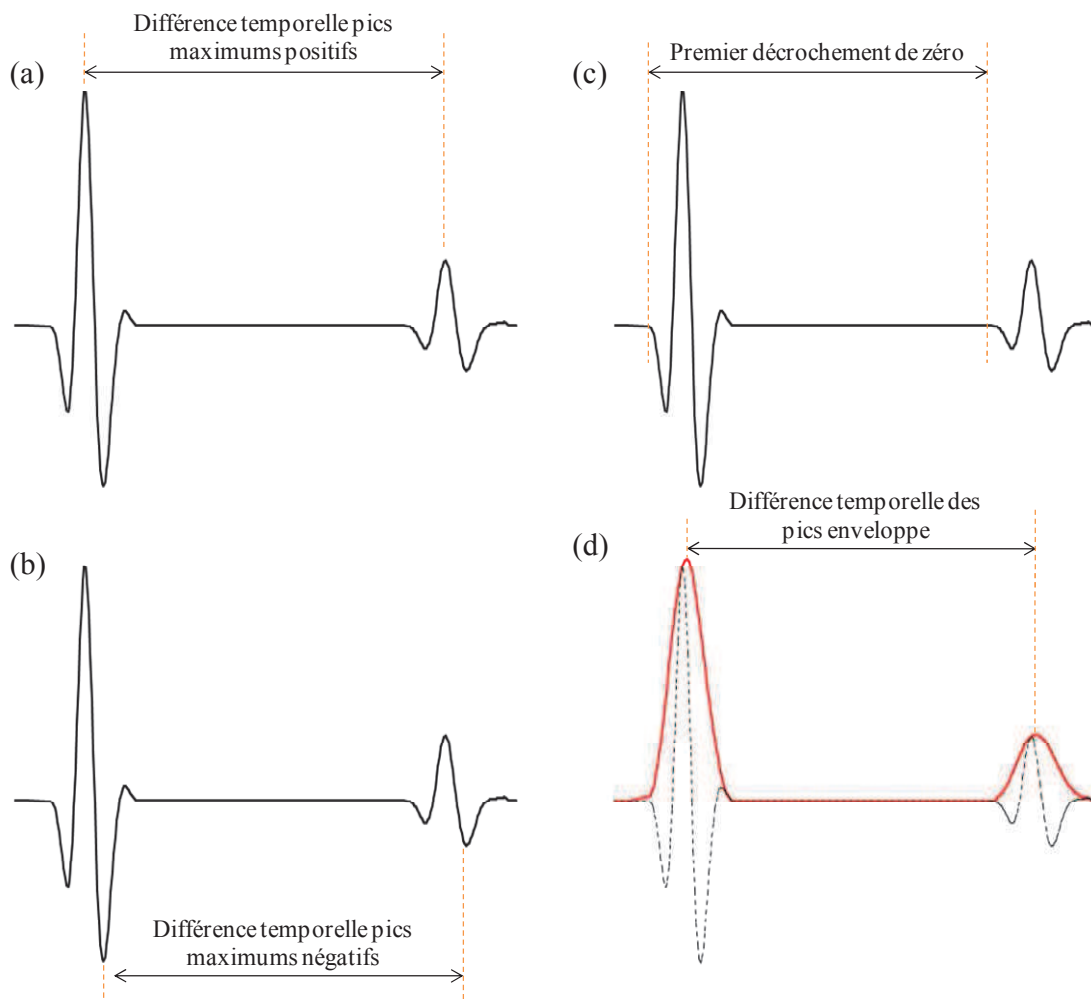


Figure II. 13 : Méthodes de détermination des vitesses dans le domaine temporel : (a) différence temporelle pics maximums positifs (b) négatifs (c) premier décrochement de zéro (d) pics enveloppe

Dans le domaine fréquentiel, la vitesse déterminée est la vitesse de phase V_ϕ (Eq II. 31). Elle est dépendante de la fréquence ce qui est pertinent dans le cas d'un milieu dispersif. Cette vitesse de phase [Winkler, 1982] [Peters, 2003] [Molyneux, 2000] est donnée par la formule suivante :

$$V_\phi = \frac{2\pi f \Delta L}{\Delta\phi} \quad (\text{Eq II. 31})$$

Dans cette équation, V_ϕ est la vitesse de phase, f est la fréquence, ΔL est la distance de propagation des signaux et $\Delta\phi$ est le déphasage entre les deux signaux (Figure II. 14). Ici le déphasage (appelé aussi distorsion de phase) implique un retard du signal reçu par rapport au signal source. Ce retard est causé par le temps de propagation de l'onde à travers le matériau. On constate que pour un matériau viscoélastique le déphasage entre les deux signaux n'est pas constant en fonction de la fréquence.

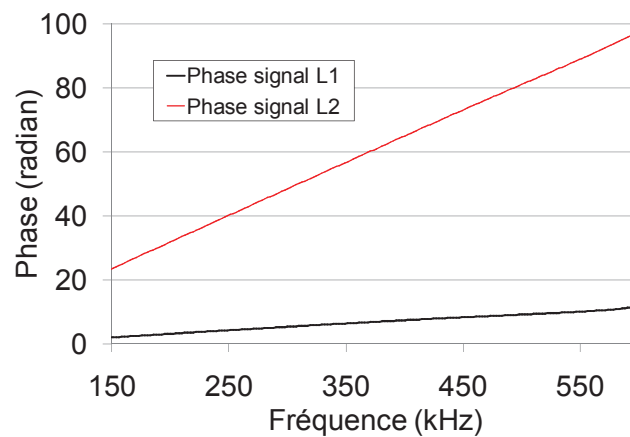


Figure II. 14 : Phase de deux signaux différents

IV - 6 - Quantification du facteur d'atténuation

Expérimentalement, le facteur d'atténuation α des ondes ultrasonores peut aussi être déterminé dans les domaines temporel et fréquentiel et dépendra du logarithme népérien [Yusoff, 2011] du rapport du signal émis sur le signal reçu rapporté à la distance de propagation de l'onde (Eq II. 32). Ce facteur d'atténuation est exprimé en Np/m.

$$\alpha = \frac{1}{\Delta L} \ln \frac{S_{émis}}{S_{reçu}} \quad (Eq II. 32)$$

Dans cette équation, ΔL est la distance entre les deux signaux analysés, $S_{émis}$ et $S_{reçu}$ sont les valeurs prises (en fonction de la méthode) pour le signal émis et le signal reçu. Le logarithme décimal peut également être utilisé [Peters, 2003] dans ce cas son unité sera en dB/m ($1Np/m \approx 8,68dB/m$).

L'atténuation peut se calculer dans le domaine temporel (Figure II. 15) en utilisant :

- Les amplitudes maximales (positives, négatives ou la différence des deux) [Jiang, 2008] des signaux ;
- Les amplitudes maximales de l'enveloppe des signaux.

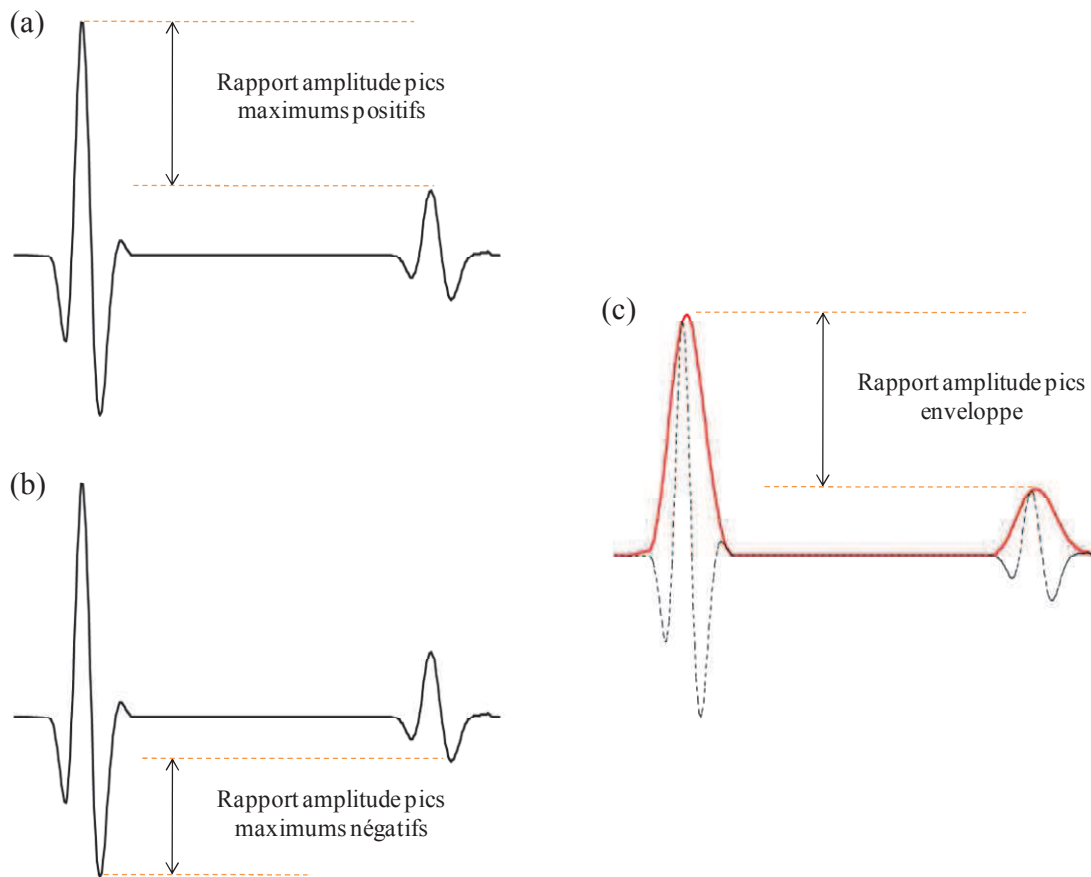


Figure II. 15 : Méthodes de calcul de l'atténuation dans le domaine temporel : amplitudes maximales des signaux (a) pics positifs (b) pics négatifs (c) pic de l'enveloppe

Le calcul de l'atténuation dans le domaine fréquentiel est lié à l'utilisation d'une transformée de Fourier. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées (Figure II. 16) :

- Les amplitudes maximales des transformées de Fourier, cependant dans notre type de matériaux les amplitudes maximales n'interviennent pas pour des fréquences identiques du fait du filtrage préférentiel des hautes fréquences [In, 2009];
- Les densités spectrales des transformées de Fourier. Cette méthode considère toutefois l'aire entière de la transformée de Fourier et fait donc intervenir des fréquences non définies dans la bande passante du transducteur ;
- Les amplitudes des transformées de Fourier pour une fréquence donnée, ce qui apporte l'avantage de pouvoir attribuer une fréquence au paramètre calculé.

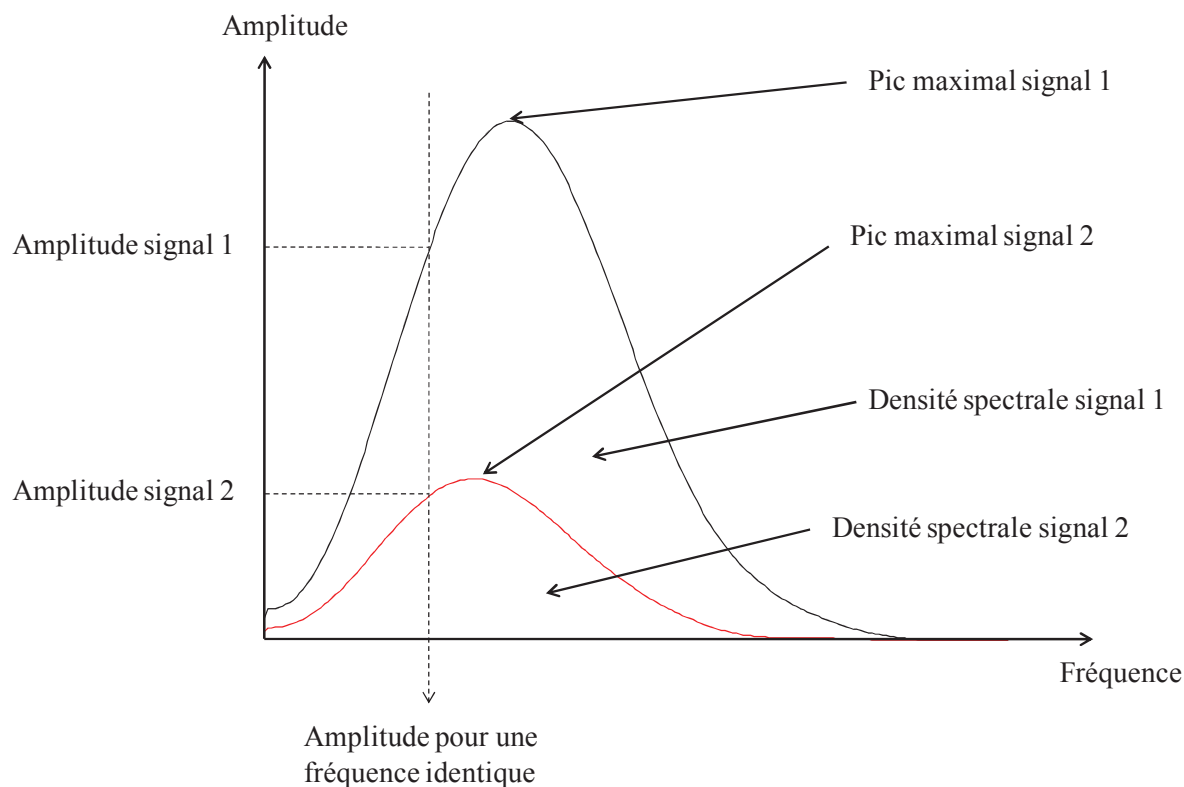


Figure II. 16 : Méthodes de détermination de l'atténuation dans le domaine fréquentiel

IV - 7 - Etude du contenu spectral des signaux

L'analyse dans le domaine fréquentiel passe par l'utilisation de la transformée de Fourier qui est un analogue de la théorie des séries de Fourier pour les fonctions non périodiques et qui permet de leur associer un spectre en fréquences.

Différentes transformées de Fourier existent, dans cette étude nous utiliserons la « Fast Fourier Transform » plus connue sous le nom de FFT (Transformée de Fourier Rapide en français). La FFT permet d'exprimer chaque signal comme une somme d'ondes sinusoïdales avec leurs amplitudes et leurs phases appropriées. C'est l'algorithme le plus rapide et le plus utilisé pour obtenir des spectres d'amplitude de signaux discrets. Elle permet d'étudier des fonctions dans le domaine fréquentiel à partir de fonctions du domaine temporel et est donc couramment utilisée en traitement du signal. Par contre, elle ne se montre performante que pour le cas de signaux périodiques et relativement réguliers. Il faut cependant noter que la FFT atteint sa performance maximale si le nombre d'échantillons N du signal d'entrée est une puissance de 2 c'est-à-dire $N=2^P$ avec $P = 1,2,3,\dots$. Si ce n'est pas le cas alors le signal doit

être complété avec des zéros jusqu'à ce que le nombre d'échantillons remplisse cette condition. Cette condition a été implémentée dans le logiciel de traitement de signal développé dans cette étude.

La plage de fréquence traitée dans une FFT est celle définie dans la bande passante effective (Figure II. 17) [Broch, 1990] notée B_{eff} . Cette bande passante, également appelée bande passante à -6 dB, correspond à une diminution de l'amplitude maximale de la transformée de Fourier de moitié.

La Figure II. 17 (a) montre la détermination de la bande passante effective pour une onde de compression lors d'un essai sur le bitume 35/50 à -10°C . La Figure II. 17 (b) montre dans un premier temps que pour une excitation de transducteur identique (500kHz), l'onde de cisaillement est plus basse fréquence et que la bande passante effective s'étend d'environ 150 kHz à 470 kHz alors que l'onde de compression est beaucoup plus haute fréquence avec une bande passante effective allant de 195 kHz à 595 kHz. Ceci montre un effet du matériau sur la fréquence des signaux par rapport au type d'onde.

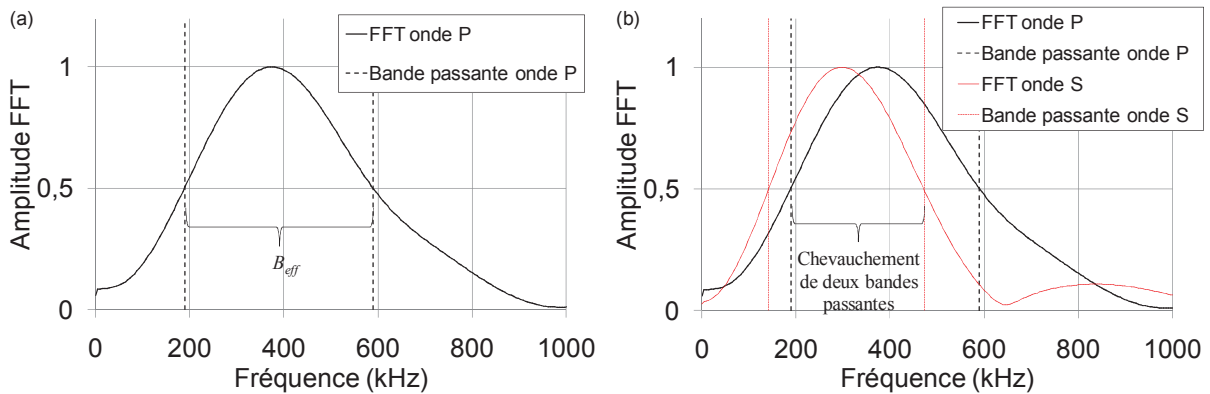


Figure II. 17 : (a) Détermination de la bande passante sur une transformée de Fourier (b) Chevauchement des bandes passantes des ondes de compression et de cisaillement pour le bitume 35/50 à -10°C

Par ailleurs, on peut voir que les bandes passantes ne sont pas identiques mais se chevauchent sur une centaine de kiloHertz ce qui permet de déterminer les paramètres de propagation des deux types d'ondes pour une plage fréquentielle identique.

De plus, la Figure II. 18 montre la nécessité de la détermination de la fréquence des signaux. En effet, on voit que sur la gamme des fréquences ultrasonores qui s'étend de 20 kHz à 600 kHz le module de cisaillement du bitume varie de 16%.

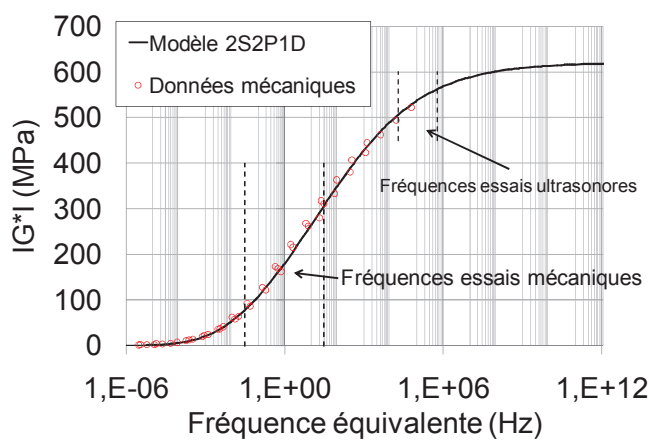


Figure II. 18 : Domaine fréquentiel des essais mécaniques et ultrasonores

Dans notre essai, deux éprouvettes de dimensions différentes sont utilisées. L'étude bibliographique [In, 2009] [Van Velsor, 2011] a révélé que l'utilisation d'un tel protocole entraînait une diminution du pic fréquentiel traduisant la thermosensibilité et l'hétérogénéité (dans le cas des enrobés) des matériaux de l'étude ce qui peut être vérifié sur la Figure II. 19. Il est alors possible de déterminer la bande passante de chaque signal enregistré et de représenter le chevauchement des bandes passantes afin de définir la plage fréquentielle d'étude. Afin d'attribuer une fréquence nominale à cette plage fréquentielle, il est possible d'utiliser un interspectre (« cross spectrum » en anglais). Cet interspectre, au même titre qu'une FFT va déterminer la fréquence mais non plus d'un seul signal mais d'un couple de signaux et déterminera une interaction fréquentielle entre les deux signaux de même type. Prenons deux signaux S_1 et S_2 ayant respectivement pour transformée de Fourier FFT_{S_1} et FFT_{S_2} alors l'interspectre FFT_{S_1, S_2} est obtenu avec l'équation II. 33 :

$$FFT_{S_1 S_2} = FFT_{S_1} \cdot FFT_{S_2}^* \quad (Eq II. 33)$$

Avec FFT_{S_1} la transformée de Fourier du signal S_1 et $FFT_{S_2}^*$ la transformée de Fourier conjuguée du signal S_2 .

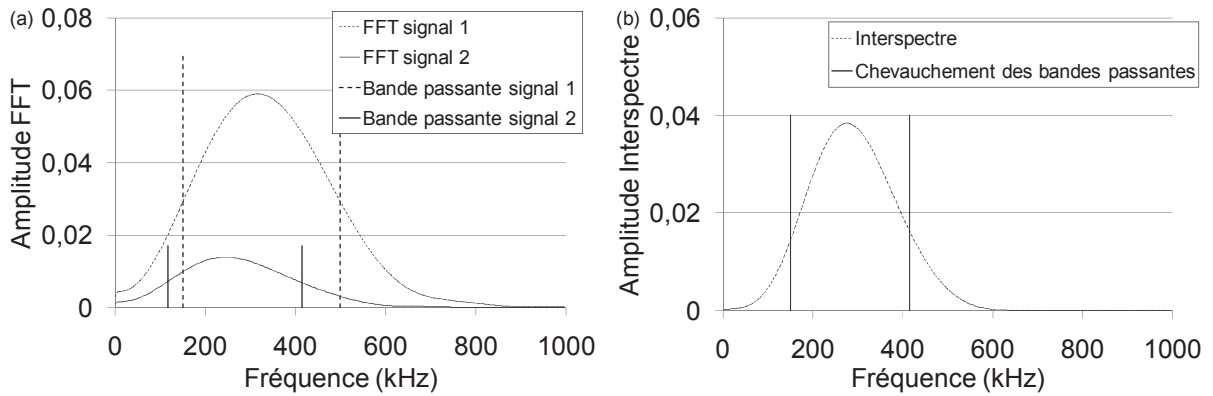


Figure II. 19 : (a) Chevauchement des bandes passantes des FFT de signaux enregistrés à deux distances différentes (b) Interspectre des signaux

V - Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord abordé la théorie de la propagation des ondes en faisant l'hypothèse d'un matériau élastique ou viscoélastique. L'hypothèse viscoélastique amène à considérer en plus de la vitesse de propagation des ondes, leur facteur d'atténuation qui prend en compte le caractère dissipatif des matériaux. Cette hypothèse permet comme l'hypothèse élastique d'exprimer les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes et les caractéristiques mécaniques des matériaux. Cette hypothèse se différencie néanmoins en permettant l'expression des parties réelles et imaginaires ainsi que l'angle de phase avec les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes.

Les matériaux de l'étude ayant des propriétés atténuantes et dispersives, celles-ci ont été prises en compte dans l'élaboration de l'essai ultrasonore. En effet, ces propriétés ont joué un rôle important dans le choix du mode de transmission, des transducteurs ainsi que pour les dimensions de l'éprouvette. De plus, une modélisation de la surpression créée par la propagation de l'onde a permis de s'affranchir du champ de Fresnel qui est une zone de perturbation à proximité du transducteur ainsi le front d'onde devient plan et la part d'atténuation causé par l'étalement géométrique de l'onde peut être négligée.

Les différentes méthodes de détermination des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes (vitesse et atténuation) ont été présentées en fonction du domaine d'étude (temporel ou fréquentiel). L'analyse des signaux dans le domaine fréquentiel nécessite l'utilisation d'une transformée de Fourier, dans cette étude la transformée de Fourier rapide (FFT) est utilisée. L'utilisation de la FFT permet de définir une bande passante effective de fréquences des signaux enregistrés qui est dépendante du type d'ondes propagées pour des conditions expérimentales similaires (même matériau, température, fréquence d'excitation). Par ailleurs, le chevauchement des bandes passantes pour les deux types d'ondes de l'étude (compression et cisaillement) est possible. Les paramètres de propagation peuvent donc être déterminés sur une même plage fréquentielle ce qui est nécessaire à l'application de l'hypothèse de propagation d'une onde ultrasonore dans un milieu viscoélastique. De plus, on a vu que la gamme des fréquences ultrasonores allait de 20 kHz à 600 kHz d'où la nécessité de situer la plage fréquentielle d'étude avec précision.

Chapitre III :

Présentation, caractérisation et modélisation du comportement mécanique des matériaux de l'étude

I - Introduction

Dans ce chapitre, nous commençons par une présentation des matériaux de l'étude en insistant sur les particularités des enrobés bitumineux développés par EIFFAGE Travaux Publics et qui font l'objet d'un groupe de travail RILEM du Technical Comitte SIB (Testing and characterization of sustainable innovative bituminous materials and systems) TG3 (Tridimensionnal characterization) portant sur la caractérisation en trois dimensions. Les essais de modules complexes permettant de rendre compte de leur comportement viscoélastique sont abordés et les représentations des résultats présentées.

Le comportement mécanique des matériaux bitumineux peut également être représenté dans des plans complexes rendant compte du caractère visqueux de ceux-ci. La modélisation de ce comportement est réalisée par le biais des modèles rhéologiques qui permettent sa prédiction sur une large gamme de fréquences et de températures. Un paragraphe est également consacré à la prédiction du comportement mécanique des enrobés bitumineux à partir de celui du bitume qui les compose.

Pour finir, une méthode de prédiction des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes est développée. Elle repose sur la théorie de propagation des ondes dans un milieu viscoélastique isotrope ainsi que sur la modélisation du comportement des matériaux bitumineux avec le modèle rhéologique 2S2P1D. Cette démarche permet la représentation en termes d'isothermes et d'isochrones de la vitesse de propagation et du facteur d'atténuation visqueux sur la gamme des fréquences ultrasonores.

II - Matériaux de l'étude

Dans cette étude, nous nous intéressons à deux types de matériaux bitumineux : un bitume qui est un matériau considéré comme homogène à l'échelle des longueurs d'onde ultrasonores et deux graves bitumes qui sont des matériaux hétérogènes.

Le bitume étudié est un bitume pur de classe 35/50 réalisé par l'entreprise BP en provenance de la raffinerie de Lavéra dans les Bouches du Rhône. Sa masse volumique est de 1030 kg/m^3 . Pour ce type de bitume, le point de ramollissement bille – anneau et le point de fragilité FRAASS se situent respectivement aux environs de 50°C et -15°C .

Les graves bitumes GB3 et GB5 ont été développées par Eiffage Travaux Publics et sont composées du bitume 35/50 présenté auparavant. Elles font l'objet d'une étude sur les caractéristiques des agrégats qui représentent 90 à 95% de la masse des enrobés. Ces caractéristiques sont influencées principalement par cinq paramètres [Caquot, 1937] [Baron, 1982] [De Larrard, 1988] [De Larrard, 1994] [De Larrard, 2002] [Corté, 2004]:

- la courbe granulométrique (continue, discontinue) ;
- la forme des grains (cubique, ronde, allongée) ;
- la micro texture de surface des grains (lisse, rugueuse) ;
- le type et la force de compactage ;
- l'épaisseur de la couche.

L'étude réalisée par Eiffage Travaux Publics sur ces matériaux porte sur la courbe granulométrique et notamment sur l'optimisation de la combinaison des fines avec les granulats plus grossiers. Cette optimisation permet d'obtenir un réseau d'interactions entre les granulats et d'augmenter ainsi le module complexe de l'enrobé [Olard, 2012] afin de répondre à la norme Européenne sur les Enrobés à Module Elevé 2 (EME2) en particulier le module complexe égal à 14000 MPa à 15°C .

Les fractions granulaires sont présentées dans la Figure III. 1 (a). On peut voir que le diamètre du plus gros granulat est de 14 mm pour les deux graves bitumes. La GB5 a la particularité d'avoir une courbe granulométrique discontinue. En effet, on peut remarquer qu'il y a très peu de passant entre 4 mm et 10 mm (Figure III. 1 (b)).

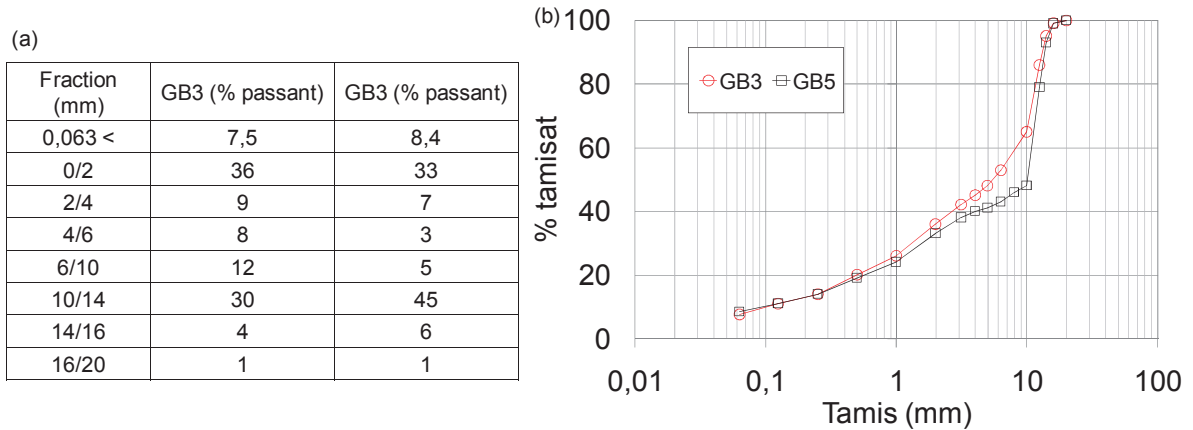


Figure III. 1 : (a) Fraction granulaires (b) Courbe granulométrique des matériaux GB3 et GB5

La teneur en bitume, identique pour les deux graves bitume, est de 4,45% de la masse. Leur densité est de 2650 kg/m^3 . Les différences sur les caractéristiques physiques et / ou mécaniques reposent donc uniquement sur les différences granulométriques.

III - Essais de modules complexes

Comme présenté au premier chapitre, les matériaux bitumineux ont un comportement mécanique viscoélastique. Les essais de module complexe permettent donc leur caractérisation mécanique en tenant compte de l'effet de la température et de la fréquence.

III - 1 - Dynamic Shear Rheometer (DSR)

Le module complexe du bitume IG*1 a été déterminé avec l'essai DSR (Dynamic Shear Rheometer) présenté sur la Figure III. 2. Cet essai a été réalisé par l'entreprise EIFFAGE Travaux Publics située à Corbas (Rhône). Les plages de températures et de fréquences étudiées sont respectivement de -30°C à 70°C et de 0,03 à 30 Hz.

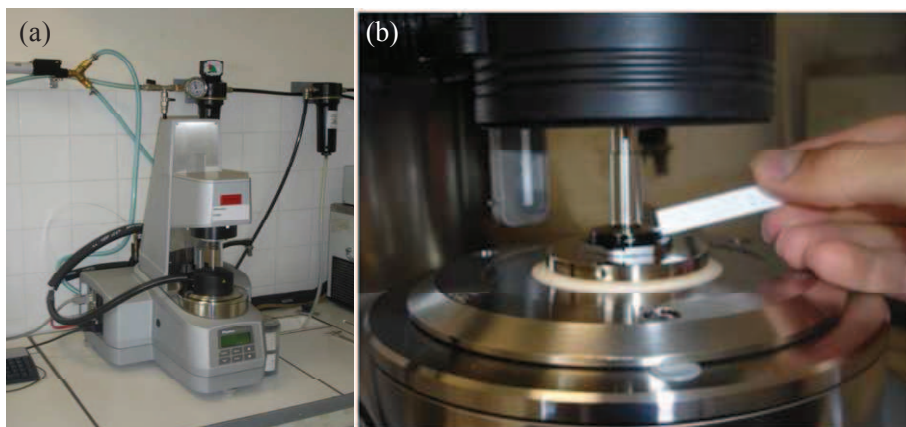


Figure III. 2 : (a) Vue d'ensemble de l'appareil DSR (b) Zoom de l'essai DSR

Les résultats obtenus sont alors représentés sous forme de courbes isothermes (Figure III. 3 (a)) et isochrones (Figure III. 3 (b)). Les données numériques de cet essai sont présentées dans l'Annexe A – II.

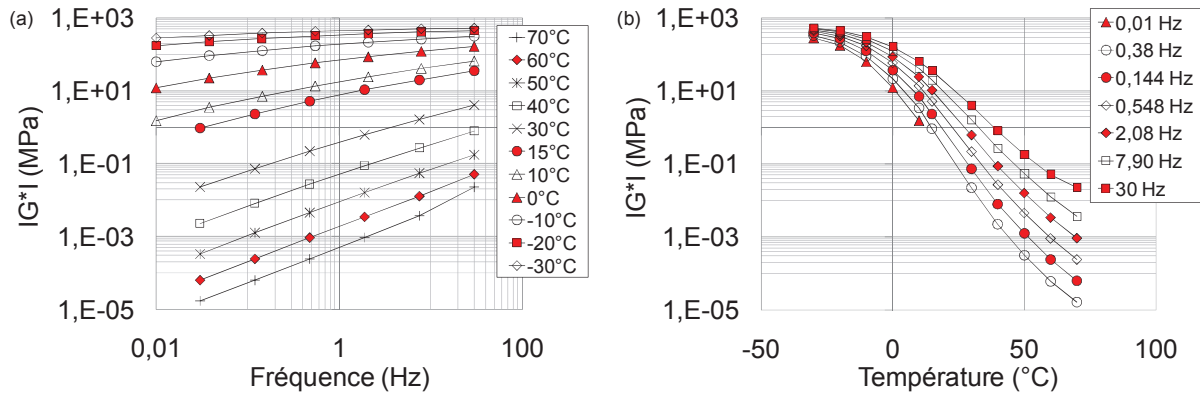


Figure III. 3 : (a) Courbes isothermes du bitume 35/50 (b) Courbes isochrones du bitume 35/50

Les courbes isothermes montrent la susceptibilité cinétique du matériau. En effet, on constate une augmentation du module avec l'augmentation de la fréquence pour une température d'essai. Les courbes isochrones, quant à elles, permettent de montrer la susceptibilité thermique du matériau. On remarque qu'avec l'augmentation de la température, le module du matériau diminue.

III - 2 - Essai de traction / compression

Les essais de module complexe sur les graves bitumes ont été réalisés par l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE) à Vaulx – en – Velin (Rhône) sur des éprouvettes cylindriques soumises à des cycles sinusoïdaux de « traction / compression » (Figure III. 4). Cet essai est classé comme homogène [Di Benedetto, 2004]. En effet, l'état de contrainte est le même dans l'ensemble de l'éprouvette à un instant donné. Durant cet essai, l'éprouvette est sollicitée selon la direction 1 pour laquelle le module complexe doit être déterminé. La déformation axiale (direction 1) et les déformations radiales (direction 2 et 3) sont également mesurées pendant l'essai permettant ainsi la détermination du coefficient de Poisson complexe ν^* .

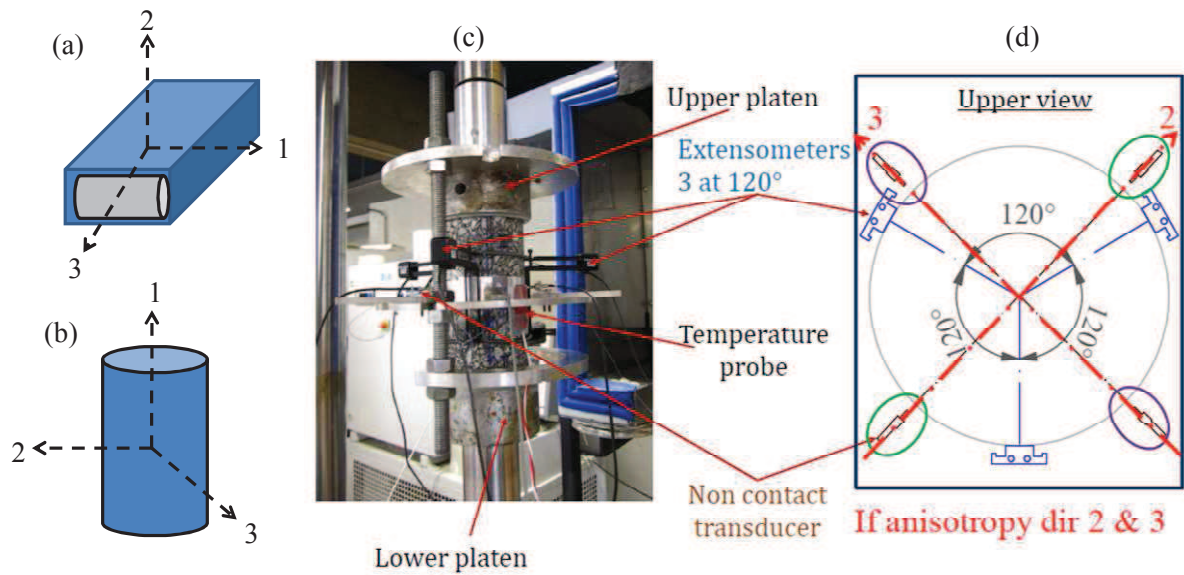


Figure III. 4 : Représentations des directions sur l'éprouvette (a) avant carottage (b) après carottage (c) Dispositif d'essai de module complexe traction/compression de l'ENTPE (d) Principe de détermination des déformations

L'essai est réalisé pour des températures allant d'environ -25°C à 40°C et des fréquences variant de $0,03\text{ Hz}$ à 10 Hz . Les résultats numériques de ces essais sont donnés dans l'annexe A – III et A – IV respectivement pour les matériaux GB3 et GB5. La Figure III. 5 et la Figure III. 6 montrent respectivement une comparaison des courbes isothermes et isochrones de module complexe IE^*I des graves bitumes GB3 et GB5.

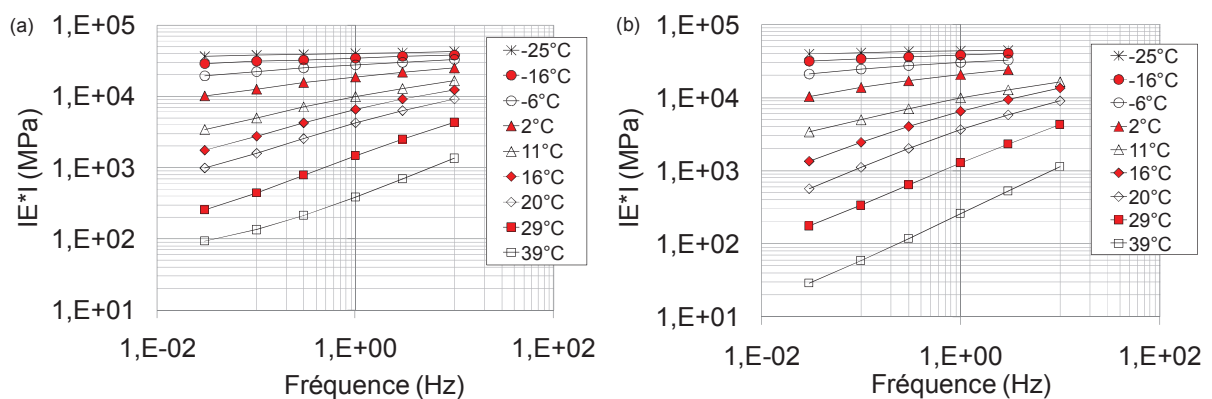


Figure III. 5 : Courbes isothermes (a) GB3 et (b) GB5

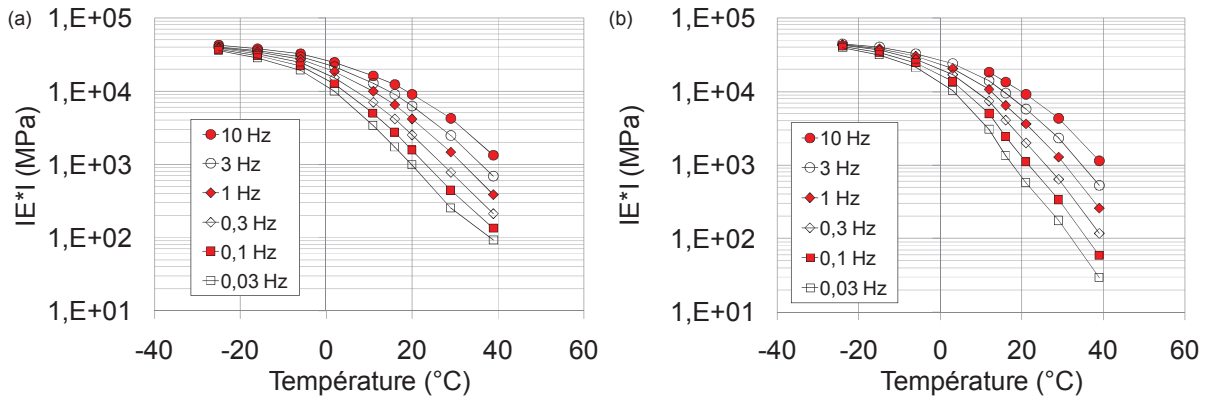


Figure III. 6 : Courbes isochrones (a) GB3 et (b) GB5

La Figure III. 5 et la Figure III. 6 montrent que le module complexe de la GB5 est plus élevé que celui de la GB3 à basse température et haute fréquence. Par contre, on remarque que pour les hautes températures et basses fréquences cette fois-ci, le module de la GB5 est inférieur à celui de la GB3. On constate également que le coefficient de Poisson de la GB5 est supérieur à celui de la GB3 (Figure III. 7 et Figure III. 8) pour une gamme de fréquence / température identique. De plus, les coefficients de Poisson de la GB5 dépassent 0,5 avec l'augmentation de la température.

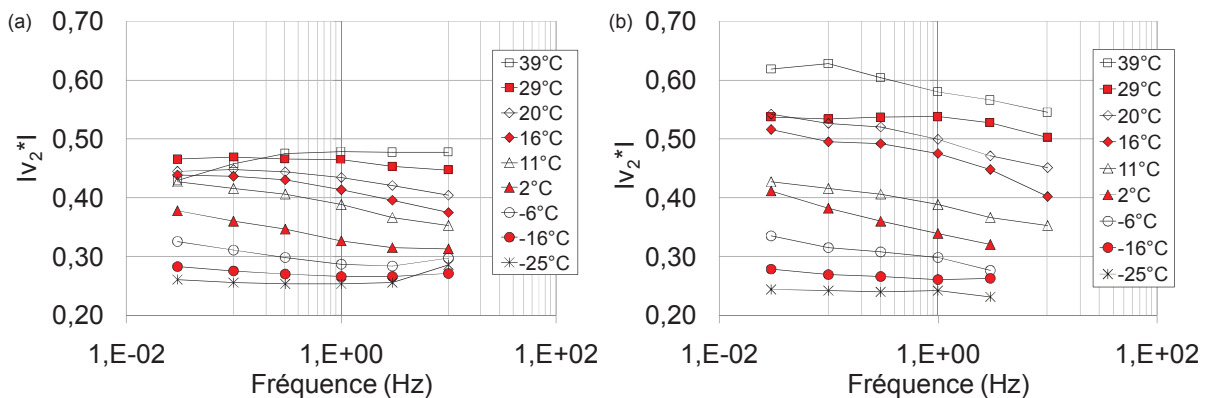


Figure III. 7 : Isothermes de coefficient de Poisson selon la direction 2 (a) GB3 (b) GB5

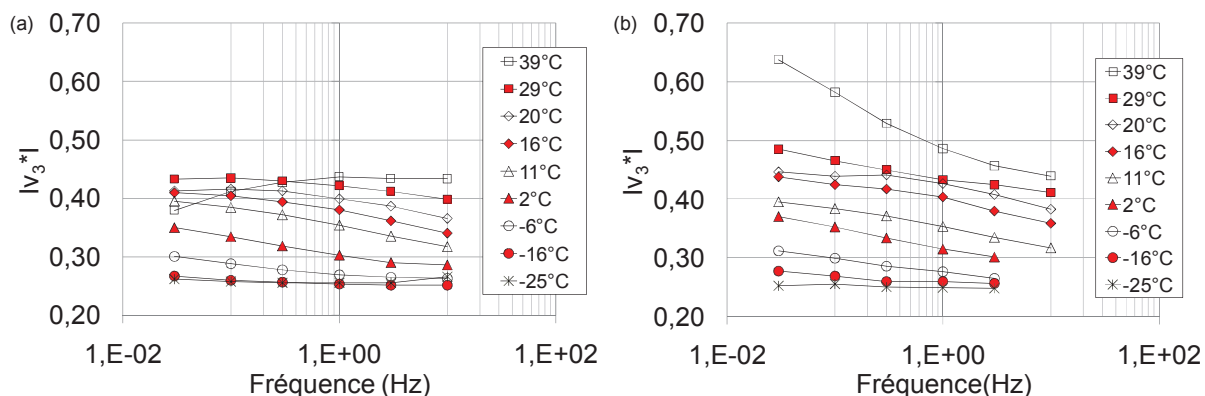


Figure III. 8 : Isothermes de coefficient de Poisson selon la direction 3 (a) GB3 (b) GB5

Ces observations peuvent être expliquées par la différence de squelette granulaire entre les deux graves bitumes. En effet, l'optimisation de la combinaison des fines avec les plus gros granulats pour la GB5 entraîne une rigidification du matériau à hautes fréquences et basses températures ce qui explique un module supérieur de la GB5 (et donc un coefficient de Poisson inférieur). Par contre, l'absence d'une fraction granulaire pour le matériau GB3 semble favoriser les déformations à hautes températures et basses fréquences.

IV - Principe d'Equivalence Temps – Température

En examinant les courbes isothermes (Figure III. 3 (a) et Figure III. 5) et isochrones (Figure III. 3 (b) et Figure III. 6) des différents matériaux, on remarque qu'une même valeur de module complexe ($|G^*|$ ou $|E^*|$) peut être obtenue pour des couples différents de fréquence et de température : on dit alors que les matériaux sont thermo-rhéologiquement simples. De ce fait, le Principe d'Equivalence Temps-Température (PETT) [Williams, 1955] est applicable et permet d'écrire l'équation III. 1.

$$E^*(\omega, T) = E^*(\omega, f(T)) \quad (Eq III. 1)$$

L'application du PETT permet de tracer une courbe unique représentant le module complexe en fonction de la fréquence pour une température de référence. Cette courbe appelée courbe maitresse (Figure III. 9) est obtenue par translation horizontale des isothermes. L'isotherme correspondant à la température de référence lui ne bouge pas. Cette courbe permet d'obtenir des valeurs de module pour des fréquences non accessibles avec les essais mécaniques de module complexe.

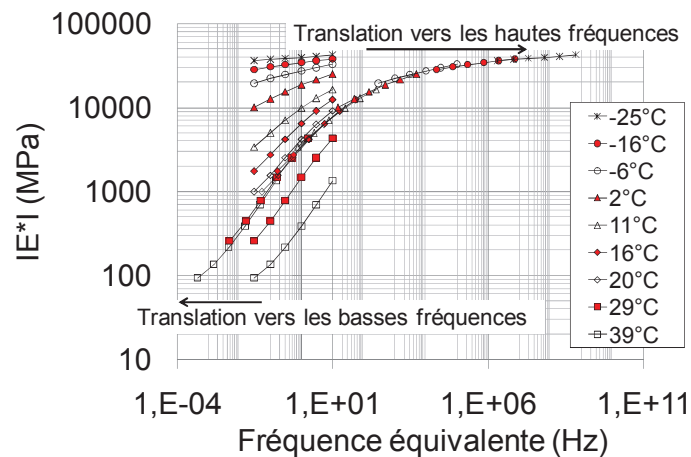


Figure III. 9 : Courbe maitresse de la GB3 à la température de référence de 22°C

La translation d'un isotherme par rapport à l'isotherme de référence nécessite la détermination d'un coefficient de translation. Ce coefficient noté $\log a_T$ permet d'écrire l'équation III. 2 :

$$E^*(\omega, T) = E^*(a_T \cdot \omega, T_R) \quad \text{avec } a_T=1 \text{ lorsque } T=T_R \quad (\text{Eq III. 2})$$

Plusieurs formules existent pour la représentation de $\log a_T$. On peut citer par exemple :

- une équation de type Arrhénius (Eq III. 3) :

$$\log(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (\text{Eq III. 3})$$

Dans cette équation, δH est l'énergie apparente d'activation caractérisant le matériau, R est la constante des gaz parfaits et, T et T_R sont les températures exprimées en degré Kelvin ;

- la formule WLF (Eq III .4) proposée par [Williams, 1955]:

$$\log(a_T) = \frac{-C1(T-T_R)}{C2+(T-T_R)} \quad (\text{Eq III. 4})$$

Ici, $C1$ et $C2$ sont des constantes intrinsèques au matériau et T et T_R sont les températures.

- une méthode mathématique [Chailleux, 2006] utilisant les résultats l'essai de module complexe (Eq III. 5) :

$$\log(a_T) = \sum \frac{\log E^*(T, \omega) - \log E^*(T_R, \omega)}{\varphi_{\text{moy}}(T, T_R)} \quad (\text{Eq III. 5})$$

Avec E^* et φ respectivement le module complexe et l'angle de phase du matériau

V - Représentations complexes et modélisation rhéologique

V - 1 - Représentations complexes

Les résultats des essais mécaniques de module complexes peuvent également être représentés dans des plans complexes :

- soit en termes des parties réelles et imaginaires : le plan de Cole – Cole (Figure III. 10)
- soit en termes d'angle de phase et de module complexe : l'espace de Black (Figure III. 11).

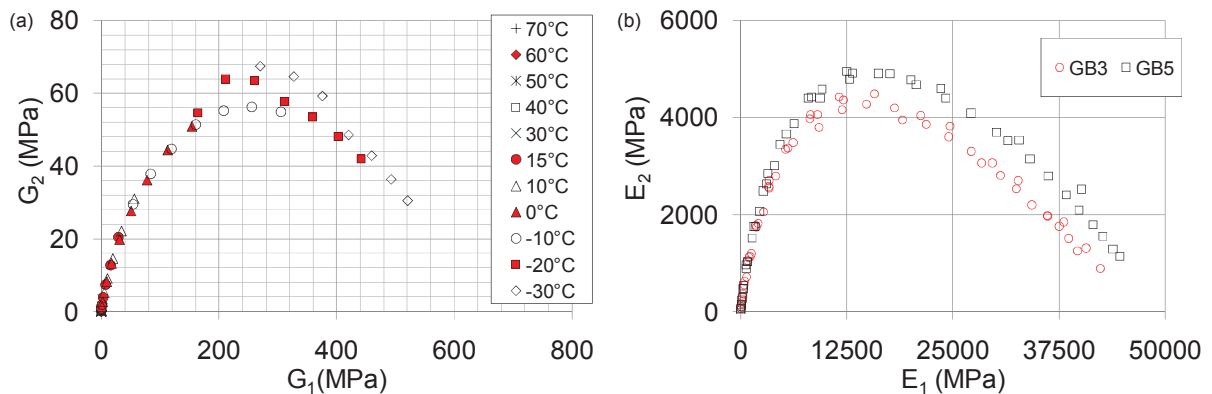


Figure III. 10 : Plan de Cole – Cole (a) du bitume 35/50 (b) de la GB3 et de la GB5

La comparaison des représentations dans le plan de Cole – Cole (Figure III. 10 (a)) et l'espace de Black (Figure III. 11 (b)) pour les graves bitumes montre que le module vitreux E_0 , c'est-à-dire le module complexe lorsque l'on tend vers les basses températures ou les hautes fréquences, augmente d'environ 10% [Olard, 2012] pour la GB5 par rapport à la GB3. Pour le module statique (E_{00}), qui correspond au module lorsque l'on tend vers les hautes températures et basses fréquences, il est environ de 15 MPa pour la GB5 contre 75 MPa pour la GB3. Ces constats sont cohérents avec la comparaison des modules complexes et des coefficients de Poisson des deux graves bitumes faite au paragraphe III – 2.

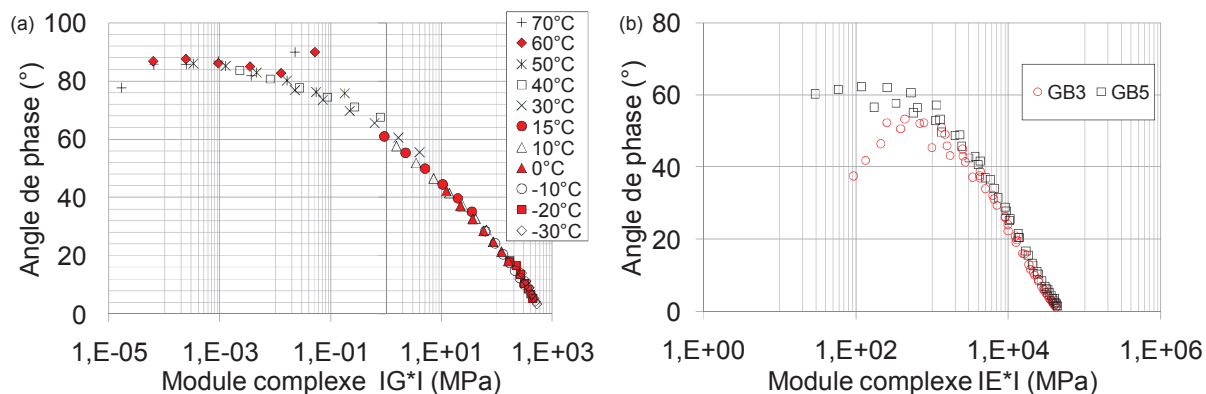


Figure III. 11 : Espace de Black (a) pour le bitume 35/50 (b) pour la GB3 et la GB5

De plus, on remarque sur la Figure III. 10 et la Figure III. 11 que malgré de larges gammes de températures et de fréquences balayées pendant les essais de module complexe, il se montre difficile d'atteindre le point correspondant au module vitreux (G_0 ou E_0). Il est donc nécessaire d'avoir recours à la modélisation du comportement du matériau sur une plus large gamme de fréquences et / ou de températures afin d'atteindre ce point.

V - 2 - Modélisation rhéologique

Différentes méthodes de prédiction du comportement des matériaux bitumineux sont disponibles dans la littérature. On peut citer par exemple les méthodes multivariées non linéaires, les équations algébriques empiriques et les modèles rhéologiques [Yusoff, 2011]. Dans cette étude, nous nous focaliserons sur les modèles rhéologiques qui sont des assemblages de différentes cellules rhéologiques élémentaires.

V - 2 - 1 - Cellules élémentaires

La Figure III. 12 présente trois cellules élémentaires qui sont le ressort, l'amortisseur et l'élément parabolique. L'assemblage de ces cellules va permettre de modéliser le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux.

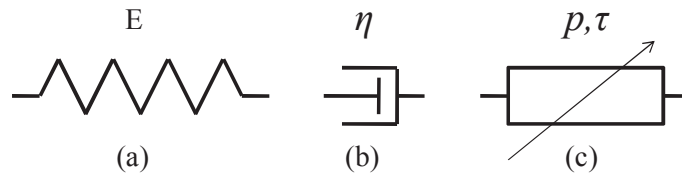


Figure III. 12 : Cellules rhéologiques élémentaires : ressort (a), amortisseur (b), élément parabolique (c)

Si nous prenons σ la force agissant sur l'élément et ε l'allongement de celui-ci, il est possible de définir simplement les lois de comportement du ressort et de l'amortisseur.

La loi de comportement du ressort s'écrit selon l'équation III. 6 telle que :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{Eq III. 6})$$

Tandis que celle de l'amortisseur s'écrit suivant l'équation III. 7:

$$\sigma = \eta\dot{\varepsilon} \quad (\text{Eq III. 7})$$

La loi de comportement de l'élément parabolique est caractérisée par le paramètre p qui est compris entre 0 et 1 et le temps caractéristique τ : elle s'écrit telle que présentée dans l'équation III. 8.

$$\sigma = \frac{\eta}{\tau}(i\omega\tau)^p\varepsilon \quad (\text{Eq III. 8})$$

Cette équation montre l'évolution d'une réponse allant de celle d'un ressort lorsque $p = 0$ avec un module s'écrivant $E = \frac{\eta}{\tau}$ à un amortisseur linéaire quand $p = 1$ avec un module égal à $E = \eta\omega$.

Plusieurs modèles rhéologiques sont disponibles dans la littérature, nous nous intéresserons ici à des modèles à spectres continus c'est-à-dire qu'ils peuvent être représentés par une multitude d'éléments de Kelvin-Voigt en série ou d'éléments de Maxwell en parallèle [Olard, 2003].

V - 2 - 2 - Modèle de Huet

Le modèle de Huet est un modèle rhéologique capable de prédire le comportement des matériaux bitumineux tel que le bitume ou les enrobés. Ce modèle, présenté sur la Figure III. 13, est composé de trois paramètres et associe en série un ressort de raideur noté E_0 représentant le module instantané et deux amortisseurs à lois de fluage paraboliques de paramètres k et h ($J_1(t) = at^h$ et $J_2(t) = Bt^k$).

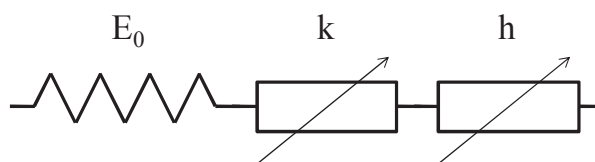


Figure III. 13 : Modèle rhéologique de Huet

Le module est alors exprimé par l'équation III. 9:

$$E^*(\omega) = \frac{E_0}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h}} \quad (\text{Eq III. 9})$$

avec i : nombre complexe défini par $i^2 = -1$;

ω : la pulsation définie par $\omega = 2\pi f$;

E_0 : limite du module complexe quand $\omega\tau \rightarrow \infty$;

h et k : exposants tels que $0 < k < h < 1$;

δ : constante sans dimension ;

τ_E : temps caractéristique dont la valeur varie uniquement en fonction de la température.

Dans le plan de Cole-Cole, la courbe représentative de ce modèle tend vers l'origine lorsque la température augmente et les fréquences diminuent. Au contraire, le point E_0 est atteint pour des températures en diminution et des fréquences en augmentation comme montré sur la Figure III. 14. De plus sur cette figure, on peut voir le principe de détermination des paramètres de calage des modèles rhéologiques présentés dans cette étude.

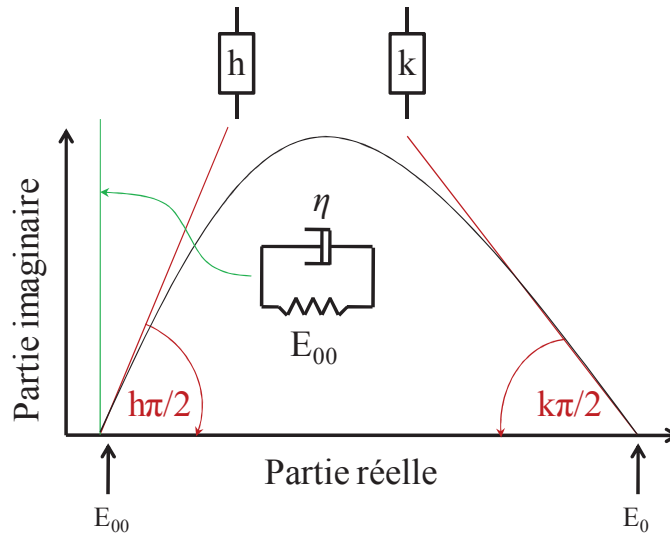


Figure III. 14 : Méthode de détermination des paramètres de calibration des modèles rhéologiques dans le plan de Cole-Cole

V - 2 - 3 - Modèle de Huet – Sayegh

Sayegh a, quant à lui, ajouté un ressort de faible rigidité E_{00} par rapport à E_0 en parallèle du modèle de Huet (Figure III. 15). Avec le modèle de Huet, la norme du module des enrobés tend vers zéro pour les hautes températures et les basses fréquences. L'introduction du ressort E_{00} permet d'obtenir un module réel non nul pour la même gamme de températures et de fréquences appelé module statique. L'expression du module complexe avec ce modèle est donnée par l'équation III. 10.

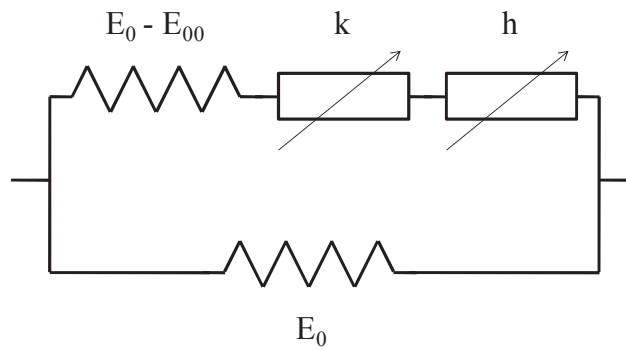


Figure III. 15 : Modèle rhéologique de Huet-Sayegh

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h}} \quad (\text{Eq III. 10})$$

avec i : nombre complexe défini par $i^2 = -1$;

ω : la pulsation définie par $\omega = 2\pi f$;

E_0 : limite du module complexe quand $\omega\tau \rightarrow \infty$;

E_{00} : le module statique quand $\omega\tau \rightarrow 0$;

h et k : exposants tels que $0 < k < h < 1$;

δ : constante sans dimension ;

τ_E : temps caractéristique dont la valeur varie uniquement en fonction de la température.

V - 2 - 4 - Modèle 2S2P1D

Par la suite, un amortisseur linéaire a été ajouté en série avec les deux éléments paraboliques et le ressort de rigidité $E_0 - E_{00}$. Ce modèle rhéologique nommé 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic Elements, 1 Dashpot) a également un spectre continu. Il est présenté par la Figure III. 16 et le module obtenu par ce modèle est donné par l'équation III. 11.

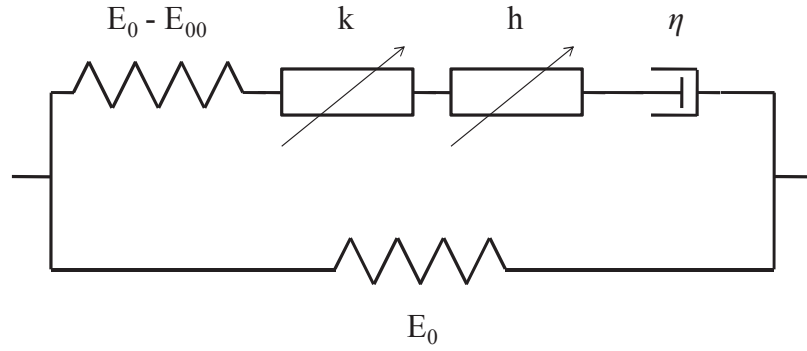


Figure III. 16 : Modèle rhéologique 2S2P1D

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (Eq III. 11)$$

avec i : nombre complexe défini par $i^2 = -1$;

ω : la pulsation définie par $\omega = 2\pi f$;

E_0 : limite du module complexe quand $\omega\tau \rightarrow \infty$;

E_{00} : le module statique quand $\omega\tau \rightarrow 0$;

h et k : exposants tels que $0 < k < h < 1$;

δ : constante sans dimension ;

τ_E : temps caractéristiques dont la valeur varie uniquement en fonction de la température ;

β : constante sans dimension ;

η : viscosité newtonienne, $\eta = (E_0 - E_{00})\beta\tau_E$. Lorsque $\omega\tau_E \rightarrow 0$, alors $E^*(i\omega\tau_E) \rightarrow E_0 + i\omega(E_0 - E_{00})\beta\tau_E$.

Ce modèle est composé de 7 constantes (6 dans le cas des bitumes car $E_{00} = 0$). Par ailleurs, si le comportement du matériau est thermo- rhéologiquement simple, c'est-à-dire qu'il répond au PTT alors seul τ_E est dépendant de la température. La valeur de $\tau_E(T)$ peut donc être exprimée en fonction de la température grâce au coefficient de translation $a_T(T)$ avec la relation $\tau_E(T) = a_T(T)\tau_{Eref}$ où τ_{Eref} correspond à la température de référence choisie. Les valeurs de a_T pour chaque température sont alors déterminées grâce à la loi WLF [Williams,

1955]. Cette loi s'exprime avec les constantes C1 et C2 ce qui rajoute donc deux autres constantes aux sept premières.

Le modèle 2S2P1D a également été étendu au cas tridimensionnel [Di Benedetto, 2007] en introduisant un coefficient de Poisson complexe ν_{2S2P1D}^* . Cette adaptation en trois dimensions a nécessité l'ajout de deux constantes supplémentaires ν_0 et ν_{00} afin de prédire l'évolution de ν_{2S2P1D}^* en fonction de la température et / ou de la fréquence :

- le coefficient de Poisson ν_0 caractérisant le comportement du matériau à haute fréquence. Il est lié au ressort E_0 seul ;
- le coefficient de Poisson ν_{00} associé aux basses fréquences. Il est lié au module E_{00} associé au comportement à haute température.

Le coefficient de Poisson complexe ν_{2S2P1D}^* déterminé par l'équation III. 12 tient compte des valeurs des E_{2S2P1D}^* , ν_0 et ν_{00} .

$$\nu_{2S2P1D}^* = \nu_{00} + (\nu_0 - \nu_{00}) \frac{E_{2S2P1D}^*(\omega) - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (Eq III. 12)$$

ν_{2S2P1D}^* peut également être exprimé selon l'équation III. 13 :

$$\nu_{2S2P1D}^* = \nu_{00} + \frac{\nu_0 + \nu_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_\nu)^{-k} + (i\omega\tau_\nu)^{-h} + (i\omega\beta\tau_\nu)^{-1}} \quad (Eq III. 13)$$

Dans cette dernière expression $\tau_\nu \neq \tau_E$, par contre le rapport entre ces deux valeurs est constant ce qui permet d'introduire le paramètre $\gamma_{E\nu} = \frac{\tau_E}{\tau_\nu}$.

V - 2 - 5 - Comparaison des modèles rhéologiques

Les trois modèles rhéologiques présentés ici présentent l'avantage commun d'avoir un spectre continu. Bien que les prédictions à hautes fréquences et / ou basses températures ne présentent guère de différences celles à basses fréquences et / ou hautes températures sont différentes. L'introduction du module statique dans le modèle Huet-Sayegh a permis de prendre en compte l'effet du squelette granulaire à basses fréquences et hautes températures. La Figure III. 17 (a) montre la comparaison des modèles de Huet et de Huet-Sayegh pour le cas d'un bitume 35 / 50. Comme le module statique E_{00} du bitume est proche de zéro, le modèle de Huet-Sayegh est équivalent à celui de Huet, la modélisation est donc identique.

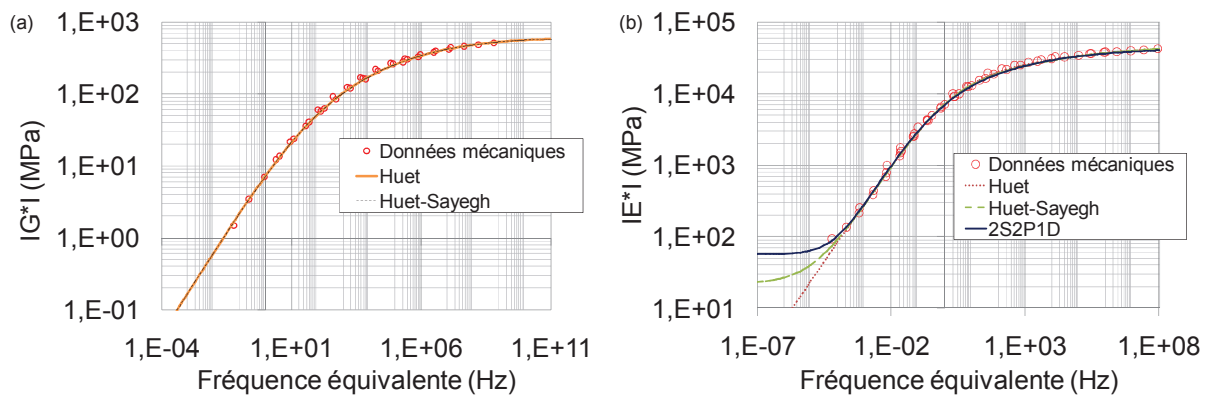


Figure III. 17 : (a) Comparaison des modèles rhéologiques de Huet et Huet-Sayegh pour un bitume 35-50 à la température de référence de 15°C (b) Comparaison des modèles rhéologiques pour le matériau GB3 à la température de référence 15°C

L'ajout d'un amortisseur linéaire prenant en compte la viscosité dynamique dans le modèle 2S2P1D a permis d'améliorer la prédiction du comportement des matériaux à basses fréquences et hautes températures. La Figure III. 17 (b) montre une comparaison des différents modèles cités auparavant, le calage est effectué sur une grave bitume GB3 à une température de référence de 15°C.

On peut effectivement voir que la principale différence se situe au niveau de la prédiction du comportement à basses fréquences et hautes températures, les résultats étant similaires à hautes fréquences et basses températures. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le modèle de Huet n'intègre pas le module statique du matériau, celui-ci tend donc vers zéro

dans la gamme des basses fréquences et / ou hautes températures. Le modèle de Huet-Sayegh prend en compte cette valeur et améliore le calage du modèle, mais le calage à basses fréquences et / ou hautes températures semble considérablement amélioré par l'ajout de l'amortisseur linéaire dans le modèle 2S2P1D.

De plus, des études ont montré que le modèle 2S2P1D était aussi performant dans le cadre des bitumes [Yussof, 2010] [Yussof, 2012] que pour les enrobés bitumineux [Di Benedetto, 2009] [Mounier, 2012]. Le modèle 2S2P1D présente également l'avantage d'avoir été étendu à un problème tridimensionnel et de permettre en plus de la prédiction de module complexe, celle du coefficient de Poisson du matériau. Dans la suite de l'étude, le comportement des matériaux est donc modélisé avec le modèle 2S2P1D, les paramètres de calage pour le bitume et les graves sont respectivement présentés dans le Tableau III. 1 et Tableau III. 2.

C1	C2	δ	k	h	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	β	τ (-10°C)
207	1319	3,41	0,226	0,579	0	620	70	1,09

Tableau III. 1 : Paramètres de calibration du modèle rhéologique 2S21PD pour le bitume 35/50

Matériau	C1	C2	δ	k	h	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	β	τ (15°C)
GB3	19	145	2,05	0,190	0,578	57	45000	112	$3,34 \cdot 10^{-2}$
GB5	24	176	2,04	0,207	0,604	9	48000	95	$3,55 \cdot 10^{-2}$

Tableau III. 2 : Paramètres de calibration du modèle rhéologique 2S21PD pour les matériaux GB3 et GB5

V - 3 - Prédiction du module de l'enrobé à partir du module du bitume

Nous avons précisé au paragraphe II que les graves bitumes GB3 et GB5 de l'étude sont composées du même liant bitumineux 35/50. De nombreuses études se sont intéressées à la relations entre les caractéristiques mécaniques du liant et de l'enrobé pour une formulation

donnée. Olard [Olard, 2003 (b)] propose une relation entre le module complexe (norme et angle de phase) du liant et celui de l'enrobé (Eq III. 14).

$$E_{enrobé}^*(\omega, T) = E_{00\ enrobé} + [E_{liant}^*(10^\gamma \omega, T) - E_{00\ liant}] \frac{E_{0\ enrobé} - E_{00\ enrobé}}{E_{0\ liant} - E_{00\ liant}} \quad (Eq\ III.\ 14)$$

où γ est déterminé par l'équation III. 15 suivante :

$$\tau_{enrobé}(T) = 10^\gamma \tau_{liant}(T) \quad (Eq\ III.\ 15)$$

La Figure III. 18 montre l'application de la relation III. 14 pour les matériaux de l'étude. Ici, cette relation est établie à l'aide du modèle 2S2P1D bien qu'elle soit indépendante de tout modèle rhéologique et puisse être appliquée directement aux données expérimentales du liant. Cette relation nécessite néanmoins une hypothèse sur la valeur du coefficient de Poisson du bitume. Ici, on considère l'hypothèse d'un matériau isotrope et incompressible ($\nu = 0.5$).

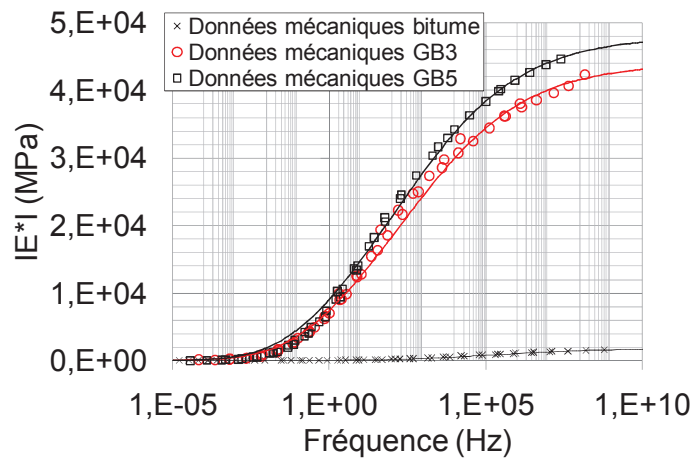


Figure III. 18 : Prédiction des modules complexes des graves bitumes GB3 et GB5 à partir du module du bitume 35/50

VI - Détermination théorique des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes

En s'appuyant sur les formules développées au chapitre II avec la théorie de propagation d'onde dans un milieu viscoélastique, il est possible de prédire les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes (équations I. 11 à I. 14) en utilisant les modules complexes et les angles de phase déterminés avec la modélisation rhéologique des matériaux sur une large gamme de fréquences et de températures. Le principe de cette démarche est présenté dans la Figure III. 19.

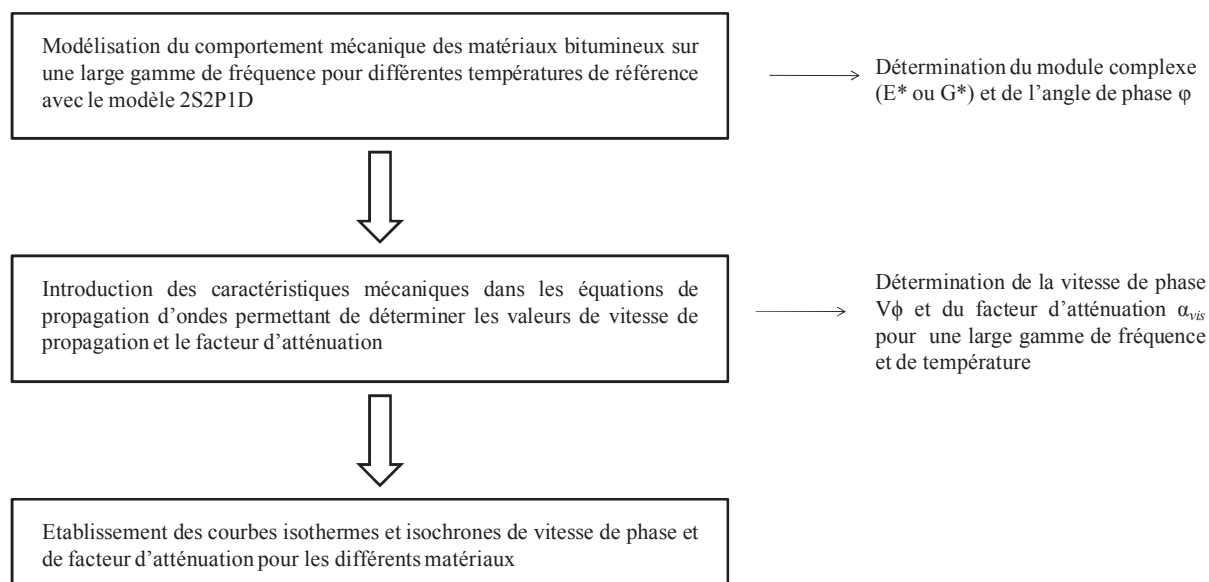


Figure III. 19 : Principe de la détermination théorique des paramètres de propagation d'onde

VI - 1 - Prédiction de la vitesse de propagation

La vitesse de phase des ondes ultrasonores peut donc être déterminée en utilisant les équations II. 11 et II. 13 respectivement pour les ondes de compression et de cisaillement et la modélisation rhéologique du comportement mécaniques des matériaux. La prédiction de la vitesse de propagation des ondes de compression nécessite de connaître les valeurs du coefficient de Poisson. Ici, en l'absence de cette donnée, nous prenons une valeur moyenne égale à 0,35 en accord avec plusieurs études portant sur la caractérisation ultrasonore des matériaux bitumineux [Barnes, 2009 (b)] [Norambuena – Contreras, 2010].

La Figure III. 20 et Figure III. 21 présentent respectivement les isothermes et un isochrone (à 500 kHz) des valeurs théoriques des vitesses de propagation pour le bitume 35/50 et la grave bitume GB5 sur la gamme fréquentielle des ondes ultrasonores (20 kHz à 1 MHz).

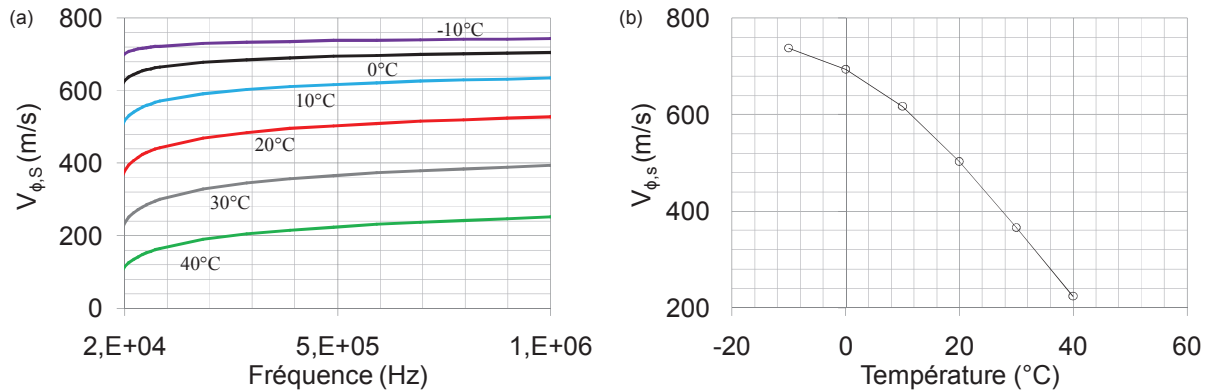


Figure III. 20 : (a) isothermes (b) isochrone à 500 kHz de la vitesse de propagation des ondes S du bitume 35/50 sur la gamme de fréquences de l'essai ultrasonore

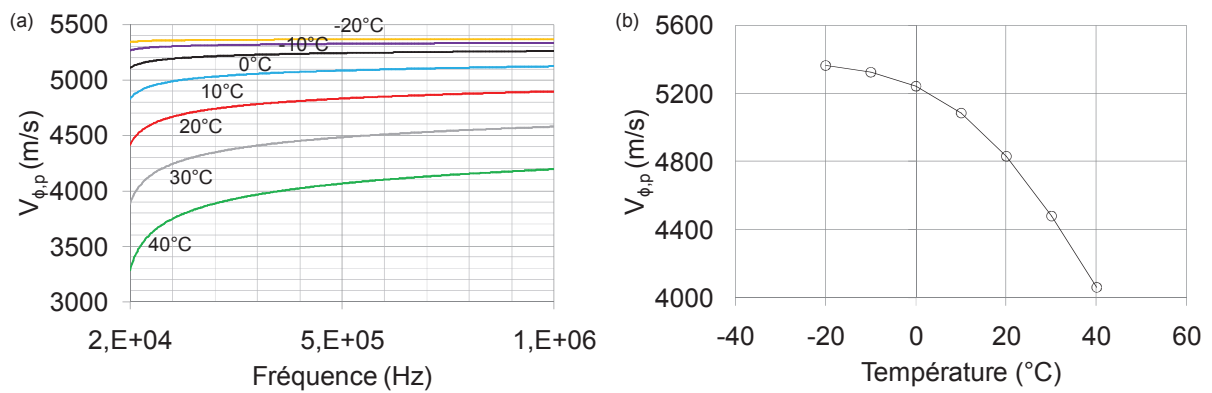


Figure III. 21 : (a) isothermes (b) isochrone à 500 kHz de la vitesse de propagation des ondes P du matériau GB5 sur la gamme de fréquences de l'essai ultrasonore

Les isothermes de vitesse (Figure III. 20 (a) et Figure III. 21 (a)) montrent que sur la plage de fréquences ultrasonores, la vitesse de propagation des ondes augmente en fonction de la fréquence ce qui rend compte de la dépendance à la fréquence de ce paramètre. De plus, cette dépendance augmente avec l'augmentation de la température. L'effet de la température est également visible sur les courbes isochrones (Figure III. 20 (b) et Figure III. 21 (b)), en effet la vitesse de propagation des ondes diminue avec l'augmentation de la température.

VI - 2 - Prédiction du facteur d'atténuation

Tout comme pour la vitesse de propagation, il est possible de prédire les valeurs du facteur d'atténuation visqueux causé par l'absorption du milieu en utilisant cette fois-ci les équations II. 12 et II. 14 pour les ondes de compression et de cisaillement. La Figure III. 22 et la Figure III. 23 montrent les isothermes et un isochrone (à 500 kHz) du facteur d'atténuation visqueux pour le bitume et la grave bitume GB5.

De même que pour la vitesse de propagation, les courbes isothermes (Figure III. 22 (a) et Figure III. 23 (a)) montrent la dépendance fréquentielle du facteur d'atténuation visqueux à la fréquence et que cette dépendance augmente avec la température. On constate également qu'à basse température, la dépendance fréquentielle du facteur d'atténuation visqueux est plus importante que pour la vitesse de propagation. Cette constatation conforte le fait d'une atténuation (ou filtrage) préférentielle des hautes fréquences [Bourbié, 1986].

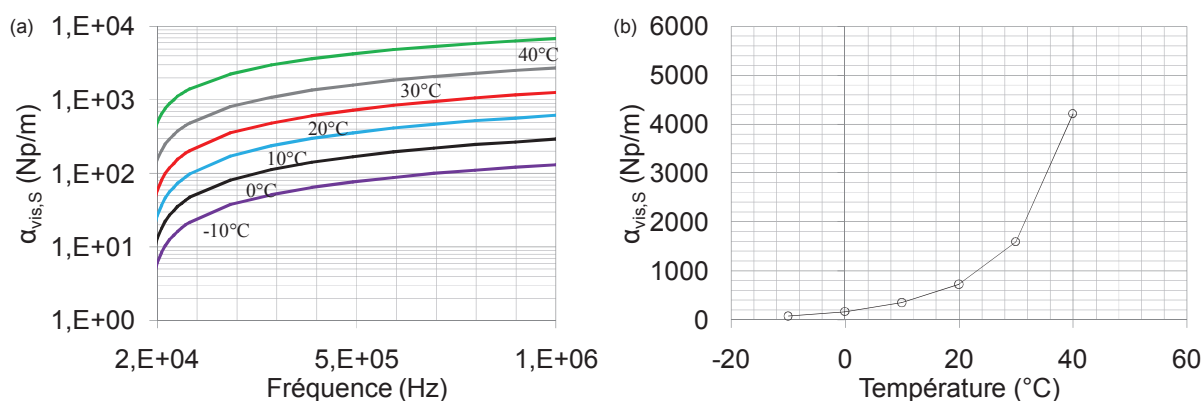


Figure III. 22 : (a) isothermes (b) isochrone à 500 kHz du facteur d'atténuation des ondes S du bitume 35/50 sur la gamme de fréquences de l'essai ultrasonore

Les courbes isochrones (Figure III. 22 (b) et Figure III. 23 (b)) montrent la thermo-sensibilité du facteur d'atténuation visqueux. On remarque une augmentation de celui-ci avec l'augmentation de la température. En effet, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la viscosité du matériau (traduite par un écoulement du fluide plus rapide), d'où une augmentation du facteur d'atténuation visqueux de l'onde. De plus, dans un matériau hétérogène avec des inclusions rigides au comportement mécanique viscoélastique comme un enrobé bitumineux, l'atténuation visqueuse est provoquée par sa matrice viscoélastique

[Bourbié, 1986] ce qui explique une allure similaire des isochrones du bitume ((Figure III. 22 (b)) et des graves bitumes (Figure III. 23 (b)).

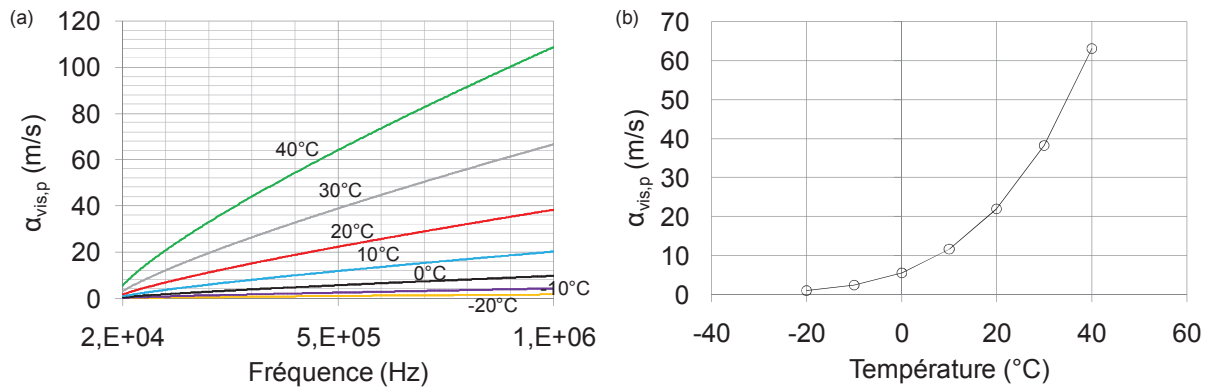


Figure III. 23 : (a) isothermes (b) isochrone à 500 kHz du facteur d'atténuation des ondes P du matériau GB5 sur la gamme de fréquences de l'essai ultrasonore

VII - Conclusion

Dans la présentation des matériaux de l'étude, nous avons mis l'accent sur les graves bitumes qui présentent des caractéristiques identiques hormis au niveau de leur granulométrie, celle de la grave bitume GB5 étant discontinue. Par le biais des résultats des essais de module complexes, il a été montré que cette différence granulométrique jouait un rôle sur les propriétés mécaniques des matériaux notamment en termes de module complexe, vitreux et statique ainsi que sur les valeurs de coefficient de Poisson. De plus, les représentations des résultats des essais en termes d'isothermes et d'isochrones de module permettent de montrer que les matériaux sont thermo-rhéologiquement simples et que le Principe d'Equivalence Temps – Température (PETT) est applicable. La construction de la courbe maîtresse des matériaux pour une température de référence choisie, passant par la détermination du coefficient de translation a_T , est alors possible. Cette représentation permet de connaître le comportement des matériaux sur une large gamme de fréquences.

Les résultats des essais peuvent également être représentés sur des plans complexes (plan de Cole – Cole et espace de Black). Cependant sur ces représentations, les données des essais mécaniques ne permettent pas d'atteindre des valeurs caractéristiques des matériaux telles que les modules vitreux (G_0 ou E_0). La modélisation du comportement des matériaux avec des modèles rhéologiques est alors employée notamment en utilisant le modèle rhéologique 2S2P1D. En effet, la comparaison des différents modèles a montré que ce modèle permet une meilleure modélisation à basses fréquences et / ou hautes températures. De plus, il comporte l'avantage d'avoir été étendu à un cas tridimensionnel. La modélisation du comportement des enrobés bitumineux à partir du comportement du bitume les composant a été abordée et se montre plutôt satisfaisante.

Pour finir, une méthode de prédiction des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes (vitesse et facteur d'atténuation visqueux) est proposée. Cette méthode repose à la fois sur la théorie de propagation des ondes en deux dimensions dans un milieu viscoélastique isotrope et la modélisation rhéologique du comportement mécanique du matériau avec le modèle 2S2P1D. Avec cela, les courbes isothermes et isochrones des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes peuvent être tracées sur une large gamme fréquentielle notamment celle des ultrasons. Ces courbes ont permis de montrer la thermo-sensibilité des grandeurs caractéristiques de propagation ainsi que leur dépendance fréquentielle notamment pour le facteur d'atténuation visqueux. Cette forte dépendance fréquentielle des grandeurs

caractéristiques de propagation confirme l'intérêt d'un traitement des signaux dans le domaine fréquentiel comme présenté au chapitre précédent.

Chapitre IV :

Matériau homogène au comportement thermo-viscoélastique : application de la méthode ultrasonore au bitume 35/50

I - Introduction

Dans ce chapitre, une méthode de caractérisation d'un matériau thermo-viscoélastique, le bitume 35 / 50 présenté au chapitre III, est proposée en utilisant les grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes ultrasonores de compression et de cisaillement déterminées expérimentalement. Sur la gamme fréquentielle ultrasonore, ce matériau peut être considéré comme homogène, les longueurs d'ondes en présence étant bien supérieures au diamètre de la plus grande hétérogénéité présente dans celui-ci.

Tout d'abord, les données expérimentales sont présentées et analysées dans les domaines temporel et fréquentiel afin de mettre en évidence l'effet de la température et de la distance de propagation sur les signaux enregistrés. La notion de bande passante est abordée afin de représenter par la suite les données ultrasonores sur des plages fréquentielles identiques. Cependant, les mêmes résultats sont présentés en annexe A - VI sur une plus large gamme fréquentielle.

Les méthodes de détermination des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes ultrasonores sont comparées pour les deux types d'ondes (compression et cisaillement). Cette comparaison permet de mettre en évidence une méthode de traitement des signaux rendant compte de leur dépendance fréquentielle causée par le comportement thermo-viscoélastique du bitume. La vitesse de propagation et le facteur d'atténuation des ondes ultrasonores

déterminés expérimentalement, sont ensuite présentés en termes d'isothermes et d'isochrones. Ces représentations, montrant la thermo-sensibilité et la dépendance fréquentielle de ces grandeurs permettent la détermination du domaine d'atténuation des ondes en fonction des longueurs d'ondes mises en jeu lors de l'essai ultrasonore. Des relations sont établies entre le facteur d'atténuation des ondes et des grandeurs issues de la modélisation rhéologique comme la viscosité Newtonienne.

La dernière partie de ce chapitre concerne la détermination des propriétés mécaniques du matériau, avec les données ultrasonores en faisant une comparaison entre une hypothèse élastique et une hypothèse viscoélastique. Une plage fréquentielle commune pour les deux types d'ondes (compression et cisaillement) ayant été définie auparavant, les caractéristiques mécaniques peuvent être déterminées avec les grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes sans avoir recours à la modélisation rhéologique [Mounier, 2012]. Le coefficient de Poisson est d'abord déterminé sur toute la bande passante des signaux et son évolution en fonction de la fréquence est discutée. Ensuite, les modules complexes (de cisaillement et d'Young) sont calculés et représentés sur leurs courbes maitresses respectives à -10°C . Pour finir, l'hypothèse d'une propagation d'ondes en deux dimensions dans un milieu viscoélastique permet la représentation des caractéristiques mécaniques sur les plans complexes. Tous les résultats ultrasonores sont par ailleurs comparés à une modélisation du comportement mécanique du bitume réalisée par le modèle rhéologique 2S2P1D et les différences sont discutées en prenant en compte l'influence des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes ultrasonores.

II - Présentation des données expérimentales

Les essais sur le bitume ont été réalisés pour des températures allant de -10°C à 40°C avec un écart entre les températures d'essais de 10°C . Les ondes de cisaillement étant fortement atténuées, seuls les enregistrements à la température de -10°C peuvent être exploités. Les transducteurs sont excités à des fréquences différentes allant de 300 kHz à 700 kHz (avec une variation de 100 kHz) afin de couvrir toute la bande passante des transducteurs comme présenté dans le chapitre II.

II - 1 - Formes d'ondes expérimentales et transformées de Fourier

La Figure IV. 1 présente les formes d'ondes de cisaillement et de compression enregistrées pour une excitation du transducteur à 700 kHz. Ces signaux, normés dans le but d'améliorer la représentation correspondent à ceux reçus à la distance L_2 .

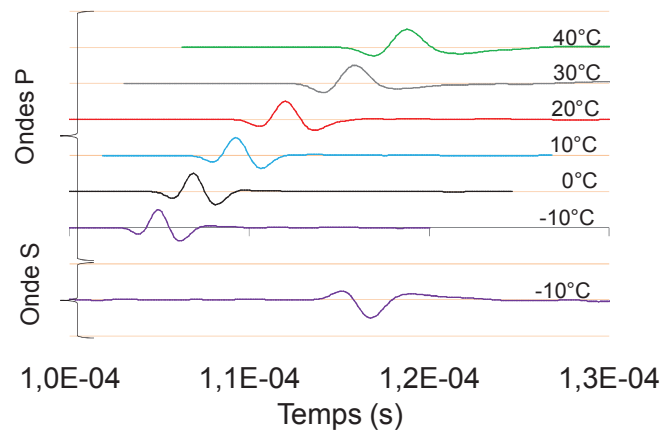


Figure IV. 1 : Signaux enregistrés et normés à la distance de propagation L_2 des ondes de cisaillement et de compression pour toutes les températures d'essais pour une fréquence d'excitation du transducteur de 700 kHz

On remarque tout d'abord que pour une même température (-10°C), les ondes de cisaillement arrivent plus tard dans le temps que les ondes de compression, confirmant ainsi que la vitesse de propagation des ondes de compression est supérieure à celle de cisaillement. La Figure IV. 1 montre aussi l'effet de la température sur la propagation d'ondes. En effet, le temps

d'arrivée des ondes augmente avec la température. Elle agit également sur l'étalement temporel du signal qui augmente lui aussi avec la température.

Dans la Figure IV. 2, on peut voir les transformées de Fourier des signaux présentés en Figure IV. 1. En premier lieu, on voit que le pic fréquentiel des ondes de cisaillement (Figure IV. 2 (b)) est inférieur à celui des ondes de compression (Figure IV. 2 (a)) dans des conditions expérimentales identiques (-10°C). Ce constat est dû au fait que les ondes de cisaillement sont plus sensibles à la viscosité du matériau [Arabani, 2009] que celles de compression, ce qui entraîne un filtrage des hautes fréquences plus important pour les ondes de cisaillement.

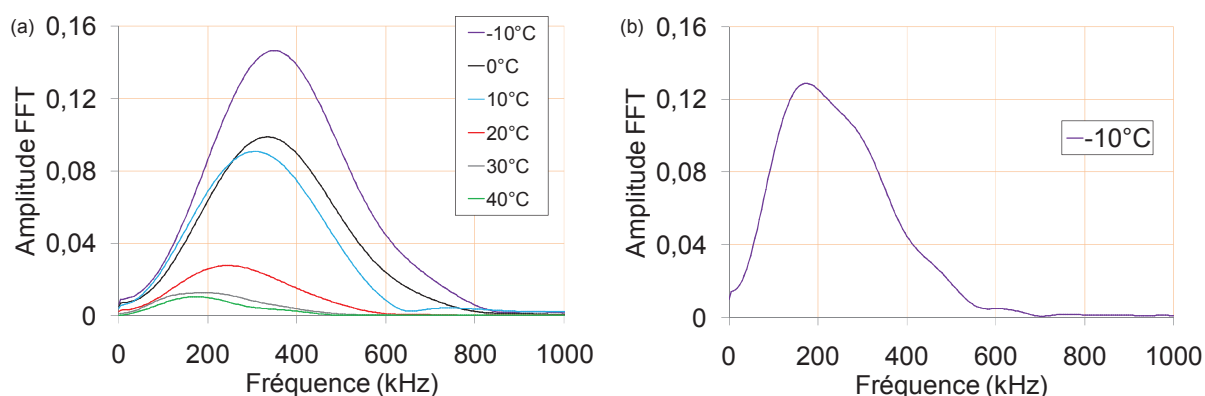


Figure IV. 2 : Transformées de Fourier (a) des ondes de compression (b) des ondes de cisaillement pour une excitation du transducteur à 700 kHz

La Figure IV. 2 (a) montre également l'effet de la température sur le spectre de fréquence pour un même type d'ondes. En effet, on constate une diminution de l'amplitude des spectres de fréquences avec l'augmentation de la température. De plus, on observe une diminution du pic fréquentiel des signaux. Cette diminution de la fréquence des signaux est en accord avec l'étalement temporel des signaux constatés sur la Figure IV. 1 et traduit une diminution de la viscosité du matériau augmentant ainsi le phénomène de filtrage préférentiel des hautes fréquences [Bourbié, 1986].

II - 2 - Atténuation préférentielle des hautes fréquences

La Figure IV. 3 et la Figure IV. 4 montrent les signaux enregistrés aux deux distances de propagation ainsi que leurs transformées de Fourier respectivement pour les ondes de cisaillement et de compression à la température de -10°C . On constate en fonction de la distance de propagation une diminution de l'amplitude ainsi qu'un étalement temporel de celui-ci. La fréquence des signaux diminue avec l'augmentation de la distance de propagation [In, 2009] [Van Velsor, 2011]. De plus, les hautes fréquences contenues dans les ondes de cisaillement sont plus atténuées que pour les ondes de compression pour une fréquence d'excitation du transducteur identique.

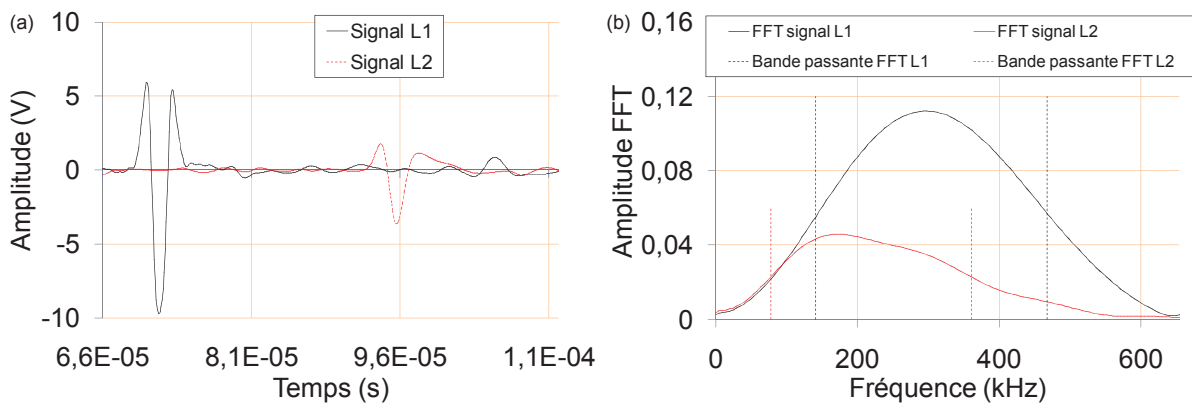


Figure IV. 3 : (a) Signaux des ondes de cisaillement pour une excitation du transducteur à 700 kHz (b) Transformées de Fourier associée aux signaux (-10°C)

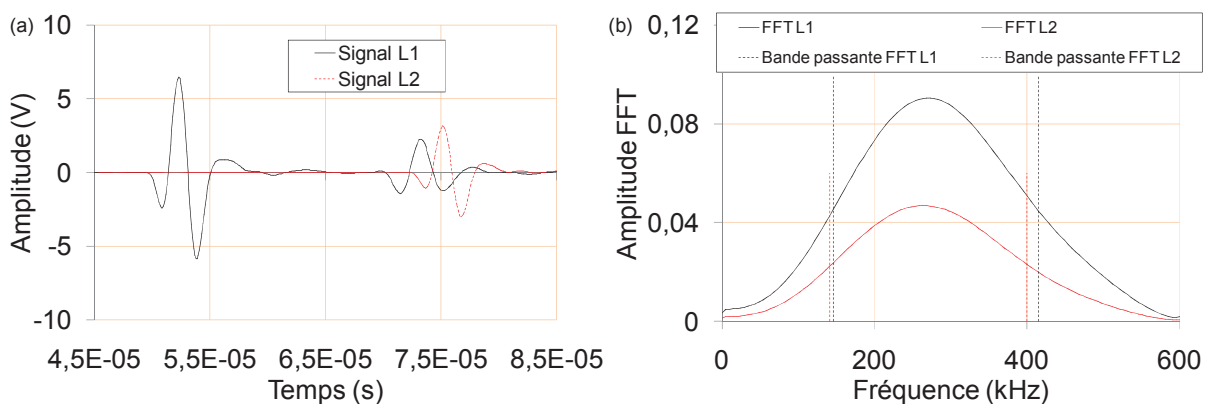


Figure IV. 4 : (a) Signaux des ondes de compression pour une excitation du transducteur de 700 kHz à -10°C (b) Transformées de Fourier associée aux signaux à -10°C

Bien que les signaux n'aient pas le même pic fréquentiel, il est possible de voir sur la Figure IV. 3 (b) et la Figure IV. 4 (b) que les bandes passantes des transformées de Fourier respectives se chevauchent. Il est alors possible de définir ce chevauchement comme la plage fréquentielle d'étude de ces signaux.

La Figure IV. 5 et la Figure IV. 6 présentent l'évolution des fréquences principales de chaque signal respectivement pour les ondes de compression et de cisaillement ainsi que leurs bandes passantes (zones grisées) en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur pour les deux distances de propagation L_1 et L_2 . Ces représentations montrent un filtrage fréquentiel plus important pour les hautes fréquences que les basses fréquences. De plus, il y également un filtrage fréquentiel en fonction de la distance de propagation. En effet, on remarque que les bandes passantes des signaux reçus à la distance la plus proche de la source d'émission (L_1) (Figure IV. 5 (a) et Figure IV. 6 (a)) sont plus hautes fréquences que celles correspondant à la distance L_2 (Figure IV. 5 (b) et Figure IV. 6 (b)).

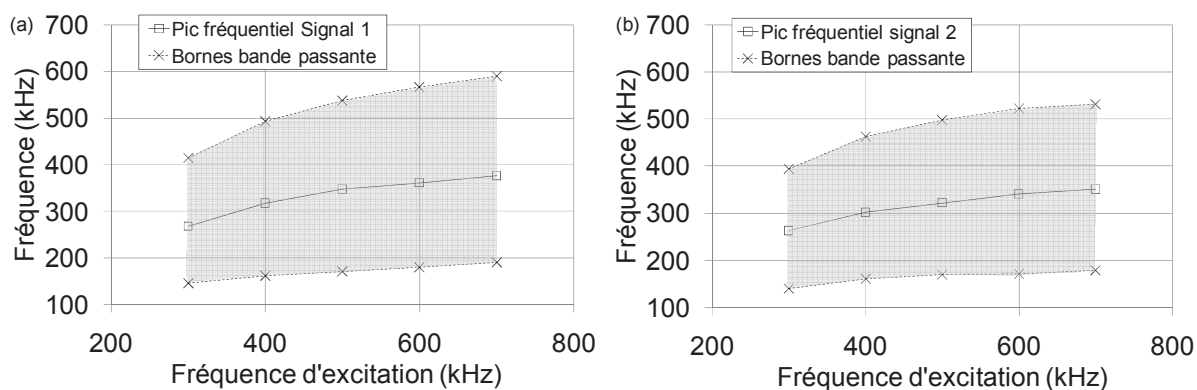


Figure IV. 5 : Evolution des fréquences des signaux de compression en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour la distance L_1 (b) pour la distance L_2

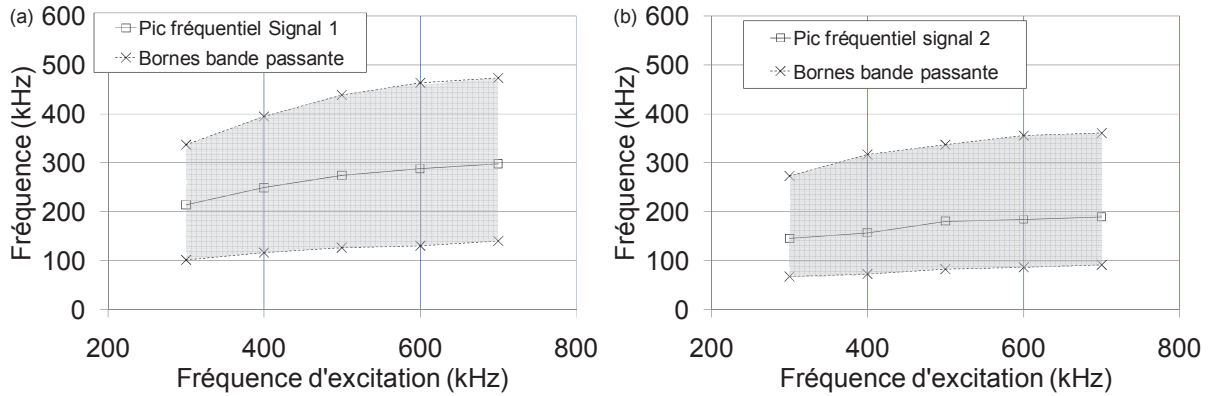


Figure IV. 6 : Evolution des fréquences des signaux de cisaillement en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour la distance L_1 (b) pour la distance L_2

Il est alors possible de définir une plage fréquentielle commune aux signaux reçus aux deux distances de propagation. Celle-ci correspond au chevauchement des bandes passantes de chaque signal. De plus, une fréquence principale et commune à ces deux signaux est déterminable avec la méthode de l'interspectre (présentée au chapitre II) et permet alors de définir la fréquence principale du chevauchement des signaux. La Figure IV. 7 représente ce chevauchement pour les deux types d'ondes en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur. Ainsi, on constate que plus la fréquence d'excitation du transducteur est élevée, plus la plage fréquentielle d'analyse augmente ce qui permet une analyse fréquentielle plus large. Dans le reste de l'étude, la détermination des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes (vitesse de propagation et facteur d'atténuation) est réalisée pour des fréquences d'excitation du transducteur de 700 kHz, ce qui permet d'obtenir des résultats cohérents sur une plus large plage fréquentielle (annexe A – V).

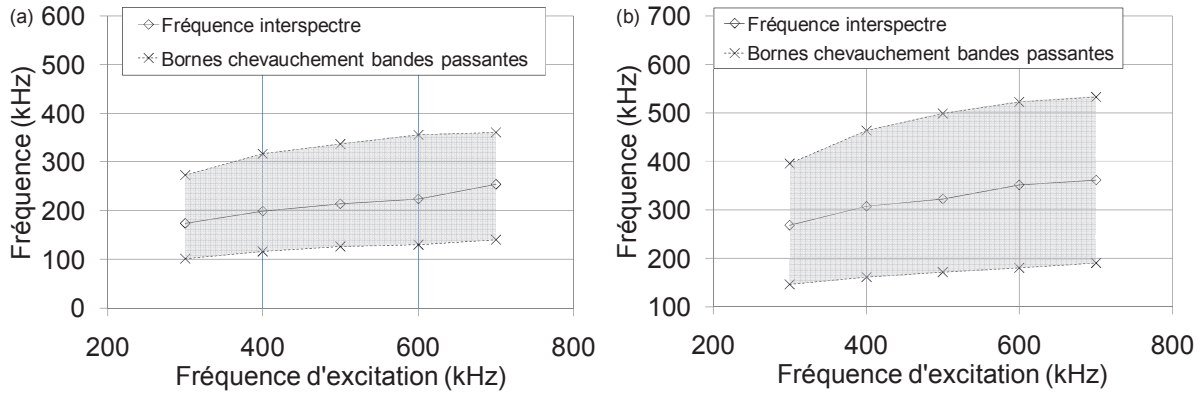


Figure IV. 7 : Evolution des fréquences interspectre des signaux et du chevauchement des bandes passantes en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour les ondes de cisaillement (b) pour les ondes de compression

La Figure IV. 8 présente quant à elle, l'évolution des fréquences interspectre, des fréquences principales de chaque signal et des bandes passantes des ondes de compression en fonction de la température. On constate une diminution de la bande passante des signaux avec l'augmentation de la température. Les zones grisées montrent, cette fois-ci, l'atténuation fréquentielle en fonction de la température. Les hautes fréquences sont plus fortement filtrées avec l'augmentation de la température.

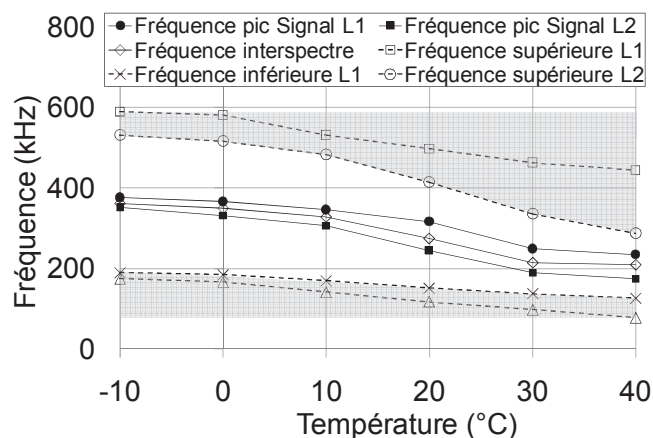


Figure IV. 8 : Evolution du pic fréquentiel et de la bande passante des ondes de compression pour une excitation à 700 kHz en fonction de la température

II - 3 - Déphasage des signaux

La Figure IV. 9 montre le déphasage des signaux en fonction de la fréquence pour les deux types d'ondes. Ces données sont représentées sur la bande passante des signaux comme présenté dans la Figure IV. 8 (les représentations sur une plus large gamme fréquentielle sont présentées en annexe A – VI).

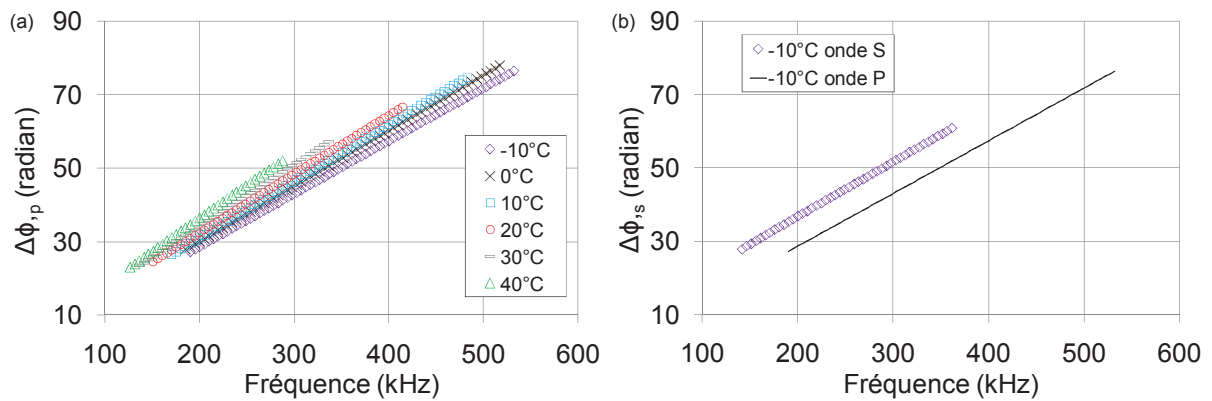


Figure IV. 9 : Déphasage en fonction de la température des signaux de compression (a) et de cisaillement (b) sur leurs bandes passantes

Le déphasage augmente en fonction de la fréquence ce qui confirme une fois de plus, l'importance d'un traitement fréquentiel. Ensuite, le déphasage des ondes de cisaillement est supérieur à celui des ondes de compression pour une même température. Dans le cadre d'un essai sur un bitume pur, le déphasage des ondes est causé uniquement par son comportement viscoélastique, ce qui confirme que les ondes de cisaillement sont plus sensibles à la viscosité du matériau que les ondes de compression concordant ainsi avec la revue bibliographique [Arabani, 2009]. La Figure IV. 9 (a) montre, pour une fréquence donnée, que le déphasage des ondes augmente avec la température. En effet, la viscosité du matériau diminue avec l'augmentation de la température [Nita, 2011] [Schaschke, 2013] ce qui entraîne un déphasage plus important.

III - Détermination expérimentale des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes

Au chapitre II, plusieurs méthodes de détermination des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes ont été présentées dans deux domaines d'analyse différents : le domaine temporel et le domaine fréquentiel. Ici, une comparaison de ces différentes méthodes est faite dans le but de déterminer la plus appropriée dans le cadre de la propagation d'ondes dans un matériau au comportement mécanique thermo-viscoélastique.

III - 1 - Vitesse de propagation

La Figure IV. 10 et la Figure IV. 11 montrent une comparaison des différentes méthodes de détermination de la vitesse de propagation à une température de -10°C respectivement pour les ondes de compression et les ondes de cisaillement. Sur la Figure IV. 10 (a) et Figure IV. 11 (a), la vitesse de phase est présentée sur une large plage fréquentielle tandis qu'elle est présentée pour la fréquence interspectre sur la Figure IV. 10 (b) et Figure IV. 11 (b). Les valeurs des vitesses obtenues sont en accord avec des valeurs présentes dans la littérature [Simonetti, 2003].

La Figure IV. 10 montre que quelle que soit la méthode de détermination et le domaine d'analyse, les valeurs des vitesses de propagation des ondes de compression sont relativement similaires pour la température de -10°C .

Par contre, la même comparaison pour les ondes de cisaillement (Figure IV. 11) montre que la méthode de vitesse de phase (domaine fréquentiel) pour la fréquence interspectre donne une valeur bien inférieure aux méthodes du domaine temporel. Dans les milieux atténuants tel que le bitume, la vitesse de phase est déterminée pour une fréquence donnée correspondant à un déphasage donné [Laugier, 2011] (Figure IV. 9 (b)) alors que les méthodes temporelles donnent la vitesse du paquet d'ondes regroupant toutes les fréquences contenues dans le signal, c'est à dire la vitesse de groupe. Les méthodes temporelles ne prennent donc pas en compte la dépendance fréquentielle de la vitesse de propagation due au comportement viscoélastique du matériau. De plus, on observe que la vitesse de phase tend vers les valeurs de vitesses obtenues avec les méthodes temporelles avec l'augmentation de la fréquence (Figure IV. 11 (a)).

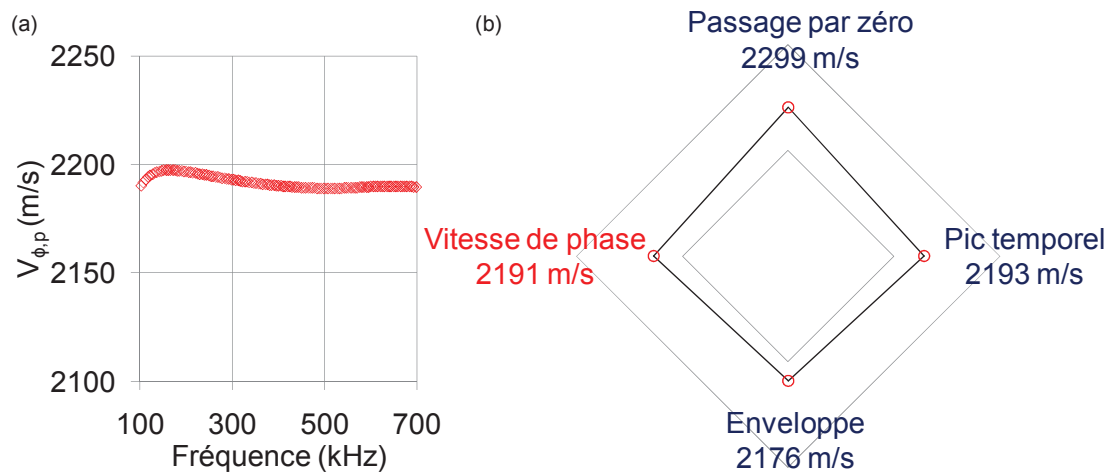


Figure IV. 10 : (a) Vitesse de phase (b) Comparaison des méthodes de détermination de la vitesse de propagation des ondes de compression à la température de -10°C

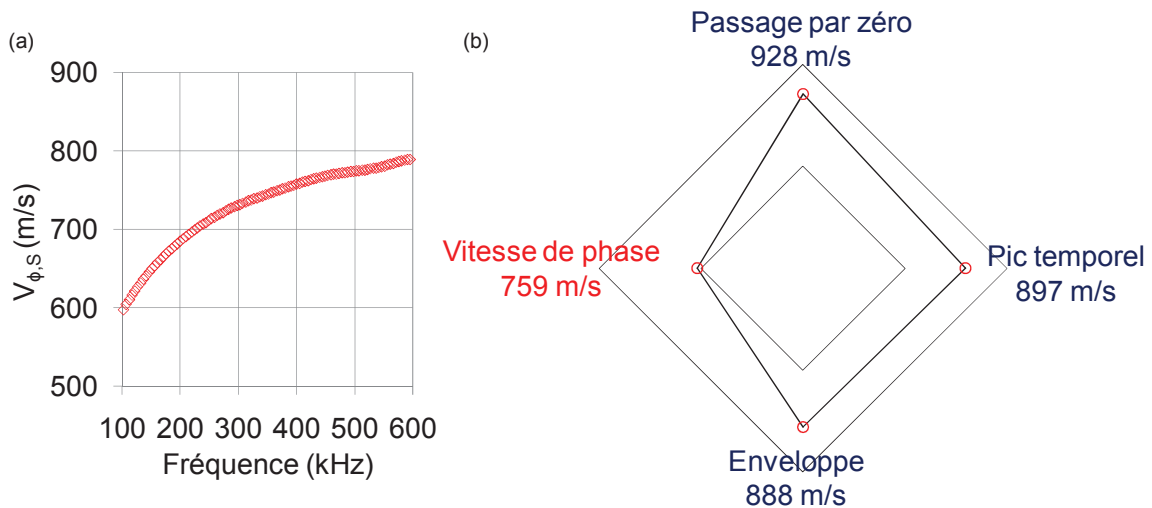


Figure IV. 11 : (a) Vitesse de phase (b) Comparaison des méthodes de détermination de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement à la température de -10°C

Il apparaît donc que la méthode de la vitesse de phase est la plus pertinente pour la détermination de la vitesse de propagation des ondes dans les matériaux au comportement mécanique thermo-viscoélastique. En effet, du fait de l'atténuation préférentielle des hautes fréquences causée par le caractère visqueux du matériau, la notion de vitesse de groupe n'a alors plus aucun sens [Bourbié, 1986]. Ce constat n'est pas évident pour les ondes de

compression (Figure IV. 10) car elles sont moins sensibles à la viscosité du matériau que les ondes de cisaillement pour cette température d'essai (-10°C). Cependant, une explication peut être donnée en reprenant la formule de la vitesse de phase (Eq IV. 1).

$$V_{\phi} = \frac{2\pi f \Delta L}{\Delta \phi} \quad (\text{Eq IV. 1})$$

On voit dans l'équation IV. 1 que la variabilité de la vitesse de phase dépend du rapport $f/\Delta\phi$, le reste de l'équation étant considéré constant. La Figure IV. 12 montre l'évolution de ce rapport en fonction de la fréquence pour les ondes de compression et de cisaillement à la température d'essai de -10°C.

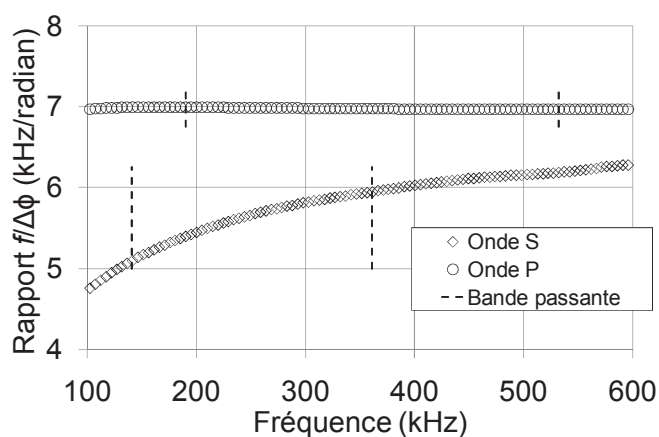


Figure IV. 12 : Evolution du rapport $f/\Delta\phi$ en fonction de la fréquence pour les ondes de cisaillement et de compression à la température de -10°C

Pour les ondes de compression, ce rapport est quasi constant ce qui explique que pour cette température d'essai (-10°C), la vitesse de phase soit proche de la vitesse de groupe car la dépendance à la fréquence est très faible. Or pour les ondes de cisaillement, ce rapport n'est pas constant et augmente avec la fréquence ce qui signifie que pour chaque fréquence contenue dans le signal, une valeur différente du rapport $f/\Delta\phi$ est associée. Dans un matériau comme le bitume à une température d'essai de -10°C, toutes les fréquences contenues dans un

signal des ondes de cisaillement ne sont donc pas propagées à la même vitesse (les hautes fréquences se propageant plus rapidement) ainsi la méthode de vitesse de phase se montre la plus pertinente.

III - 2 - Facteur d'atténuation

De même que pour la vitesse de propagation des ondes, le facteur d'atténuation est déterminé suivant différentes méthodes dans le domaine temporel ou fréquentiel. Les comparaisons de ces différentes méthodes sont présentées en Figure IV. 13 et Figure IV. 14 pour les ondes de compression et de cisaillement.

La comparaison des différentes méthodes de détermination du facteur d'atténuation pour les deux types d'ondes (Figure IV. 13 (b) et Figure IV. 14 (b)) ne permet pas de mettre en évidence une méthode plus judicieuse qu'une autre. Cependant, les méthodes temporelles donnent des valeurs pour des fréquences inconnues correspondant au paquet d'onde, il est alors nécessaire d'avoir recours à une analyse fréquentielle. Parmi ces analyses, celle de la densité spectrale comme les méthodes temporelles donnent des valeurs pour l'ensemble des fréquences contenues dans le signal ne permettant pas de prendre en compte la dépendance fréquentielle du facteur d'atténuation. De plus, celle du pic de la transformée de Fourier pose le problème du décalage du pic en fonction de la distance de propagation montré au paragraphe II – 2 (Figure IV. 3 et Figure IV. 4) et ne permet pas de déterminer la fréquence exacte de la valeur obtenue. L'atténuation de phase est donc la plus pertinente car elle permet de déterminer le facteur d'atténuation sur toute la bande passante des signaux et rend compte de son évolution en fonction de la fréquence (Figure IV. 13 (a) et Figure IV. 14 (a)).

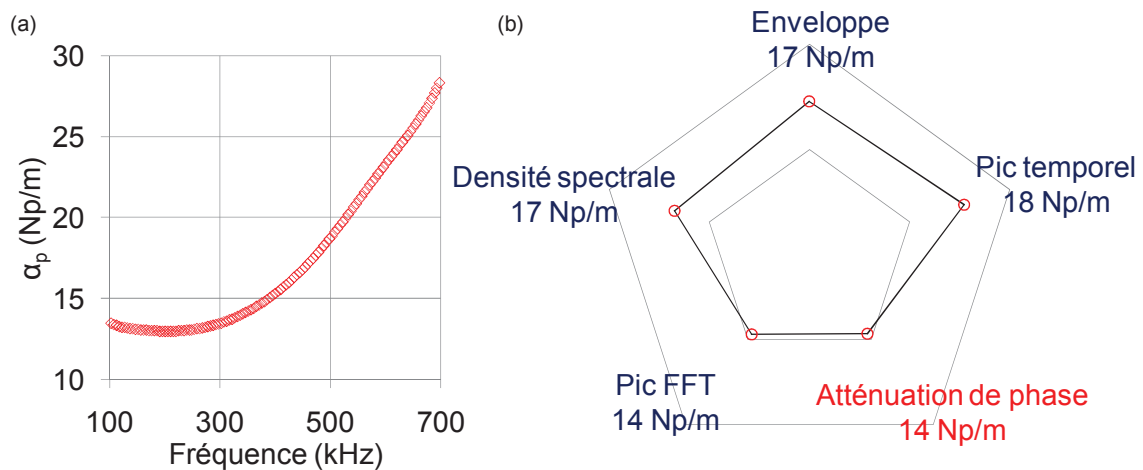


Figure IV. 13 : (a) Facteur d'atténuation de phase des ondes de compression à -10°C (b) Comparaison des méthodes de détermination du facteur d'atténuation des ondes de compression à -10°C

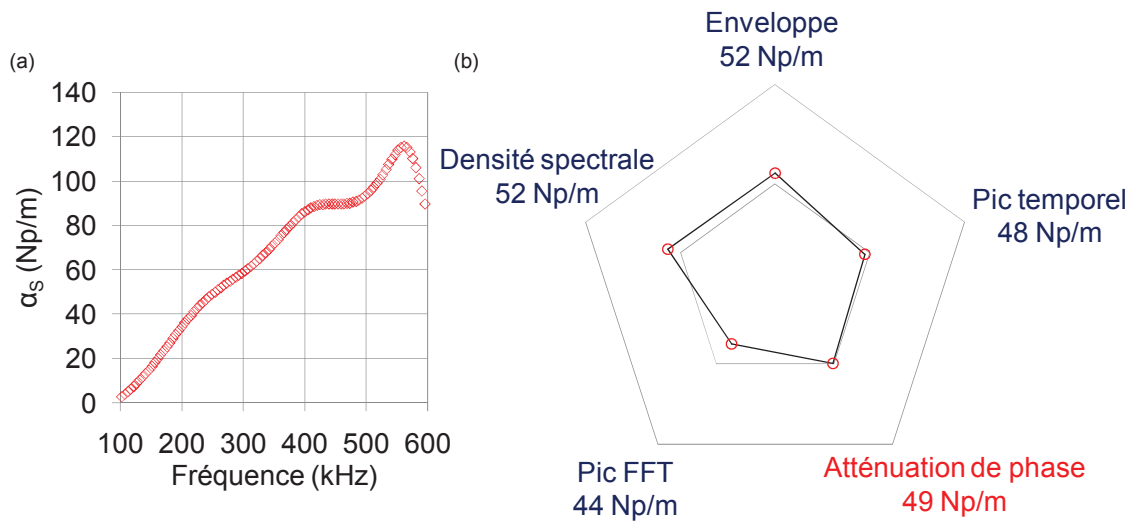


Figure IV. 14 : (a) Facteur d'atténuation de phase des ondes de cisaillement à -10°C (b) Comparaison des méthodes de détermination du facteur d'atténuation des ondes de cisaillement à -10°C

III - 3 - Représentation des résultats

Les grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes peuvent alors faire l'objet d'une représentation en termes isothermes et d'isochrones afin de juger de leurs susceptibilités

thermique et cinétique. Ces résultats sont présentés sur de plus large gamme fréquentielle en annexe A - VI.

III - 3 - 1 - Isothermes des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes

La Figure IV. 15 et la Figure IV. 16 présentent respectivement les isothermes des vitesses de phase et du facteur d'atténuation pour les ondes de compression et de cisaillement. Ces isothermes mettent en évidence la thermo-sensibilité de la vitesse de phase et du facteur d'atténuation des ondes. L'étude de l'évolution de la vitesse de phase en fonction de la fréquence ne montre aucune loi en particulier ce qui se montre en accord avec la littérature [Bourbié, 1986].

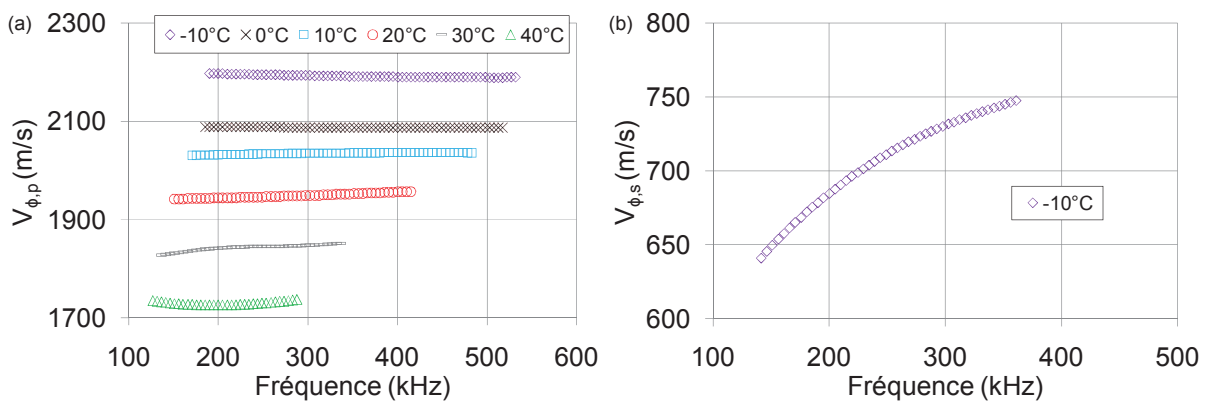


Figure IV. 15 : Isothermes des vitesses de phase des signaux de compression (a) et de cisaillement (b) sur leurs bandes passantes

Par contre, la Figure IV. 16 montre que le facteur d'atténuation expérimental sur les bandes passantes d'analyses pour les deux types d'ondes et pour toutes les températures d'essais répond à une régression linéaire en fonction de la fréquence avec des coefficients de détermination plutôt satisfaisants. Par ailleurs, on remarque que les valeurs de l'isotherme du facteur d'atténuation des ondes de compression à 40°C ne concordent pas avec les autres isothermes, néanmoins la tendance linéaire semble correcte. Ce dysfonctionnement peut être expliqué par un faible rapport signal sur bruit pour la température de 40°C comme le rapporte la Figure IV. 2.

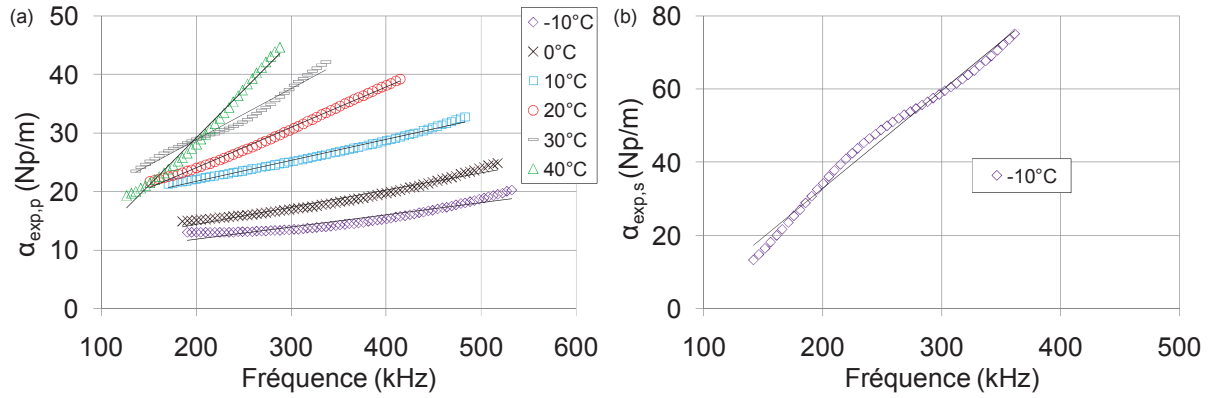


Figure IV. 16 : Isothermes du facteur d'atténuation des signaux de compression (a) et de cisaillement (b) sur leurs bandes passantes

L'évolution linéaire du facteur d'atténuation expérimental en fonction de la fréquence s'explique par le fait que l'atténuation est un phénomène qui résulte de la combinaison de plusieurs mécanismes [Bodian, 2011] [Tie, 2010] qui sont l'absorption, la diffusion et l'étalement du faisceau ultrasonore. Au chapitre II, nous avons montré que les dimensions géométriques des éprouvettes permettaient de s'affranchir du phénomène d'atténuation causé par l'étalement géométrique et que le facteur d'atténuation expérimental ne pouvait être dû qu'à l'absorption par le milieu et la diffusion de l'onde par les hétérogénéités. L'équation IV. 2 déjà présentée dans le chapitre I exprime l'atténuation par rapport au domaine de diffusion [Chekroun, 2008] [Biltugay, 1989] déterminé en fonction de la longueur d'ondes comparée au diamètre des hétérogénéités du matériau.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Rayleigh lorsque } \lambda \gg D, \alpha(f) = a_1 f + a_2 D^3 f^4 \\ \text{Stochastique lorsque } \lambda \approx D, \alpha(f) = b_1 f + b_2 D f^2 \\ \text{Diffusion lorsque } \lambda \ll D, \alpha(f) = c_1 f + \frac{c_2}{D} \end{array} \right. \quad (\text{Eq IV. 2})$$

Pour un bitume, il est possible de réaliser une granulométrie avec un granulomètre laser qui donne un diamètre moyen des particules de l'ordre du micromètre. La Figure IV. 17 montre que les longueurs d'ondes en jeu dans l'essai ultrasonore sont bien supérieures aux hétérogénéités présentes dans le bitume. Le bitume peut donc être considéré comme un

matériau homogène à l'échelle des longueurs d'ondes des ondes ultrasonores et la part d'atténuation causée par la dispersion de l'onde peut alors être considérée comme nulle.

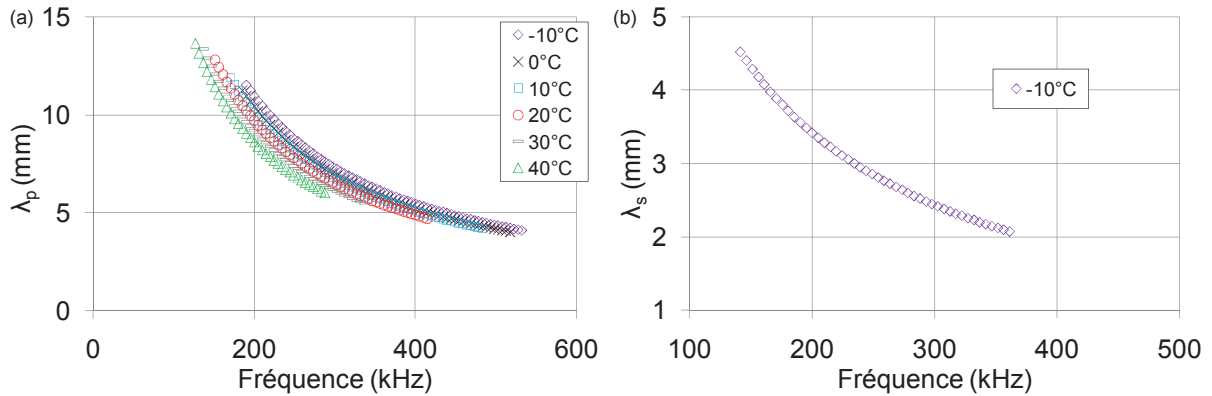


Figure IV. 17 : Longueur d'onde des signaux de compression (a) et de cisaillement (b) sur leurs bandes passantes

Ainsi, l'équation IV. 2 se résume à un seul et unique terme (Eq IV. 2) indépendant des domaines de diffusion :

$$\alpha(f) = af \quad (\text{Eq IV. 3})$$

Ces relations linéaires (Figure IV. 16) pour l'évolution de l'atténuation en fonction de la fréquence correspondent au mécanisme d'absorption qui combine les phénomènes de conduction thermique, de frottement visqueux et de relaxation [Bennamane, 2010].

La Figure IV. 18 (a) montre l'évolution du coefficient directeur « a » de l'équation IV. 3 en fonction de la température pour les ondes de compression. Le coefficient directeur correspond au rapport α/f et traduit la sensibilité cinétique du facteur d'atténuation. Celui-ci est exprimé en s.m^{-1} . On constate que la sensibilité cinétique du facteur d'atténuation augmente de manière exponentielle avec la température. Sur la Figure IV. 9 qui présente le déphasage des

signaux en fonction de la fréquence, on voit également que l'évolution de celui-ci est également réponde à une régression linéaire. Il est alors possible d'étudier aussi la sensibilité cinétique du déphasage des signaux qui s'exprime en en s.rad. On observe sur la Figure IV. 18 (b) que l'évolution en fonction de la température du déphasage des ondes de compression est également linéaire.

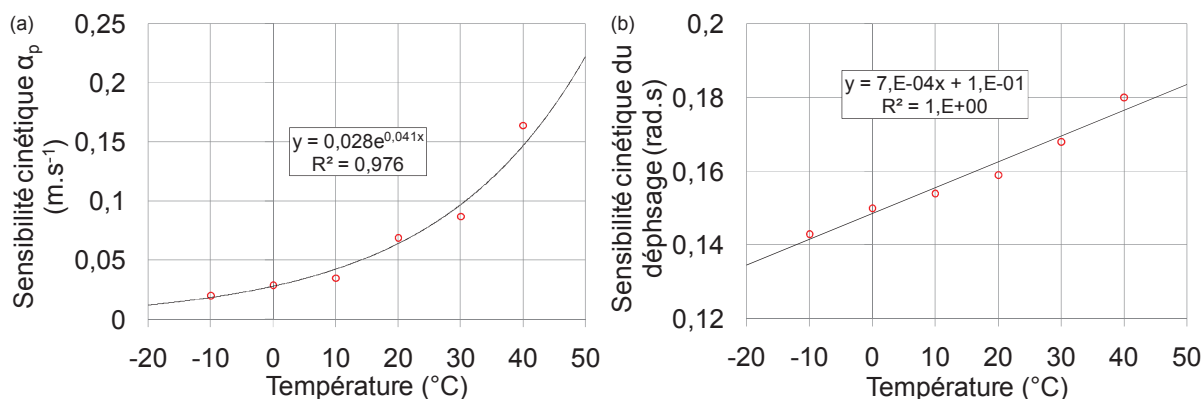


Figure IV. 18 : Evolution de la sensibilité cinétique en fonction de la température (a) du facteur d'atténuation (b) du déphasage

III - 3 - 2 - Isochrones des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes

La Figure IV. 19 présente les isochrones de vitesse de phase et du facteur d'atténuation pour la fréquence de 300 kHz (fréquence présente dans les bandes passantes des signaux pour toutes les températures d'essais).

On voit tout d'abord que la vitesse de phase (Figure IV. 19 (a)) et le facteur d'atténuation (Figure IV. 19 (b)) évoluent de manière linéaire en fonction de la température avec des coefficients de détermination satisfaisants alors que d'après la prédiction des paramètres de propagation en fonction de la température présentée au chapitre III, ce n'est pas le cas. Ceci peut être expliqué par le fait que pour la prédiction théorique le coefficient de Poisson est pris constant alors que dans la réalité celui-ci varie en fonction de la température pour une même fréquence [Di Benedetto, 2009].

Auparavant, nous avons montré que le facteur d'atténuation expérimental était causé uniquement par la viscosité du matériau. Ainsi, la Figure IV. 19 (b) montre l'évolution en

fonction de la température du facteur d'atténuation expérimental et de la viscosité Newtonienne du matériau obtenue avec le modèle rhéologique 2S2P1D. On constate alors que le facteur d'atténuation et la viscosité Newtonienne du matériau évoluent de manière inverse avec l'augmentation de la température. En effet, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la viscosité du matériau [Nita, 2011] [Schaschke, 2013], il y a donc une augmentation du facteur d'atténuation [Bourbié, 1986] causée par absorption (effet visqueux) du matériau.

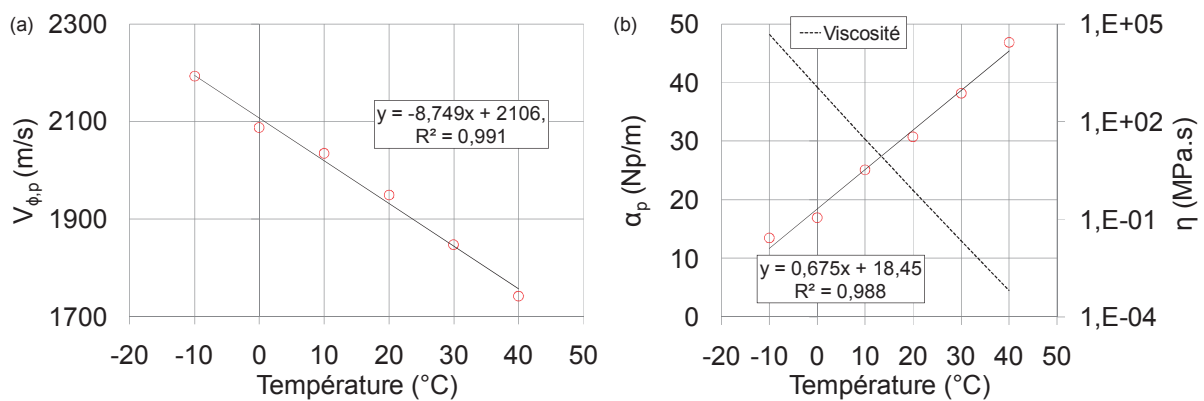


Figure IV. 19 : Isochrones à 300 kHz de la vitesse de phase des ondes P (a) du facteur d'atténuation des ondes P et évolution de la viscosité Newtonienne (b)

Une relation entre le facteur d'atténuation expérimental et la viscosité Newtonienne modélisée par le 2S2P1D est présentée sur la Figure IV. 20 (a). On constate que le facteur d'atténuation diminue suivant une loi logarithmique avec l'augmentation de la viscosité Newtonienne du matériau avec un coefficient de détermination satisfaisant. Une relation linéaire est aussi présentée en Figure IV. 20 (b) entre le facteur d'atténuation expérimental et le temps caractéristique τ , qui est une fonction de la température et qui sert au calage des modèles rhéologiques.

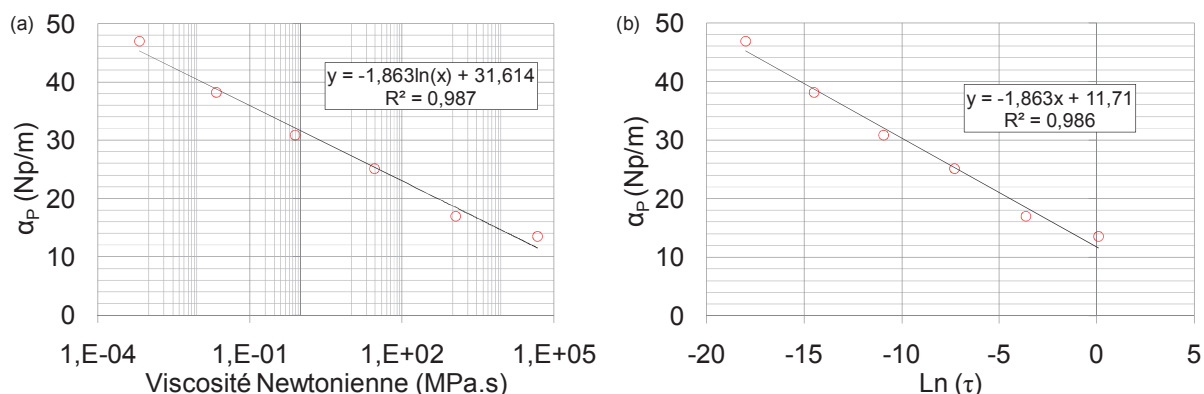


Figure IV. 20 : Evolution du facteur d'atténuation expérimental des ondes P (a) en fonction de la viscosité Newtonienne (b) en fonction du temps caractéristique τ

Les deux lois déterminées des représentations de la Figure IV. 20, permettent d'exprimer le paramètre β , qui est une constante sans dimension et qui sert au calage des modèles rhéologiques, en fonction du facteur d'atténuation expérimental (Eq IV. 4). Ce paramètre caractérise le comportement visqueux pur des bitumes à haute température. En considérant E_{00} nul, ce qui est vrai pour les bitumes, la pente de la courbe maîtresse de la norme du module tend vers 1 lorsque la fréquence tend vers 0. Lorsque β diminue, cette pente tend plus rapidement vers 1. Par contre, une valeur plus élevée de β induit une viscosité et un module complexe plus élevé [Clec'h, 2010].

$$\beta = \frac{1}{(E_0 - E_{00})} e^{(A \cdot \alpha(T) + B)} \quad (\text{Eq IV. 4})$$

avec : A et B : des constantes (dans notre cas, respectivement égales à 0 et 10,69) ;

E_0 : module vitreux quand $\omega\tau \rightarrow \infty$;

E_{00} : module statique quand $\omega\tau \rightarrow 0$;

$\alpha(T)$: facteur d'atténuation expérimental à une température donnée

Le fait que la constante A soit nulle induit que β est constant quelle que soit la température et la fréquence. La Figure IV. 21 montre la prédiction du paramètre en fonction de la fréquence

pour toutes les températures d'essais. On constate que la valeur est relativement proche de la valeur prise pour le calage du modèle rhéologique 2S2P1D ($\beta=70$).

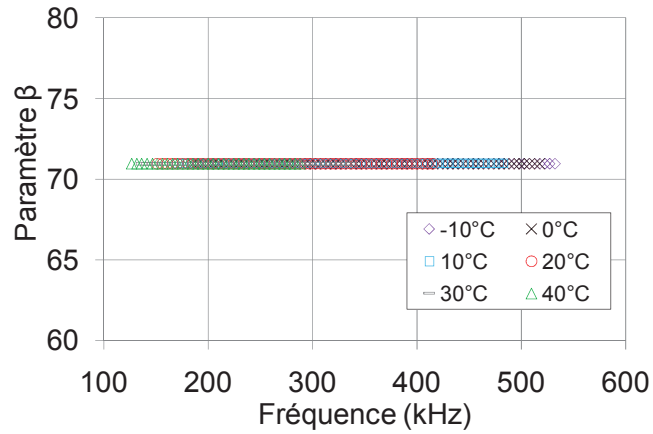


Figure IV. 21 : Prédiction du paramètre β avec le facteur d'atténuation expérimental en fonction de la fréquence et de la température

IV - Détermination des caractéristiques mécaniques à partir des mesures ultrasonores

En s'appuyant sur les équations de propagation d'ondes présentées au chapitre II, les caractéristiques mécaniques du bitume sont déterminées à l'aide des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes de compression et de cisaillement. Les hypothèses de propagation d'onde dans un milieu élastique et viscoélastique sont comparées et discutées.

IV - 1 - Détermination de la plage fréquentielle d'analyse

Avant toute analyse, il est nécessaire de définir la plage fréquentielle d'analyse. Pour cela, les bandes passantes ont été définies pour un type d'onde enregistrée à deux distances de propagation différentes. Seulement, la détermination des caractéristiques mécaniques nécessite l'utilisation des ondes de compression et de cisaillement notamment pour le calcul du coefficient de Poisson. De plus, afin d'éviter des erreurs due à l'utilisation de grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes déterminées à des fréquences différentes comme soulignées dans la littérature [Mounier, 2012], il est nécessaire de déterminer les valeurs de vitesses et de facteur d'atténuation sur des plages fréquentielles identiques pour les deux types d'ondes. La Figure IV. 22 montre, pour la température de -10°C , que les bandes passantes des ondes de compression et de cisaillement issues de la Figure IV. 7 se chevauchent sur une plage fréquentielle allant de 190 kHz à 370 kHz. Les caractéristiques mécaniques du matériau sont donc calculées sur cet intervalle de fréquence.

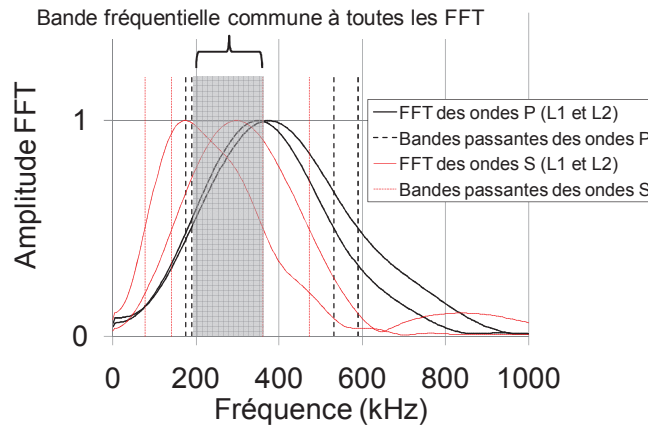


Figure IV. 22 : Chevauchement des bandes passantes des ondes de cisaillement et des ondes de compression à la température de -10°C en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur

IV - 2 - Coefficient de Poisson

La propagation des ondes de compression et de cisaillement permet la détermination du coefficient de Poisson. Le bitume ayant un comportement mécanique viscoélastique, ses caractéristiques mécaniques peuvent être exprimées comme des quantités complexes où la partie réelle représente une réponse instantanée et la partie imaginaire un déphasage ou de l'énergie dissipée [Lakes, 2006]. Le coefficient de Poisson complexe ν^* s'écrit donc suivant l'équation IV. 5 :

$$\nu^* = \nu_1 + i\nu_2 \quad (\text{Eq IV. 5})$$

Dans cette équation, ν_1 est la déformation transversale instantanée et ν_2 correspond à la déformation transversale différée.

Deux hypothèses sur le comportement mécanique du matériau sont faites : l'hypothèse d'un comportement mécanique élastique (Eq II. 8) utilisant uniquement la vitesse de propagation des ondes ou une hypothèse viscoélastique (Eq II. 22) mêlant également le facteur d'atténuation visqueux des ondes. La Figure IV. 23 (a) présente les coefficients de Poisson déterminés suivant les deux hypothèses présentées sur la bande passante des signaux.

Quelle que soit l'hypothèse employée, l'ordre de grandeur du coefficient de Poisson est en accord avec les valeurs de littérature [Nguyen, 2007] qui précisent qu'à l'état vitreux les valeurs du coefficient de Poisson varient entre 0,3 et 0,4 et à l'état visqueux le bitume devenant incompressible, sa valeur tend vers 0,5. De plus, on constate une diminution de la valeur du coefficient de Poisson en fonction de la fréquence.

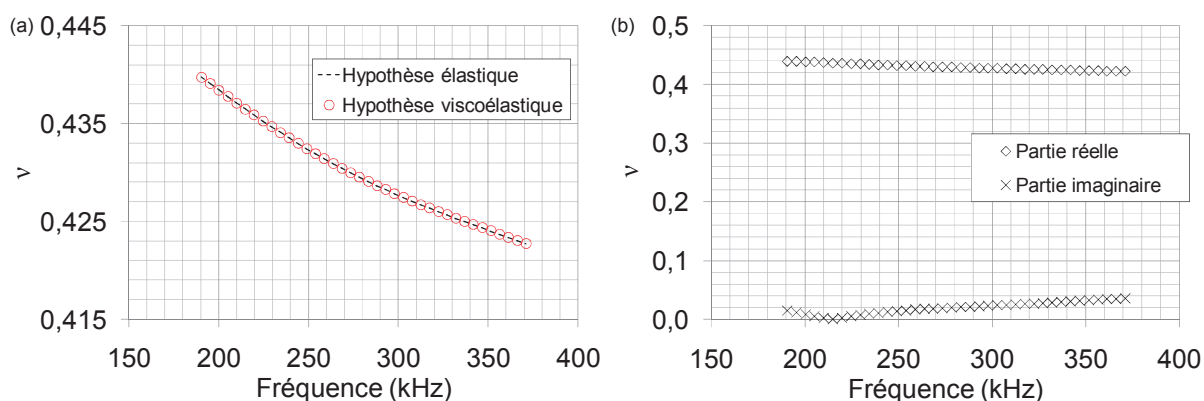


Figure IV. 23 : (a) Comparaison du coefficient de Poisson déterminé selon les hypothèses élastique et viscoélastique (b) Partie réelle ν_1 et imaginaire ν_2 du coefficient de Poisson complexe ν^*

Toutefois, on constate qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux hypothèses de comportement mécanique sur cette gamme de fréquences (190 kHz à 370 kHz) et de température (-10°C). La Figure IV. 23 (b) montre l'évolution de la partie réelle (Eq II. 23) et imaginaire (Eq II. 24) du coefficient de Poisson en fonction de la fréquence. La partie imaginaire se montre alors négligeable devant la partie réelle comme l'on déjà fait remarquer des études précédentes sur des matériaux viscoélastiques [Hull, 2001] [Benatar, 2003]. Le coefficient de Poisson pour un bitume peut donc être considéré comme réel et l'équation IV. 5 devient comme présenté par [Madjadoumbaye, 2012] :

$$\nu = \nu_1 \quad (\text{Eq IV. 6})$$

Une fois les valeurs du coefficient de Poisson déterminées sur leur plage fréquentielle d'étude, il est alors possible de les injecter dans les équations de prédiction des valeurs des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes. La Figure IV. 24 montre une comparaison entre les valeurs théoriques et expérimentales des grandeurs caractéristiques de propagation. Trois points A, B et C de fréquences respectives 220, 290 et 370 kHz sont positionnés afin de quantifier les différences entre les données expérimentales et théoriques.

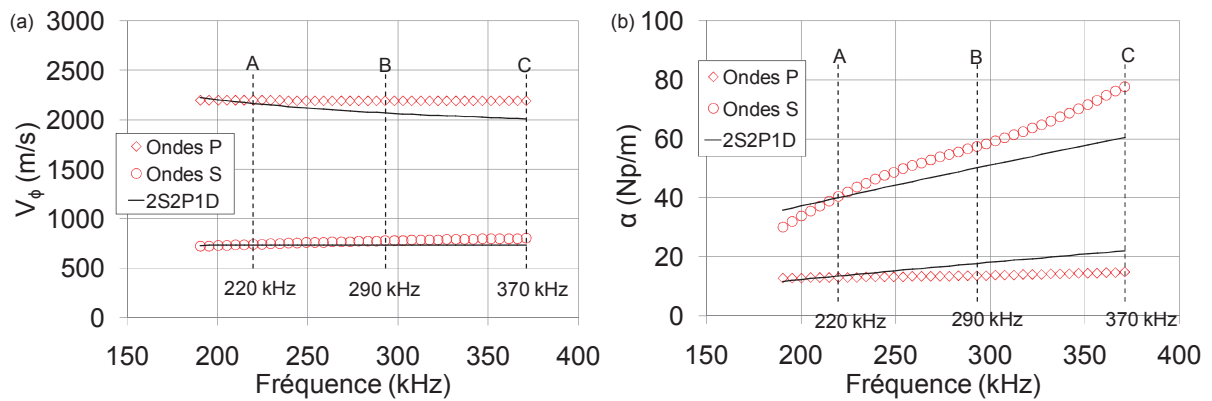


Figure IV. 24 : Comparaison des données expérimentales avec la modélisation (a) des vitesses de phases (b) et du facteur d'atténuation

	Point	Fréquence (kHz)	Vitesse expérimentale (m/s)	Vitesse 2S2P1D (m/s)	Différence par rapport au 2S2P1D (%)
Ondes P	A	220	2194	2165	1,33
	B	290	2192	2069	5,94
	C	370	2191	2009	9,05
Ondes S	A	220	740	730	1,37
	B	290	776	732	6,01
	C	370	801	735	8,97

Tableau IV. 1 : Comparaison des vitesses de phase des ondes P et S par rapport au modèle 2S2P1D

Le Tableau IV. 1 montre que pour la vitesse de phase, la différence entre l'expérimental et la théorie varie de 1,30% pour le point A à 9% pour le point C pour les deux types d'ondes. Par contre, le Tableau IV. 2 montre que le facteur d'atténuation diverge de 1,20% (point A) jusqu'à environ 29% (point C) pour les ondes de cisaillement et de 3,50% (point A) à 50% (point C) pour les ondes compression. Ces différences peuvent être expliquées par le fait que la transformée de Fourier du signal de cisaillement reçu à la distance L_2 comporte des fréquences ne provenant pas des ondes de cisaillement (Figure IV. 25 (a)). En effet, bien que les transducteurs utilisés soient des transducteurs de cisaillement, les ondes émises ne sont pas uniquement transversales. Il reste une part résiduelle d'ondes de compression. La Figure IV. 25 (b) présente les transformées de Fourier des signaux sur lesquels sont placées les points A, B et C. Ainsi, on peut constater que le pic fréquentiel parasite apparaît à partir du point B et peut correspondre à une onde de compression réfléchie. Ce pic fréquentiel parasite entraîne donc des erreurs lors de l'analyse fréquentielle ce qui explique la divergence entre les valeurs théoriques et expérimentales à partir du point B.

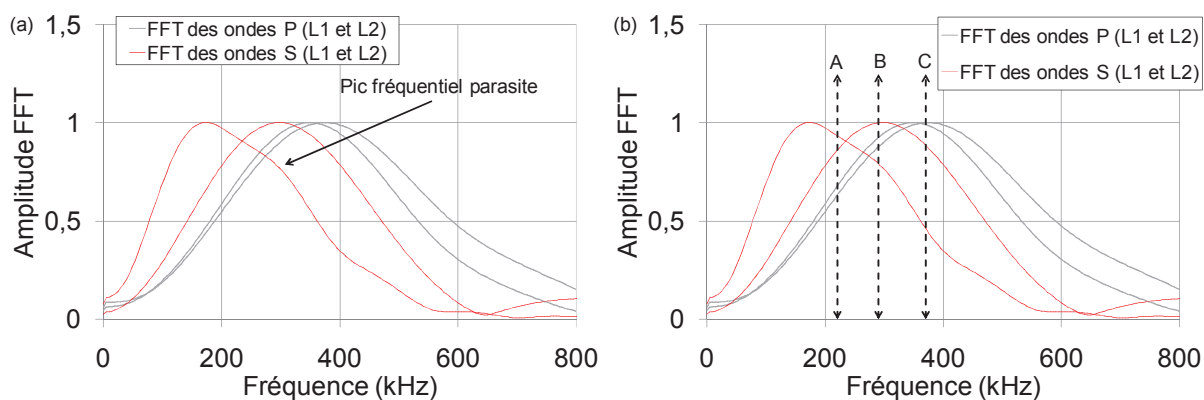


Figure IV. 25 : (a) Chevauchement des transformées de Fourier des deux types d'ondes à la température de -10°C (b) présentation des points A, B et C sur les transformées de Fourier

	Point	Fréquence (kHz)	Facteur d'atténuation expérimental (m/s)	Facteur d'atténuation 2S2P1D (m/s)	Différence par rapport au 2S2P1D (%)
Ondes P	A	220	13,03	13,51	3,55
	B	290	13,69	17,78	23,01
	C	370	14,83	22,11	49,08
Ondes S	A	220	40,57	40,06	1,26
	B	290	57,43	50,12	14,58
	C	370	77,77	60,45	28,65

Tableau IV. 2 : Comparaison du facteur d'atténuation des ondes P et S par rapport au modèle 2S2P1D

IV - 3 - Détermination des modules complexes

Les modules de cisaillement et d'Young peuvent être déterminés, tout comme le coefficient de Poisson, suivant une hypothèse élastique (Eq II. 6 et II. 7) ou viscoélastique (Eq II. 15 et II. 16). La Figure IV. 26 montre une comparaison de ces deux hypothèses. Pour le calcul d'un module à haute fréquence, les hypothèses d'un comportement mécanique élastique et viscoélastique donnent des résultats similaires. Cela s'explique par le fait que le terme α_{vis}/ω tend vers zéro à hautes fréquences dans l'équation viscoélastique (Eq II. 15), ainsi celle-ci devient similaire à l'équation élastique (Eq II. 6).

La Figure IV. 27 et la Figure IV. 28 présentent respectivement les modules de cisaillement et de compression déterminés expérimentalement sur la bande passante des signaux avec deux zones d'erreurs : l'une prenant en compte les erreurs expérimentales sur la détermination des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes, l'autre une variation de 5% de la valeur de la masse volumique prenant en compte la variation de celle-ci en fonction de la température [Guan, 2013]. Tout d'abord, on voit que les modules ultrasonores sont obtenus pour des fréquences non atteintes par la translation des données de l'essai mécanique. La comparaison des résultats ultrasonores nécessite donc une modélisation à haute fréquence du comportement du matériau via un modèle rhéologique.

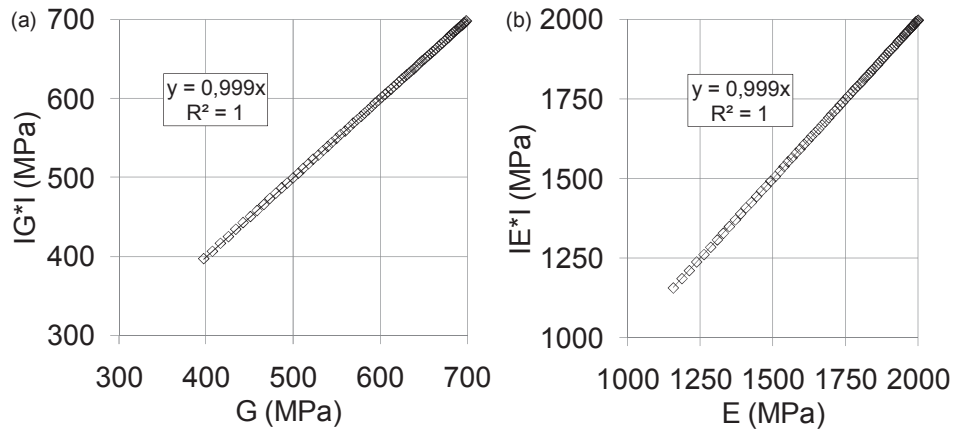


Figure IV. 26 : Comparaison entre l'hypothèse élastique et viscoélastique pour la détermination des modules ultrasonores (a) de cisaillement (b) d'Young

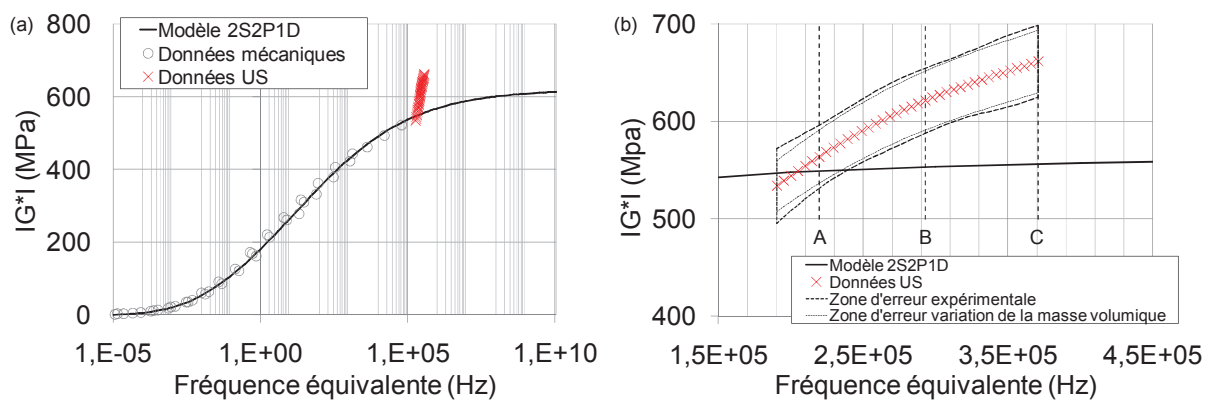


Figure IV. 27 : (a) Module de cisaillement complexe ultrasonore du bitume 35/50 à la température de référence de -10°C (b) zoom de la figure avec représentation des zones d'erreur sur la détermination du module ultrasonore

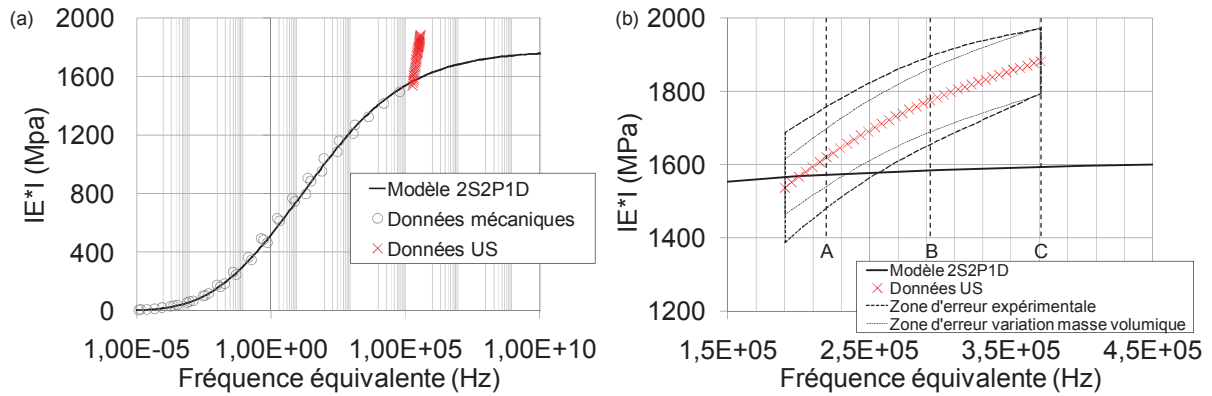


Figure IV. 28 : (a) Module d'Young complexe ultrasonore du bitume 35/50 à la température de référence de -10°C (b) zoom de la figure avec représentation des zones d'erreur sur la détermination du module ultrasonore

Les modules déterminés sont en accord avec des modules calculés à hautes fréquences sur un bitume aux caractéristiques similaires [Buannic, 2012]. L'écart entre les données expérimentales et la modélisation atteint 18% (Tableau IV. 3 et Tableau IV. 4) dans les zones de plus hautes fréquences (370 kHz). Cette différence peut être attribuée à la vitesse de propagation sachant que l'on a montré avec la Figure IV. 26 que le calcul de module à haute fréquence ne dépendait pas du facteur d'atténuation des ondes. Ainsi, une différence d'environ 9% sur la détermination de la vitesse de propagation des ondes entraîne une différence d'environ 18% sur un calcul de module.

Point	Fréquence (kHz)	$ G^* $ expérimental (MPa)	$ G^* $ 2S2P1D (MPa)	Différence par rapport au 2S2P1D (%)
A	220	563	549	2,55
B	290	621	553	12,29
C	370	661	556	18,88

Tableau IV. 3 : Comparaison des modules de cisaillement complexe $|G^*|$ par rapport au modèle rhéologique 2S2P1D

Point	Fréquence (kHz)	$ E^* $ expérimental (MPa)	$ E^* $ 2S2P1D (MPa)	Différence par rapport au 2S2P1D (%)
A	220	1619	1572	2,98
B	290	1774	1583	12,06
C	370	1882	1593	18,14

Tableau IV. 4 : Comparaison des modules d'Young complexe $|E^*|$ par rapport au modèle rhéologique 2S2P1D

IV - 4 - Représentation des résultats dans les plans complexes

Au paragraphe précédent, on a montré que l'hypothèse viscoélastique dans le cadre d'un calcul de module à hautes fréquences ne présente pas de différences marquantes avec l'hypothèse d'un comportement élastique. Par contre, celle-ci montre un réel intérêt pour la détermination des caractéristiques viscoélastiques du matériau en utilisant les équations Eq II. 19 à Eq II. 21. Il est alors possible de déterminer les réponses instantanées (G_1 ou E_1) et différées (G_2 ou E_2) du matériau avec les grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes.

La Figure IV. 29 (a) et la Figure IV. 30 (a) montrent les résultats ultrasonores représentés dans les plans complexes. On voit que les données ultrasonores sont placées dans des zones non atteintes par les essais mécaniques, la comparaison des résultats ultrasonores nécessite toujours une modélisation du comportement mécanique des matériaux.

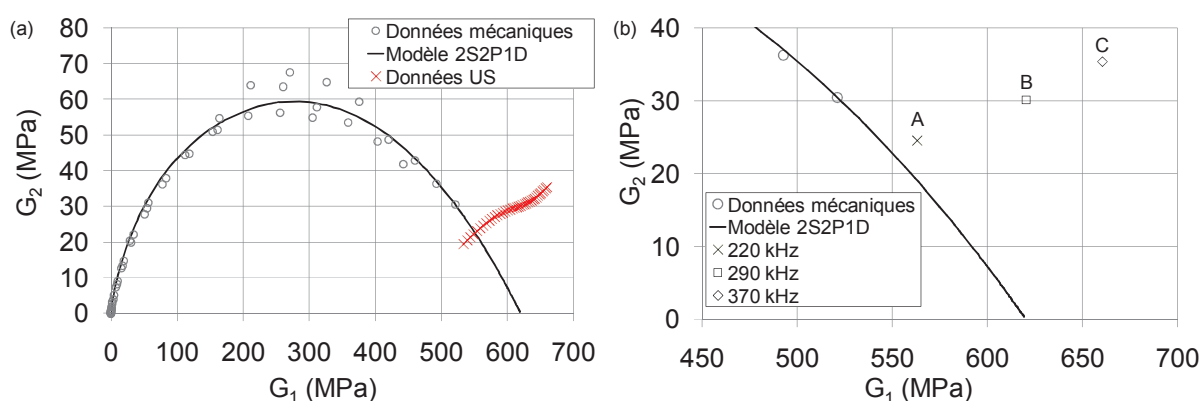


Figure IV. 29 : Représentation des résultats ultrasonores dans le plan complexe (a) de Cole – Cole (b) zoom de la représentation

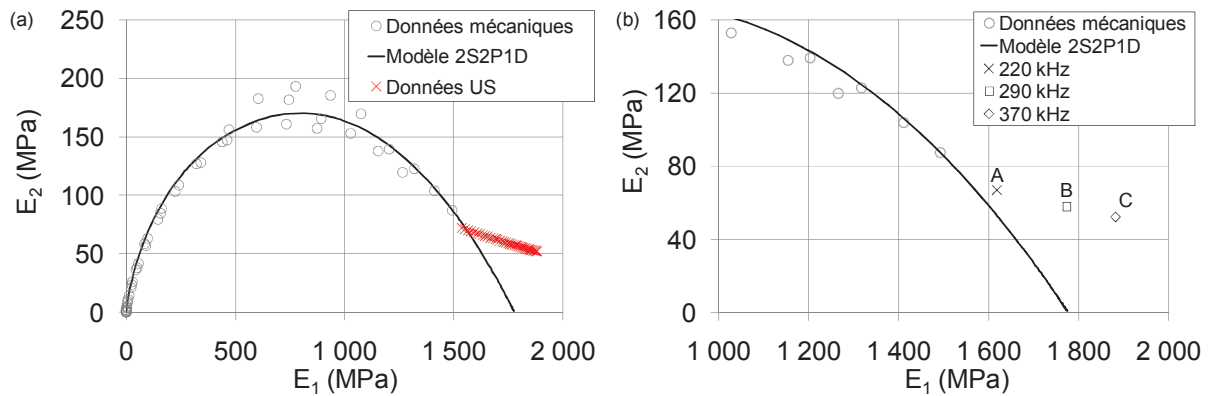


Figure IV. 30 : Représentation des résultats ultrasonores dans le plans complexe (a) de Cole – Cole (b) zoom de la représentation

Les résultats se montrent relativement en accord avec la modélisation, cependant les zooms des représentations (Figure IV. 29 (b) et la Figure IV. 30 (b)) montrent la dispersion des données en fonction des trois points A, B et C. Il apparaît que le point A est toujours le plus proche de la modélisation et que le point C qui présente le plus de différences avec la théorie d'un point de vue vitesse de propagation et facteur d'atténuation visqueux est le plus éloigné de la modélisation (Tableau IV. 5 et Tableau IV. 6).

Point	Fréquence (kHz)	G_1 expérimental (MPa)	G_1 2S2P1D (MPa)	Différence par rapport au 2S2P1D (%)
A	220	563,32	548,51	2,71
B	290	620,61	552,59	12,31
C	370	660,53	555,83	18,83
Point	Fréquence (kHz)	G_2 expérimental (MPa)	G_2 2S2P1D (MPa)	Différence par rapport au 2S2P1D (%)
A	220	24,51	23,27	5,33
B	290	30,10	22,12	36,07
C	370	35,35	21,19	66,82

Tableau IV. 5 : Comparaison des parties réelle G_1 et imaginaire G_2 du module complexe de cisaillement avec le modèle rhéologique 2S2P1D

Point	Fréquence (kHz)	E_1 expérimental (MPa)	E_1 2S2P1D (MPa)	Différence par rapport au 2S2P1D (%)
A	220	1617,86	1570,41	3,02
B	290	1773,94	1582,64	12,08
C	370	1881,54	1591,92	18,19
Point	Fréquence (kHz)	E_2 expérimental (MPa)	E_2 2S2P1D (MPa)	Différence par rapport au 2S2P1D (%)
A	220	67,08	66,65	0,64
B	290	57,91	63,55	8,87
C	370	52,47	60,70	13,55

Tableau IV. 6 : Comparaison des parties réelle E_1 et imaginaire E_2 du module complexe d'Young avec le modèle rhéologique 2S2P1D

L'application de l'hypothèse de propagation viscoélastique permet également la détermination de l'angle de phase du matériau comme le montre la Figure IV. 31. Le Tableau IV. 7 montre des différences avec le modèle de prédiction allant jusqu'à 40%.

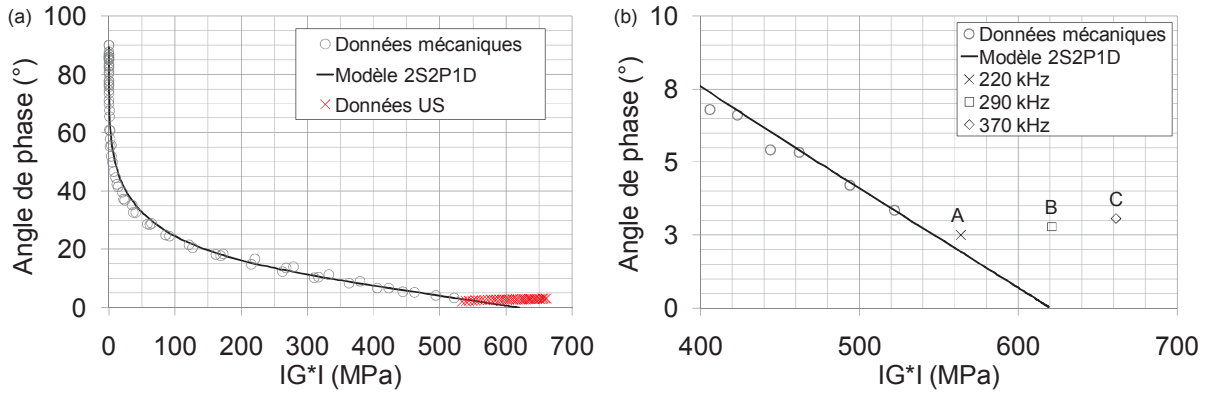


Figure IV. 31 : (a) Représentation des résultats ultrasonores avec leurs zones d'erreurs dans l'espace de Black (b) zoom de la représentation

Point	Fréquence (kHz)	Phase expérimentale (°)	Phase 2S2P1D (°)	Différence par rapport au 2S2P1D (%)
A	220	2,49	2,42	2,89
B	290	2,77	2,29	20,96
C	370	3,06	2,18	40,36

Tableau IV. 7 : Comparaison des angles de phase avec le modèle 2S2P1D

L'influence des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes sur la détermination des parties réelles et imaginaires du module de cisaillement ainsi que l'angle de phase est présentée sur la Figure IV. 32 pour le point C. Il apparaît que la différence entre la vitesse de propagation expérimentale et théorique (9%) est la cause de la différence sur la détermination de la partie réelle (18%) (Figure IV. 32 (a)) et est identique à celle du module complexe (Figure IV. 32 (b)). Ce constat est en accord avec le fait que la partie réelle du module représente la réponse élastique du matériau qui est donc uniquement dépendante de la vitesse de propagation. Par contre, la différence sur la partie imaginaire (66%) et l'angle de phase (40%) est à parties égales causée par la différence sur la détermination de la vitesse de propagation et du facteur d'atténuation des ondes.

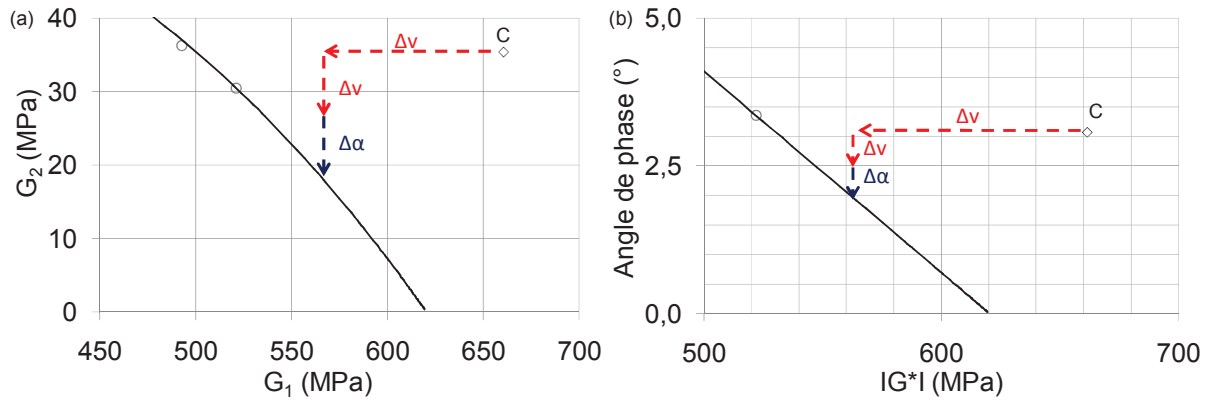


Figure IV. 32 : Influence des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes dans la détermination des parties réelles et imaginaires du module complexe ainsi que l'angle de phase

V - Conclusion

L'étude sur le bitume a porté sur la propagation d'ondes ultrasonores de compression et de cisaillement pour des variations de températures de -10°C à 40°C . Les propriétés atténuantes du matériau n'ont cependant pas permis de traiter les ondes de cisaillement pour une température supérieure à -10°C . L'étude des signaux enregistrés a montré une distorsion du signal en fonction des variations de la température. Cette distorsion du signal augmente avec la température et traduit une diminution du pic fréquentiel des signaux. Cette diminution est observable par l'étude des transformées de Fourier des différents signaux. Les transformées de Fourier permettent également de définir une bande passante commune afin de travailler avec des données ultrasonores déterminées sur une plage fréquentielle identique.

La comparaison des différentes méthodes de détermination des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes a montré que la méthode de la vitesse de phase était la plus pertinente dans le cadre de l'étude d'un matériau au comportement viscoélastique car elle permet la prise en compte de la dépendance fréquentielle de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. En effet cette méthode, contrairement aux méthodes du domaine temporel est déterminée pour une fréquence donnée (donc un déphasage donné) alors que les autres méthodes donnent une vitesse pour l'ensemble du paquet d'ondes dont la fréquence est quelconque et difficilement déterminable. Ce même constat est fait pour le facteur d'atténuation où le choix de la méthode de détermination se tourne vers celle du facteur d'atténuation de phase. Les grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes sont alors représentées en termes d'isothermes et d'isochrones. L'étude de l'évolution des isothermes du facteur d'atténuation et des longueurs d'ondes ont permis de déterminer le domaine d'atténuation des ondes dans le matériau. Ainsi, l'atténuation des ondes dans un bitume pur résulte d'un seul mécanisme qui est l'absorption, le facteur d'atténuation est donc purement visqueux. Les isochrones montrent, quant à elles, des relations linéaires de la vitesse de phase et du facteur d'atténuation en fonction de la température. Par ailleurs, il est également possible de remonter au paramètre β servant au calage des modèles rhéologiques avec des lois établies en fonction du facteur d'atténuation expérimental.

Les caractéristiques mécaniques des signaux sont alors déterminées sur la bande passante des signaux à la température de -10°C . La détermination du coefficient de Poisson a montré, en accord avec la littérature, que sa partie imaginaire pouvait être négligée et que celui-ci pouvait être considéré comme réel. Cette remarque est identique pour le calcul du module à hautes

fréquences où les deux hypothèses d'un comportement élastique et viscoélastique donnent des valeurs très similaires. Ces modules, supérieurs aux modules obtenus par les essais mécaniques, ne permettent pas d'être utilisés dans le cadre d'un dimensionnement. Par contre, il est tout à fait possible de quantifier un endommagement avec des modules ultrasonores [Buannic, 2012]. Lors de la comparaison des modules déterminés expérimentalement avec la prédiction du modèle rhéologique 2S2P1D, il est clair que seule la détermination de la vitesse de propagation conditionne les différences observées.

L'apport de l'hypothèse viscoélastique trouve un réel intérêt avec la détermination des parties réelles, imaginaires ainsi que l'angle de phase du module complexe avec les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes. L'emploi de cette hypothèse permet la représentation des caractéristiques mécaniques dans les plans complexes. Dans un premier temps, on constate que les points obtenus sont placés dans des zones non atteintes par les essais mécaniques. Cependant, les erreurs sur la détermination des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes entraînent des divergences entre certaines valeurs expérimentales et le modèle rhéologique 2S2P1D. Par contre, les valeurs en accord avec la modélisation peuvent aider à la détermination des paramètres de calibration des modèles rhéologiques k et le module vitreux (G_0 ou E_0).

Chapitre V :

Géomatériau à matrice thermo-viscoélastique : application de la méthode ultrasonore aux graves bitumes GB3 et GB5

I - Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions le potentiel de la méthode ultrasonore (appliquée au bitume 35/50) sur des matériaux hétérogènes : les graves bitumes GB3 et GB5 développées par Eiffage Travaux Publics.

Dans un premier temps, les formes d'ondes temporelles ainsi que les transformées de Fourier associées des signaux expérimentaux sont présentées. Ces représentations permettent de mettre en évidence leur thermosensibilité qui se manifeste principalement par un étalement temporel des signaux et une atténuation préférentielle des hautes fréquences.

Ensuite, les méthodes de détermination des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes sont comparées. La représentation de la vitesse de propagation et du facteur d'atténuation en termes d'isothermes et d'isochrones permet de mettre en évidence leur dépendance à la température et à la fréquence qui peut être attribuée à la matrice viscoélastique de ces matériaux. L'étude de l'évolution des isothermes du facteur d'atténuation et des longueurs d'ondes en fonction de la fréquence amène à l'identification du domaine d'atténuation des ondes dans ces matériaux hétérogènes.

Pour finir, les caractéristiques mécaniques des matériaux sont déterminées avec les grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes expérimentales. D'abord le coefficient de Poisson est étudié ainsi que ses parties réelles et imaginaires. Sa détermination permet par la suite une

comparaison entre les grandeurs de propagation théoriques et expérimentales. Cette comparaison met en évidence une différence entre les valeurs théoriques et expérimentales du facteur d'atténuation qui peut être imputée au phénomène de diffusion par les hétérogénéités. Or, pour la détermination des caractéristiques mécaniques en appliquant l'hypothèse d'une propagation d'ondes dans un milieu viscoélastique, seule la part du facteur d'atténuation causée par l'absorption du milieu est nécessaire. Ainsi, une méthode permettant de retrancher la part d'atténuation due à la diffusion de l'onde par les hétérogénéités du matériau à l'atténuation expérimentale est présentée. Par la suite, les propriétés mécaniques sont déterminées notamment les modules complexes qui sont ensuite représentés sur la courbe maîtresse des matériaux à la température de référence requise pour le dimensionnement des chaussées routière (15°C). Les parties réelles et imaginaires ainsi que l'angle de phase du module des matériaux calculés avec les données ultrasonores sont également représentés dans les plans complexes où l'importance de la correction du facteur d'atténuation expérimental est présentée. La représentation, dans le plan de Cole – Cole, permet la détermination des paramètres de calage des modèles rhéologiques k et E_0 (module vitreux).

II - Présentation des données acoustiques expérimentales

Les essais sur les graves bitumes GB3 et GB5 ont été réalisés pour des températures allant de -20°C à 40°C avec un pas de 10°C pour les ondes de compression. Les ondes de cisaillement sont fortement atténuées et les signaux s'effondrent totalement au-delà d'une température de 30°C . Les transducteurs sont excités à des fréquences différentes allant de 300 kHz à 700 kHz avec un pas de 100 kHz afin de couvrir toute la bande passante des transducteurs comme présenté dans le chapitre II. Les constats étant identiques pour les deux matériaux, seuls les résultats du matériau GB5 sont présentés sauf quand une comparaison entre les deux matériaux s'avère nécessaire.

II - 1 - Formes d'ondes expérimentales et transformées de Fourier

La Figure V. 1 et la Figure V. 2 présentent les formes d'ondes de cisaillement et de compression enregistrées pendant les essais ultrasonores pour une excitation du transducteur de 700 kHz. Ces signaux, normés dans le but d'améliorer la représentation correspondent à ceux reçus à la distance L_2 .

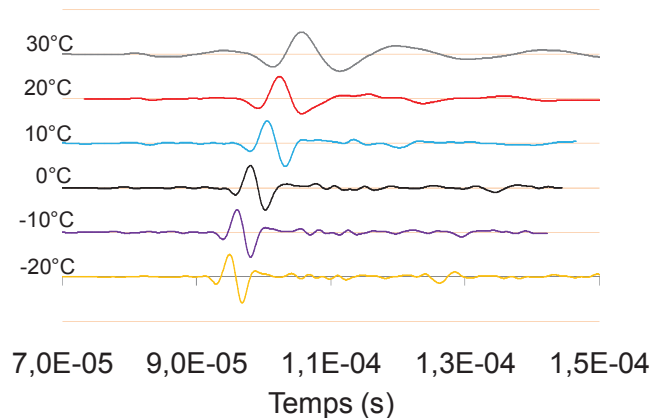


Figure V. 1 : Signaux d'ondes de cisaillement enregistrés et normés à la distance de propagation L_2 pour des températures de -20°C à 30°C et une excitation des transducteurs à 700 kHz pour le matériau GB5

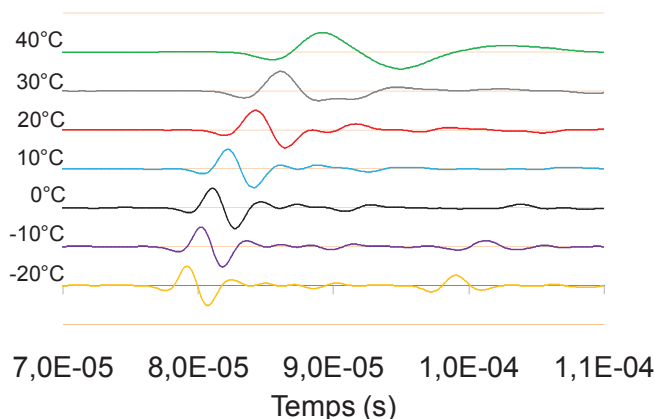


Figure V. 2 : Signaux d'ondes de compression enregistrés et normés à la distance de propagation L_2 pour des températures de -20°C à 40°C et une excitation des transducteurs à 700 kHz pour le matériau GB5

On observe dans un premier temps que pour une même température d'essai les ondes de cisaillement arrivent plus tard que celles de compression confirmant ainsi que la vitesse de propagation des ondes de cisaillement est plus faible que celles de compression. De plus, en fonction de la température, on constate une augmentation du temps d'arrivée des ondes quelle que soit le type d'ondes, et un étalement temporel des signaux. Cet étalement temporel du signal est plus prononcé à partir de la température de 20°C .

La présence d'une matrice viscoélastique dans les matériaux entraîne également une atténuation préférentielle des hautes fréquences qui augmente avec la température (Figure V. 3). Ce filtrage est également plus important pour les ondes de cisaillement, celles-ci étant plus sensibles à la viscosité du matériau [Arabani, 2009].

L'effet de la température induit également une diminution de l'amplitude des spectres de fréquences avec l'augmentation de la température.

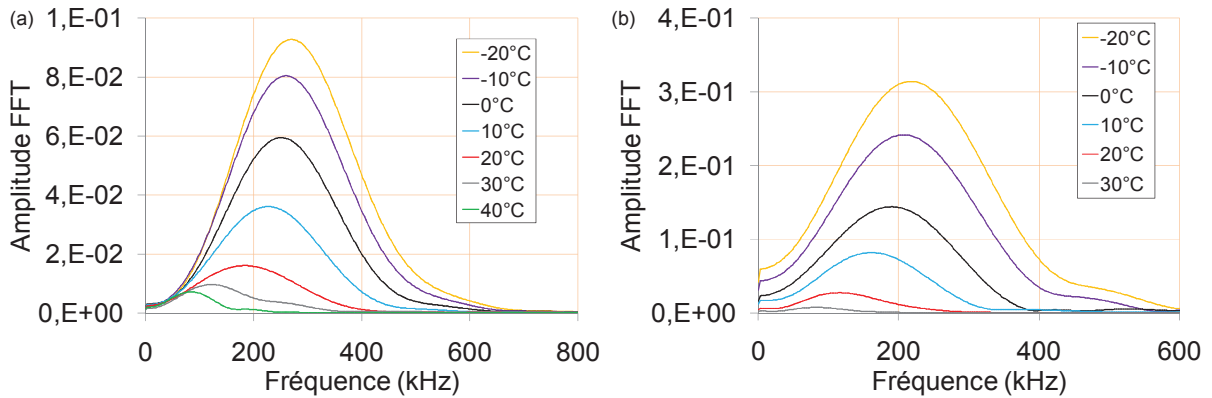


Figure V. 3 : Transformées de Fourier (a) des ondes de compression (b) des ondes de cisaillement pour une excitation du transducteur à 700 kHz aux différentes températures d'essais pour le matériau GB5

II - 2 - Atténuation préférentielle des hautes fréquences

La Figure V. 4 et Figure V. 5 montrent les signaux enregistrés aux deux distances de propagation ainsi que leurs transformées de Fourier associées respectivement pour les ondes de cisaillement et de compression à la température de 10°C. On constate en fonction de la distance de propagation une diminution de l'amplitude ainsi qu'un étalement temporel (Figure V. 4 (a) et Figure V. 5 (a)). De plus, pour les ondes de cisaillement (Figure V. 4 (a)), on peut voir qu'une onde arrive juste avant l'onde de cisaillement. Il peut s'agir d'une onde de compression qui a été diffusée par les hétérogénéités ou réfléchi par les bords du matériau.

On observe aussi sur la Figure V. 4 (b) et la Figure V. 5 (b) que la fréquence des signaux diminue avec l'augmentation de la distance de propagation [In, 2009] [Van Velsor, 2011]. Il y a donc également un filtrage fréquentiel en fonction de la distance de propagation. Ce filtrage fréquentiel se montre encore une fois plus prononcé pour les ondes de cisaillement.

Bien que les signaux n'aient pas le même pic fréquentiel en fonction de la distance de propagation, la Figure V. 4 (b) et la Figure V. 5 (b) montrent que les bandes passantes des transformées de Fourier respectives se chevauchent. Il est alors possible de définir ce chevauchement comme la plage fréquentielle d'étude de ces signaux et de définir une fréquence interspectre considérée comme la fréquence principale commune aux deux signaux.

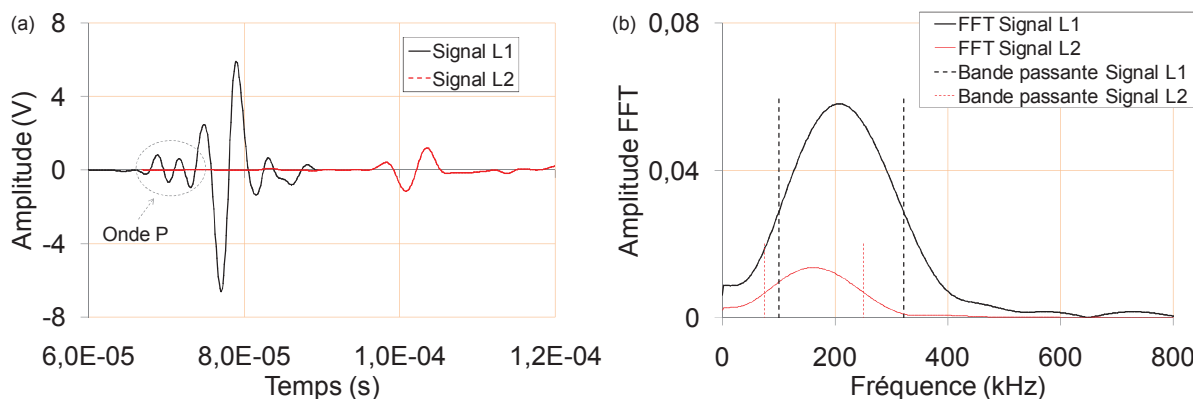


Figure V. 4 : (a) Signaux des ondes de cisaillement pour une excitation du transducteur de 700 kHz à 10°C (b) Transformées de Fourier associées aux signaux à 10°C pour le matériau GB5

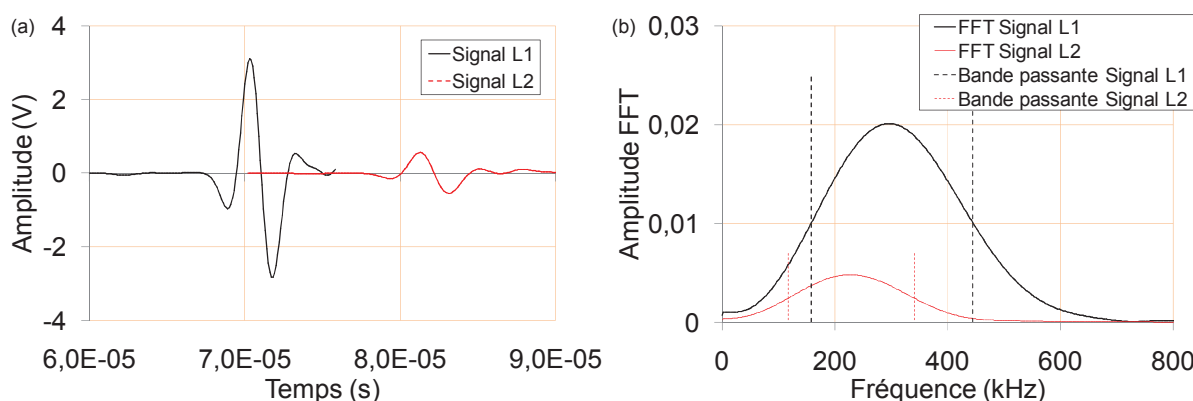


Figure V. 5 : (a) Signaux des ondes de compression pour une excitation du transducteur de 700 kHz à 10°C (b) Transformées de Fourier associées aux signaux à 10°C pour le matériau GB5

La Figure V. 6 et la Figure V. 7 présentent l'évolution des fréquences principales de chaque signal respectivement pour les ondes de compression et de cisaillement ainsi que leurs bandes passantes (zones grisées) en fonction des fréquences d'excitation du transducteur pour les deux distances de propagation L_1 et L_2 . Le filtrage fréquentiel en fonction de la distance est présent quelle que soit la fréquence d'excitation du transducteur. De plus, ce filtrage est plus important pour les hautes fréquences que les basses fréquences. Par contre, à l'encontre du

bitume, la bande passante commune des signaux reste relativement constante en fonction de la fréquence d'excitation ce qui peut être induit par la présence du squelette granulaire.

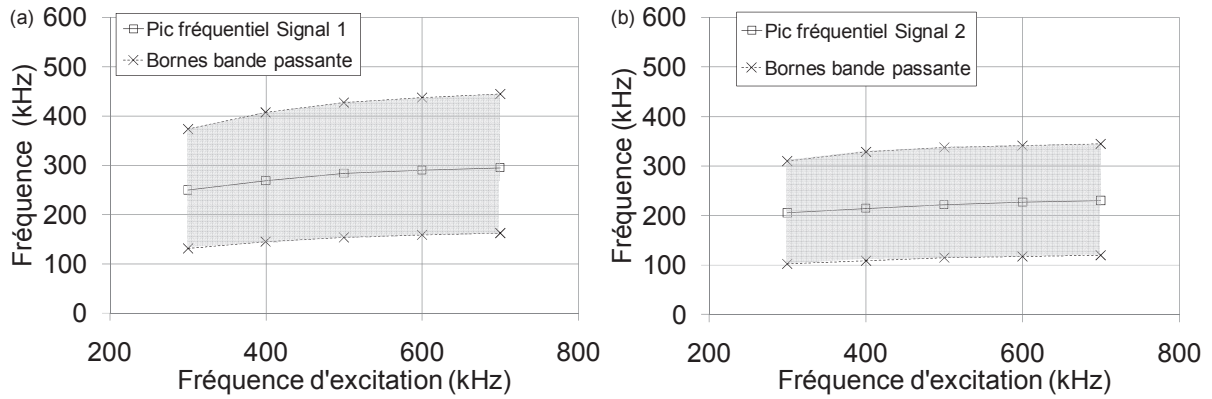


Figure V. 6 : Evolution des fréquences des signaux de compression en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de 10°C pour le matériau GB5 (a) pour la distance L_1 (b) pour la distance L_2

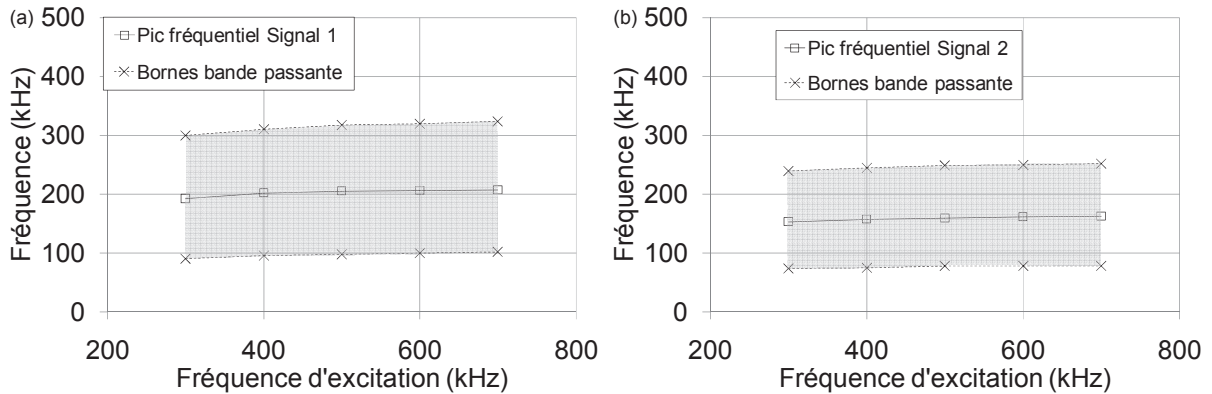


Figure V. 7 : Evolution des fréquences des signaux de cisaillement en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de 10°C pour le matériau GB5 (a) pour la distance L_1 (b) pour la distance L_2

La Figure V. 8 représente le chevauchement des bandes passantes pour les deux types d'ondes. On constate que la largeur du chevauchement est relativement constante en fonction

de la fréquence d'excitation. Cependant, avec l'augmentation de la fréquence d'excitation, celui-ci est également plus hautes fréquences.

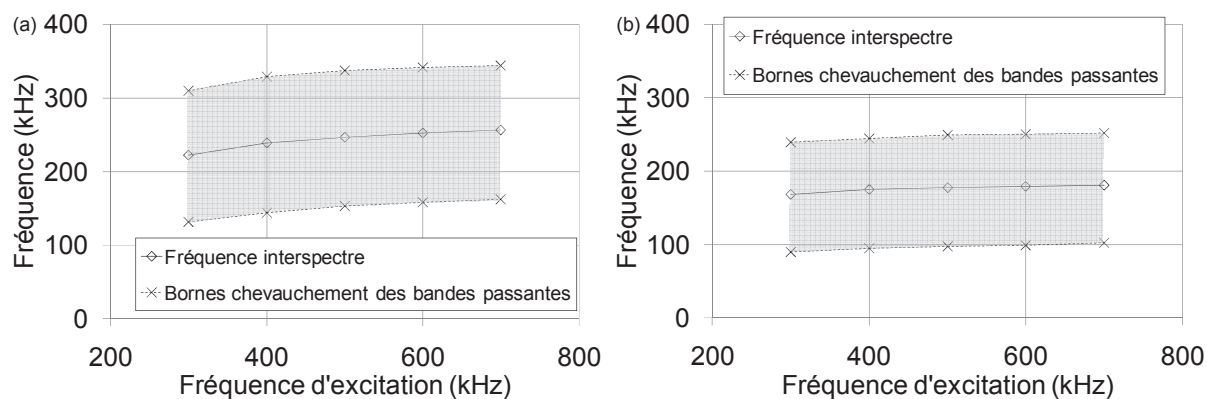


Figure V. 8 : Evolution des fréquences interspectre des signaux et des bandes passantes en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de 10°C pour le matériau GB5 (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement

Sur la Figure V. 9, la thermo-sensibilité de la bande passante est présentée. On constate une diminution de la largeur de la bande passante des signaux avec l'augmentation de la température. Les zones grisées montrent, cette fois-ci, l'atténuation fréquentielle en fonction de la température. Les hautes fréquences sont plus fortement filtrées avec l'augmentation de la température, cette atténuation préférentielle des hautes fréquences peut être imputée à la présence de la matrice viscoélastique.

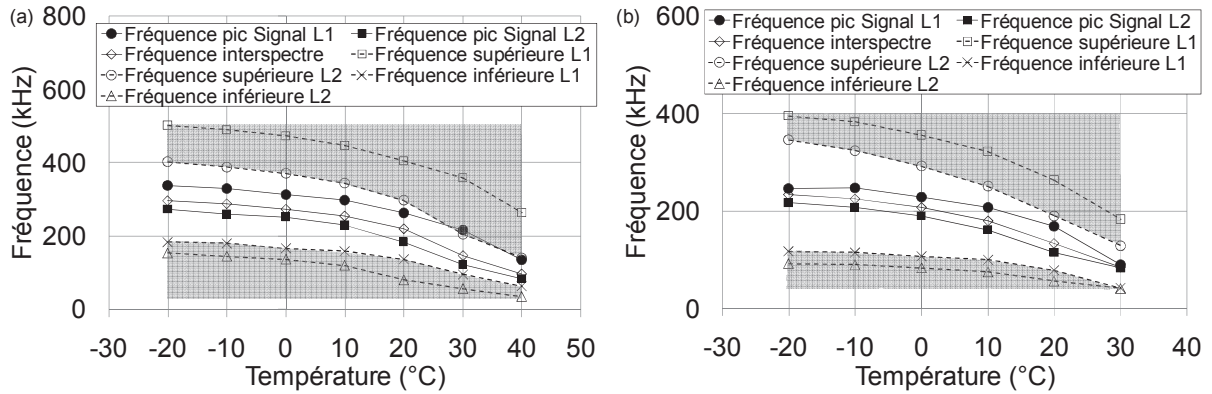


Figure V. 9 : Evolution du pic fréquentiel et de la bande passante pour une excitation de 700 kHz en fonction des températures d'essais pour le matériau GB5 pour les ondes (a) de compression (b) de cisaillement

II - 3 - Déphasage des signaux

La Figure V. 10 présente le déphasage des signaux en fonction de la température pour les deux types d'ondes sur une large plage fréquentielle et sur les bandes passantes de chaque signal.

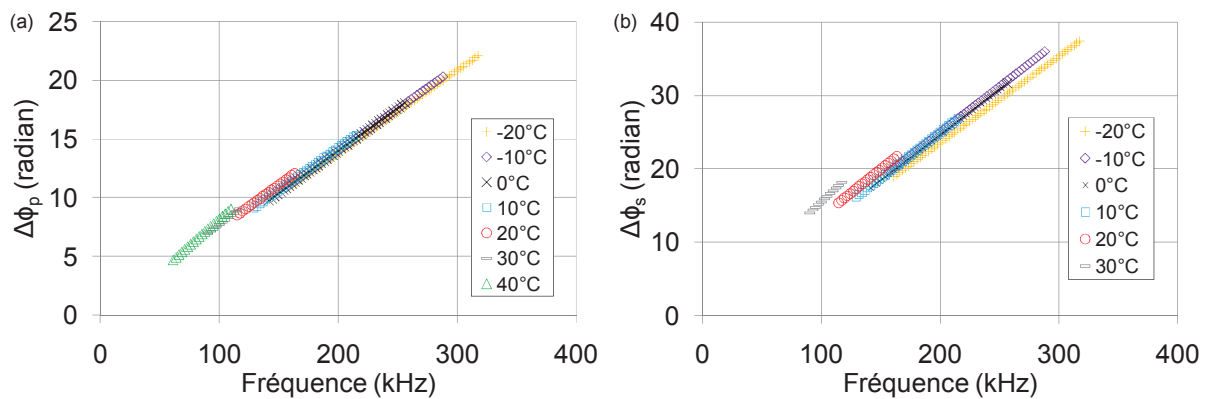


Figure V. 10 : Déphasage en fonction de la température des signaux de compression et de cisaillement sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d) pour le matériau GB5

La Figure V. 10 montre que la thermo-sensibilité du déphasage est moins évidente pour les ondes de compression que pour les ondes de cisaillement. De plus, on constate toujours que la matrice viscoélastique entraîne une dépendance fréquentielle du déphasage [Bourbié, 1986]. En effet, la viscosité du matériau diminue avec l'augmentation de la température ce qui entraîne un déphasage plus important.

III - Détermination expérimentale des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes

Au chapitre II, plusieurs méthodes de détermination des paramètres de propagation des ondes ont été présentées dans deux domaines d'analyse différents : le domaine temporel et le domaine fréquentiel. Ici, une comparaison de ces différentes méthodes est faite dans le but de déterminer la plus appropriée dans le cadre de la propagation d'ondes dans un matériau hétérogène au comportement mécanique thermo-viscoélastique.

III - 1 - Vitesse de propagation

Une comparaison des différentes méthodes de détermination de la vitesse de propagation pour toutes les températures d'essai et les deux types d'ondes est présentée sur la Figure V. 11. Pour la vitesse de phase, celle-ci est présentée pour sa fréquence interspectre ainsi qu'avec sa variation sur la plage fréquentielle étudiée.

On constate que la méthode du passage par zéro donne des valeurs supérieures aux valeurs de vitesse obtenues par les autres méthodes. Ceci peut être expliqué d'une part par le fait que les valeurs obtenues avec cette méthode dans le cadre de matériaux hétérogènes doivent être prises avec précaution du fait de l'interaction de l'onde avec les hétérogénéités qui peuvent perturber l'arrivée du signal [Le Huérou, 2003]. D'autre part, sachant que les hautes fréquences arrivent en premier, cette méthode donne une vitesse correspondant aux hautes fréquences. Cependant, dans un matériau viscoélastique, on a montré avec l'étude pour le bitume 35/50 que toutes les fréquences contenues dans le signal n'étaient pas propagées à la même vitesse.

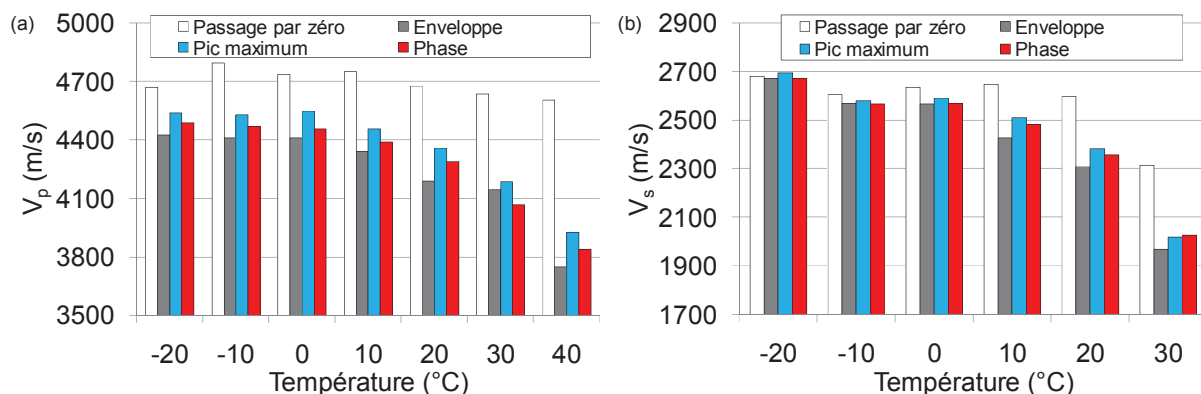


Figure V. 11 : Comparaison des méthodes de détermination des vitesses de propagation (a) des ondes de compression (b) des ondes de cisaillement pour le matériau GB5

Les autres méthodes de détermination de la vitesse de propagation donnent des valeurs relativement similaires. Cependant, les méthodes temporelles (enveloppe et pic maximum) donnent une vitesse de propagation pour une fréquence non identifiée. Par ailleurs, la valeur de la vitesse de phase dépend du rapport $f/\Delta\phi$ présent dans la formule présentée dans l'équation V. 1 :

$$V_{\phi} = \frac{2\pi f \Delta L}{\Delta \phi} \quad (\text{Eq V. 1})$$

La variation de ce rapport est présentée en fonction de la fréquence dans la Figure V. 12. On constate que ce rapport varie en fonction de la fréquence notamment pour les ondes de compression. La vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les graves bitume est donc dépendante de la fréquence ainsi en utilisant la méthode de la vitesse de phase cette dépendance est prise en compte.

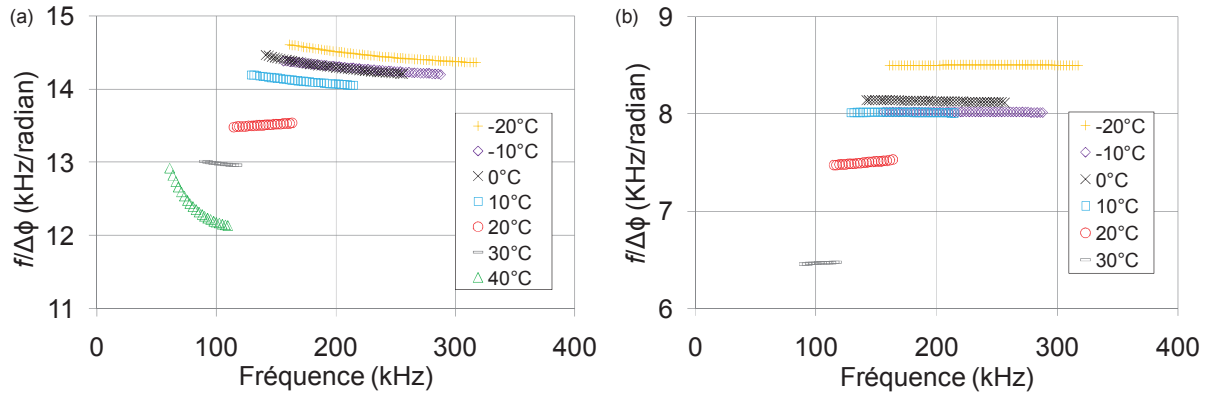


Figure V. 12 : Evolution du rapport fréquence sur déphasage pour les ondes (a) de compression (b) de cisaillement pour le matériau GB5

Par ailleurs, du fait de l'atténuation préférentielle des hautes fréquences causée par le caractère visqueux du matériau, la notion de vitesse de groupe n'a alors plus aucun sens [Bourbié, 1986]. Il apparaît donc que la méthode de la vitesse de phase est la plus pertinente pour la détermination de la vitesse de propagation des ondes dans les matériaux au comportement mécanique thermo-viscoélastique.

III - 2 - Facteur d'atténuation

De même que pour la vitesse de propagation des ondes, le facteur d'atténuation est déterminé suivant différentes méthodes dans le domaine temporel ou fréquentiel. Les comparaisons de ces différentes méthodes sont présentées en Figure V. 13 pour les ondes de compression et de cisaillement. On constate, comme pour le bitume, que les méthodes dont la fréquence est inconnue (méthode temporelle et densité spectrale) et prenant en compte l'ensemble des fréquences contenues dans le signal donnent des valeurs du facteur d'atténuation plus importantes.

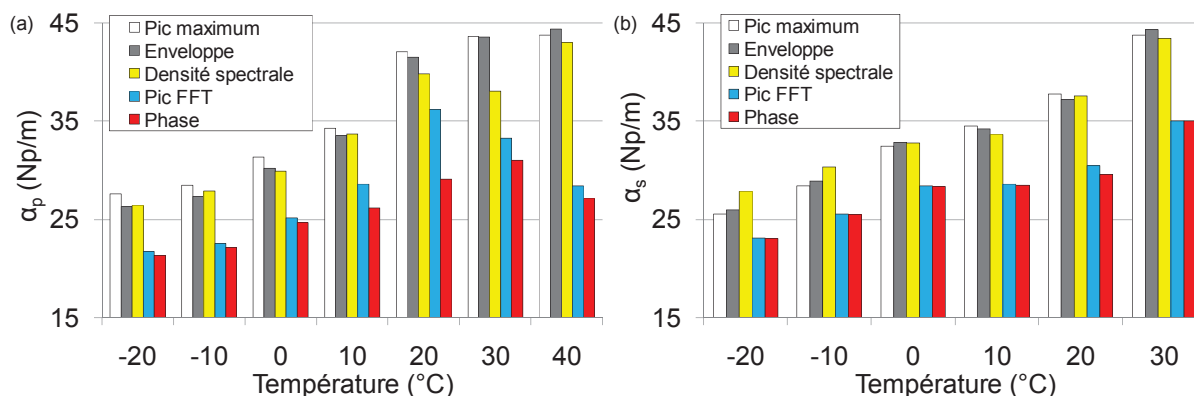


Figure V. 13 : Comparaison des méthodes de détermination du facteur d'atténuation (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement

Il se montre donc nécessaire de déterminer le facteur d'atténuation en prenant en compte la dépendance fréquentielle de cette grandeur. Pour cela, la méthode de phase se montre également la plus pertinente pour la détermination du facteur d'atténuation.

III - 3 - Représentation des résultats

De même que pour le bitume, il est possible d'étudier la susceptibilité thermique et cinétique des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes par leurs représentations en termes d'isothermes et d'isochrones sur la bande passante de chaque signal. Des représentations similaires sont présentées en annexe A – VII sur une plage fréquentielle plus étendue.

III - 3 - 1 - Isothermes des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes

La Figure V. 14 présente les isothermes des vitesses de phase pour les ondes de compression et de cisaillement pour le matériau GB5. Ces isothermes mettent en évidence la thermosensibilité de la vitesse de phase. On constate que la vitesse de phase des ondes de compression a tendance à diminuer avec la fréquence, dans ce cas on parle d'une dispersion dite « normale » [Bourbié, 1986]. De même que pour le bitume, il se montre difficile de ressortir une loi concernant l'évolution de la vitesse en fonction de la fréquence [Bourbié, 1986] sur les bandes fréquentielles d'analyse.

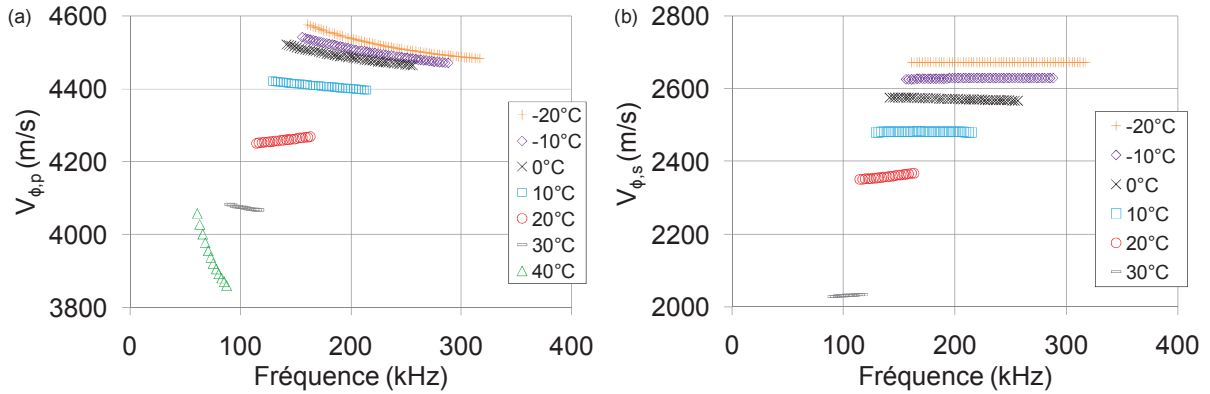


Figure V. 14 : Isothermes des vitesses de phase pour les ondes de compression et de cisaillement sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d) pour le matériau GB5

La Figure V. 15 montre, quant à elle, la thermo-sensibilité du facteur d'atténuation. On voit que les valeurs de l'isotherme à 40°C ne sont pas concordantes avec les valeurs des autres isothermes mais sa tendance est cohérente avec les autres isothermes.

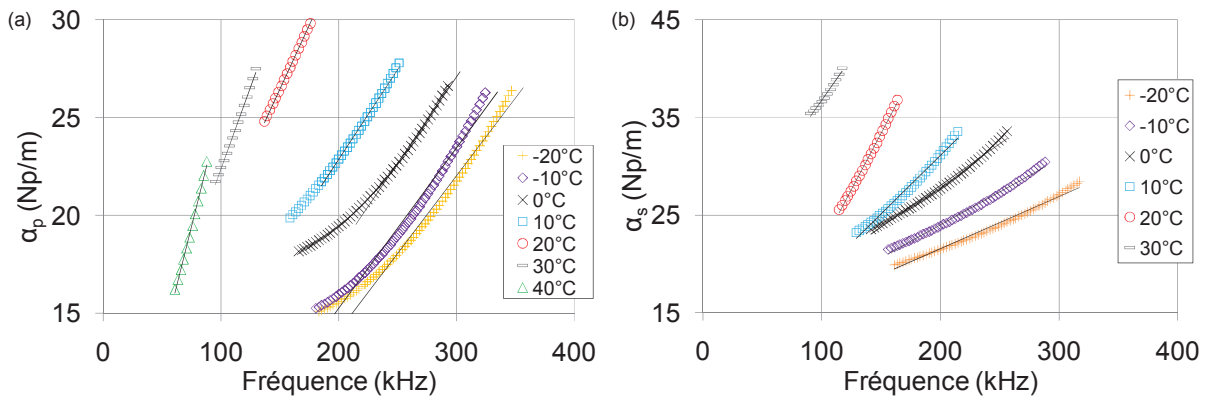


Figure V. 15 : Isothermes du facteur d'atténuation des ondes de compression et de cisaillement sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d) pour le matériau GB5

De plus, le facteur d'atténuation évolue de manière linéaire avec la fréquence pour les deux types d'ondes sur les bandes passantes des signaux. Cependant, pour les isothermes des ondes

de compression de -20°C à 0°C , ces linéarités ont été prises en excluant les basses fréquences (Figure V. 15 (c)) de leur bande passante qui ne répondent pas à une évolution linéaire mais plutôt à une loi polynomiale. Ceci peut être expliqué par le fait que dans un matériau hétérogène tel que la GB5, en plus de l'atténuation causée par l'absorption du milieu, il y a l'atténuation causée par la diffusion de l'onde par les hétérogénéités. En effet, les points d'inflexions des isothermes du facteur d'atténuation correspondent à des longueurs d'ondes de l'ordre de 20 mm (Figure V. 16) c'est-à-dire de la taille des plus gros granulats (14 mm).

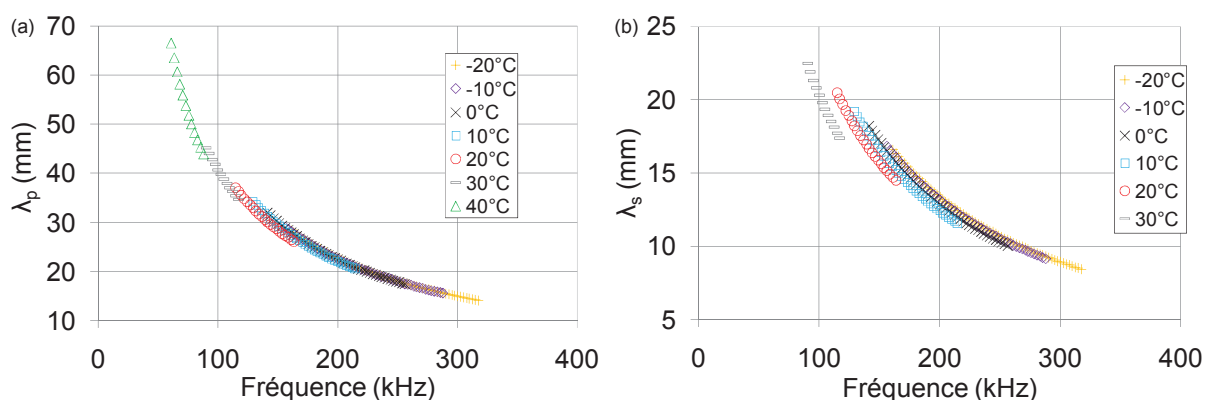


Figure V. 16 : Longueur d'onde des ondes de compression et de cisaillement sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d) pour le matériau GB5

Si on reprend la formule permettant de déterminer les domaines de diffusion présentée au chapitre I (Eq V. 1) et que l'on observe l'évolution des longueurs d'ondes en fonction de la fréquence (Figure V. 16), on s'aperçoit que le domaine de diffusion varie en fonction de la fréquence. En effet, les longueurs d'ondes sont supérieures au diamètre du plus gros granulat à basse fréquence puis deviennent inférieures à celui-ci à hautes fréquences.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Rayleigh lorsque } \lambda \gg D, \alpha(f) = a_1 f + a_2 D^3 f^4 \\ \text{Stochastique lorsque } \lambda \approx D, \alpha(f) = b_1 f + b_2 D f^2 \\ \text{Diffusion lorsque } \lambda \ll D, \alpha(f) = c_1 f + \frac{c_2}{D} \end{array} \right. \quad (\text{Eq V. 2})$$

Cependant, il semble que sur la bande fréquentielle d'analyse ce soit la part visqueuse qui donne la tendance aux isothermes du facteur d'atténuation et qu'elles répondent à une loi linéaire comme pour le bitume, ainsi on peut écrire :

$$\alpha(f) = a_1 f \quad (\text{Eq V. 3})$$

Dans le but de s'assurer que le phénomène observé est bien représentatif du matériau, il est important de vérifier la condition du volume minimum d'homogénéisation. Ainsi, pour que ce critère soit vérifié, il faut que le rapport $\Delta L/\lambda$ soit supérieur à deux fois le diamètre du plus gros grain [Bourbié, 1986]. La Figure V. 17 présente l'évolution de ce rapport en fonction de la fréquence. On constate que cette condition est remplie pour les ondes de cisaillement (Figure V. 17 (b)) mais ce n'est pas toujours le cas pour les ondes de compression notamment à hautes températures et basses fréquences (Figure V. 17 (a)). Le comportement observé est donc globalement le comportement macroscopique du matériau mais peut expliquer les différences rencontrées pour le facteur d'atténuation des ondes de compression à partir de 30°C.

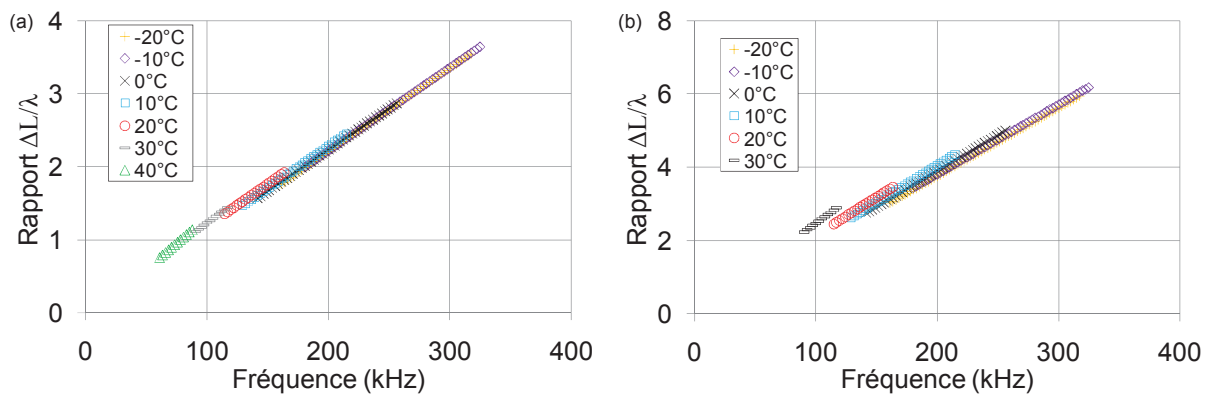


Figure V. 17 : Evolution du rapport $\Delta L/\lambda$ en fonction de la fréquence pour les ondes (a) de compression (b) de cisaillement

L'évolution du déphasage des signaux et du facteur d'atténuation répondant à des lois linéaires, leurs sensibilités cinétiques peuvent être étudiées en traçant les coefficients directeurs des différentes lois en fonction de la température (Figure V. 18). Ainsi, la sensibilité cinétique du facteur d'atténuation répond comme pour le bitume à une loi exponentielle en fonction de la température mais avec un coefficient de corrélation plus faible. Par contre, la sensibilité cinétique du déphasage ne semble répondre à aucune loi particulière (Figure V. 18 (b)). On constate néanmoins que celui-ci est constant de -20°C à 20°C et qu'il augmente ensuite.

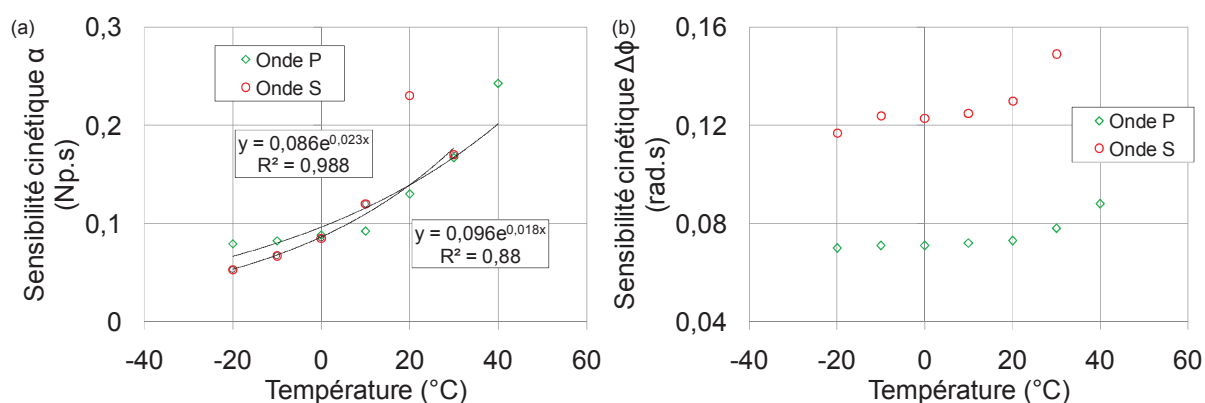


Figure V. 18 : Sensibilité cinétique du facteur d'atténuation (a) et du déphasage (b)

III - 3 - 2 - Isochrones des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes

La Figure V. 19 présente les isochrones de vitesse de phase des ondes de compression et de cisaillement. Contrairement au bitume, l'évolution de la vitesse de phase en fonction de la température ne se fait pas de manière linéaire. On observe un palier de -20°C à 0°C puis une diminution linéaire jusqu'à 20°C et de nouveau un palier, cependant des points supplémentaires sont nécessaires pour affirmer une tendance sigmoïdale.

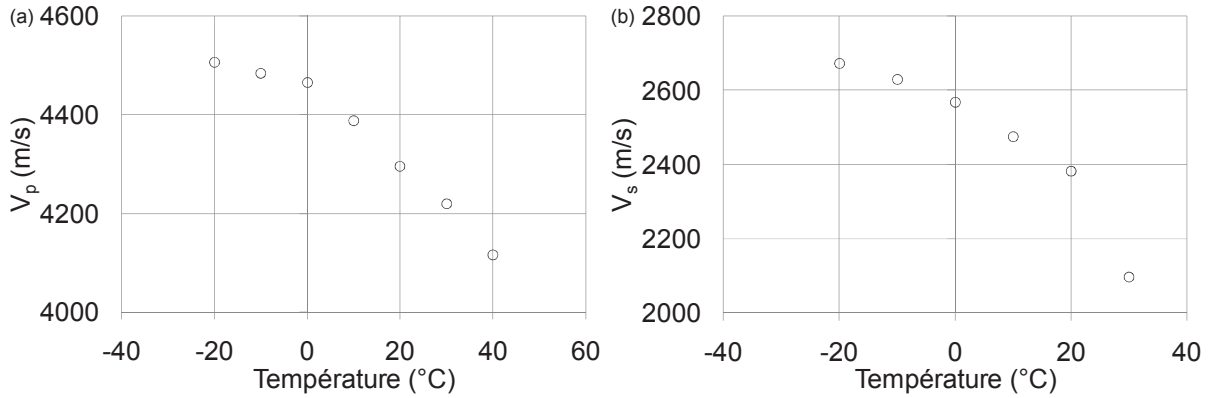


Figure V. 19 Isochrones de vitesse de phase des ondes (a) de compression (b) de cisaillement

Les courbes isochrones du facteur d'atténuation des deux types d'ondes (Figure V. 20) montrent que celui-ci augmente de manière exponentielle avec la température de même que pour le bitume. La viscosité Newtonienne issue du modèle rhéologique 2S2P1D évolue de manière inverse avec l'augmentation de la température. Il y a donc une augmentation de la part d'atténuation visqueuse avec l'augmentation de la température.

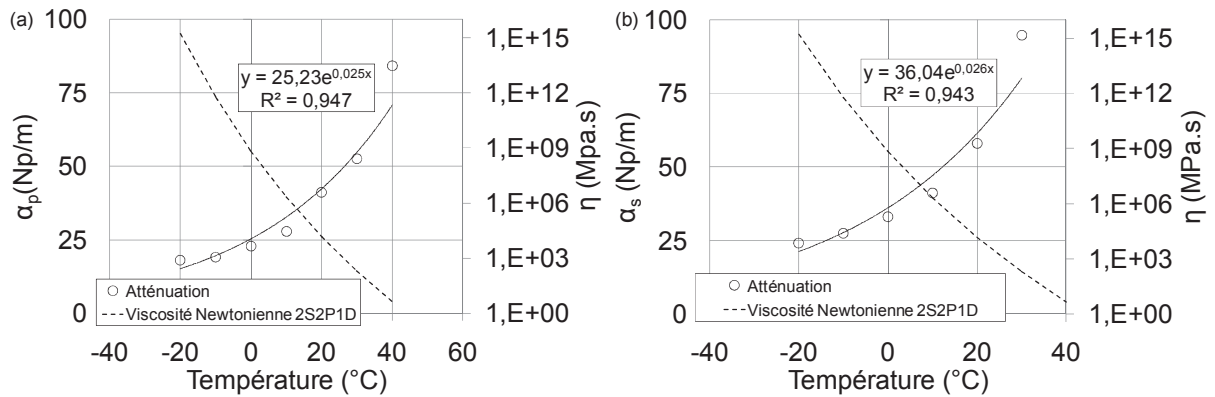


Figure V. 20 : Evolution de la viscosité Newtonienne du matériau GB5 fonction du facteur d'atténuation des ondes (a) de compression (b) de cisaillement

La Figure V. 21 montre l'évolution de la viscosité Newtonienne et du temps caractéristique τ en fonction du facteur d'atténuation expérimental des ondes de compression et de cisaillement. On constate que contrairement au bitume, leurs évolutions répondent moins bien

à des lois logarithmiques. Dans le cadre du bitume, cette loi fonctionne de manière satisfaisante car le facteur d'atténuation expérimental correspond uniquement à une atténuation visqueuse donc fonction de la viscosité du matériau. Dans le cadre des matériaux GB3 et GB5, la présence du squelette granulaire amène une part de diffusion au facteur d'atténuation expérimental qui est l'addition de deux mécanismes (absorption et diffusion) dont un, la diffusion de l'onde par les hétérogénéités, est indépendant de la viscosité du matériau.

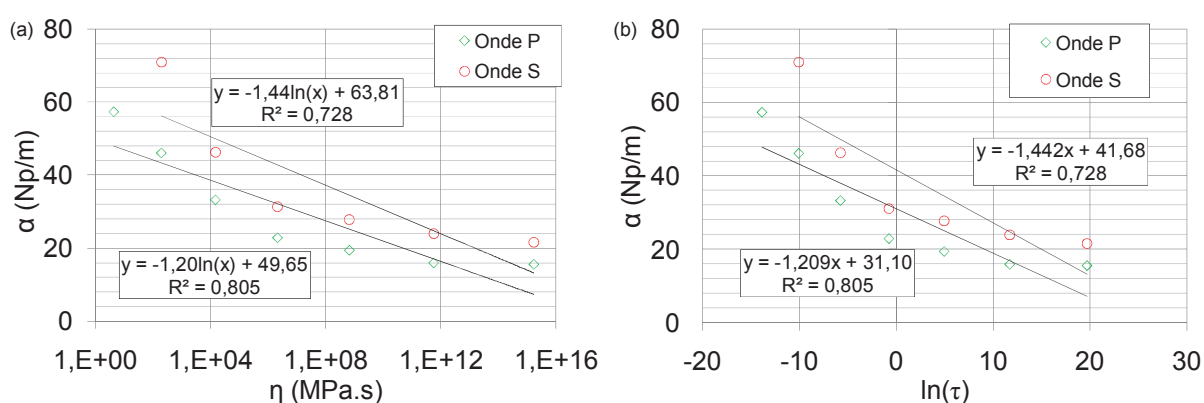


Figure V. 21 : (a) Evolution de la viscosité Newtonienne et (b) du temps caractéristique τ en fonction du facteur d'atténuation expérimental

III - 4 - Prédiction des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes dans les graves bitume à partir de celles du bitume

La Figure V. 22 montre le rapport entre les vitesses des ondes de compression propagées dans le bitume et dans la GB5. On remarque que la proportion entre les vitesses de propagation dans les deux matériaux se situe aux environs de 46% pour toutes les températures. Par contre une telle représentation n'est pas possible pour le facteur d'atténuation du fait des mécanismes différents qui le composent dans le cadre de matériaux hétérogènes.

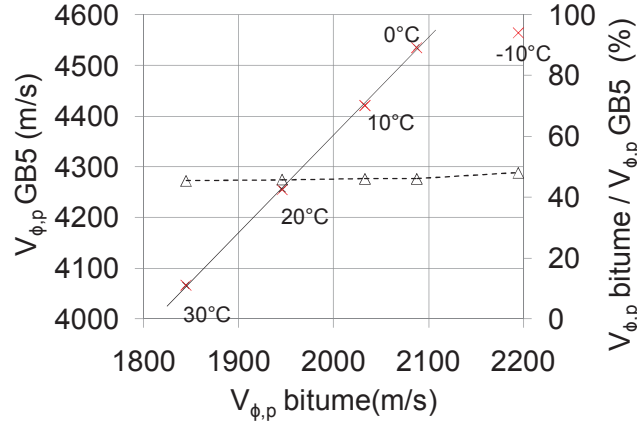


Figure V. 22 : Rapport entre les vitesses de propagation des ondes P dans le bitume et la GB5

Par ailleurs, dans le chapitre III, nous avons vu qu'une relation avait été développée par Olard [Olard, 2003 (b)] pendant ses travaux de thèse entre les caractéristiques mécaniques du liant et de l'enrobé pour une formulation donnée notamment entre les modules complexes de ces deux matériaux (Eq III. 14).

Dans le cadre d'une hypothèse d'un comportement mécanique élastique, le module des matériaux et la vitesse de propagation des ondes sont proportionnelles. Il est alors possible, en procédant par analogie avec la relation proposée par Olard [Olard, 2003 (b)], d'exprimer la relation III. 14 non plus en fonction des modules des matériaux mais avec les vitesses de propagation des ondes comme le propose la relation suivante :

$$V_{\phi enr}(\omega, T) = \sqrt{V_{\phi 00 enr}^2 + [V_{\phi bit}(10^\alpha \omega, T)^2 - V_{\phi 00 bit}^2] \frac{V_{\phi 0 enr}^2 - V_{\phi 00 enr}^2}{V_{\phi 0 bit}^2 - V_{\phi 00 bit}^2}} \quad (Eq V. 4)$$

avec V_{ϕ} : la vitesse de phase ;

$V_{\phi 00}$: la vitesse de phase quand $\omega\tau \rightarrow 0$;

$V_{\phi 0}$: la vitesse de phase quand $\omega\tau \rightarrow \infty$;

les indices « enr » et « bit » correspondent respectivement à l'enrobé et au bitume

Les valeurs de $V_{\phi 00}$ et $V_{\phi 0}$ peuvent être déterminés à partir des courbes maitresses de vitesse de propagation des ondes (Figure V. 23) obtenues grâce à la modélisation des grandeurs caractéristiques de propagation d’ondes présentée au chapitre III. Les équations de prédiction de la vitesse de propagation nécessitant une valeur du coefficient de Poisson, trois valeurs ont été prises (0,20, 0,35 et 0,40). Les valeurs prises en compte dans les calculs pour la température de -10°C sont présentées dans le Tableau V. 1.

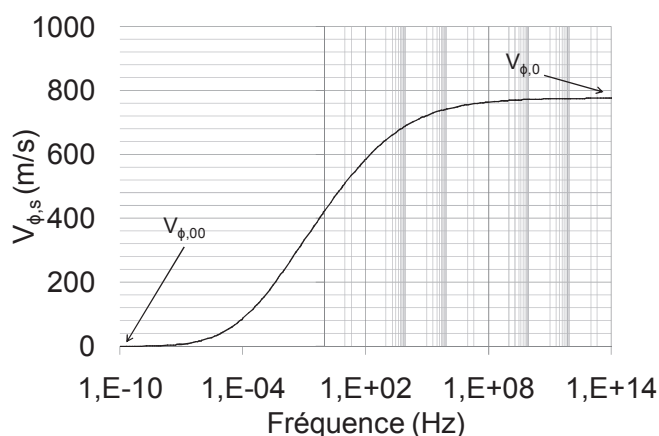


Figure V. 23 : Principe théorique de la détermination de $V_{\phi 00}$ et $V_{\phi 0}$ pour le bitume 35/50

Valeur de ν	$V_{\phi 00,s}$ (m/s)	$V_{\phi 0,s}$ (m/s)	$V_{\phi 00,p}$ (m/s)	$V_{\phi 0,p}$ (m/s)
0,20	37	2746	60	4485
0,35	34	2589	72	5390
0,40	34	2542	84	6228

Tableau V. 1 : Valeurs de $V_{\phi 00}$ et $V_{\phi 0}$ pour les deux types d’ondes pour différentes valeurs de coefficient de Poisson pour le matériau GB5

La Figure V. 24 montre la prédiction des vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement pour la GB5 à partir des vitesses de propagation du bitume 35/50 ainsi que les vitesses expérimentales. Dans les deux cas, on constate que les vitesses de propagation expérimentales se trouvent dans le faisceau de prédiction. De plus, celles-ci sont plus proches

des prédictions réalisées avec un coefficient de Poisson proche de 0,20 ce qui correspond à un coefficient de Poisson d'un enrobé bitumineux déterminé à hautes fréquences [Van velsor, 2011] [Mounier, 2012].

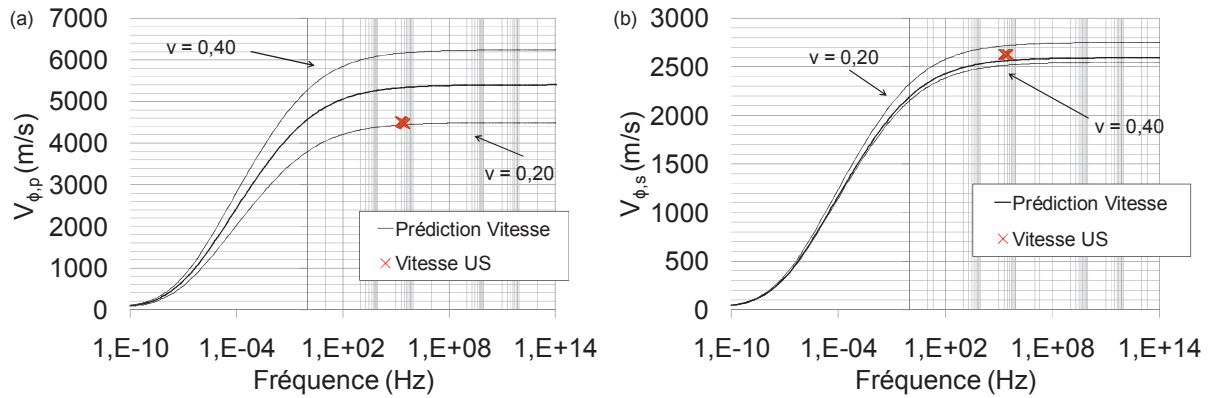


Figure V. 24 : Prédiction des vitesses de propagation (a) des ondes P (b) des ondes S pour le matériau GB5 à partir des vitesses de propagation dans le bitume 35/50 à -10°C

IV - Détermination des caractéristiques mécaniques à partir des mesures ultrasonores

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la détermination des caractéristiques mécaniques du matériau avec les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes expérimentales où les hypothèses de propagation d'ondes dans un milieu élastique et viscoélastique sont comparées et discutées. Toutes les données mécaniques sont déterminées sur les bandes passantes respectives de chaque signal présentées sur la Figure V. 9. Les résultats sont présentés sur des plages fréquentielles plus importantes dans l'annexe A – VII.

IV - 1 - Coefficient de Poisson

Les bétons bitumineux sont, à l'instar du bitume, des matériaux au comportement mécanique viscoélastique. Leur coefficient de Poisson peut donc s'écrire de manière complexe, la partie réelle représentant la déformation transversale instantanée et la partie imaginaire la déformation transversale différée. Par ailleurs, les graves bitumes ayant été compactées selon une seule direction (la direction 2), il est possible de supposer que selon les directions 1 et 3, les caractéristiques mécaniques sont les mêmes. Cela revient à considérer les matériaux étudiés comme orthotropes avec une isotropie transverse [Jurado, 2008]. Afin de simplifier le problème nous les considérons comme isotropes dans cette étude : cette hypothèse est discutée dans la suite du paragraphe.

La Figure V. 25 montre que pour la détermination du coefficient de Poisson à hautes fréquences, une hypothèse élastique est largement suffisante. En effet, les termes $\frac{\alpha_s^2}{\omega^2}$ et $\frac{\alpha_p^2}{\omega^2}$ présents dans l'équation du coefficient de Poisson tendent vers zéro à hautes fréquences. Les hypothèses viscoélastique (Eq II. 22) et élastique (Eq II. 8) sont alors identiques. En effet, une étude a montré [Di Benedetto, 2008] que l'angle de phase entre la déformation axiale et transversale est inférieur à 6°. Un tel déphasage permet de calculer que sur la plage de valeurs possibles pour le coefficient de Poisson, c'est-à-dire 0,2 à 0,5 [Di Benedetto, 2001] la partie réelle du coefficient de Poisson complexe représente 99% de celui-ci.

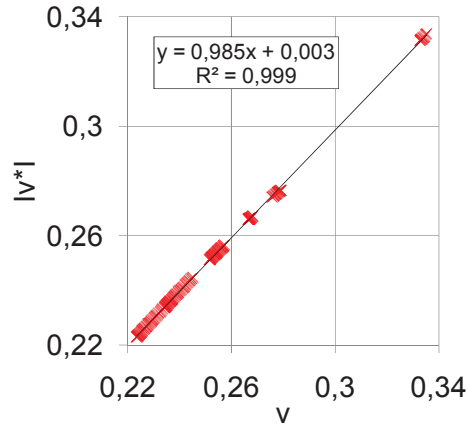


Figure V. 25 : Comparaison entre le coefficient de Poisson élastique et viscoélastique

Les isothermes des coefficients de Poisson sont alors déterminées (Figure V. 26) et montrent la thermo-sensibilité et la dépendance fréquentielle du coefficient de Poisson. De plus, les valeurs obtenues se montrent en accord avec les résultats proposés par la littérature [Van Velsor, 2011] [Mounier, 2012].

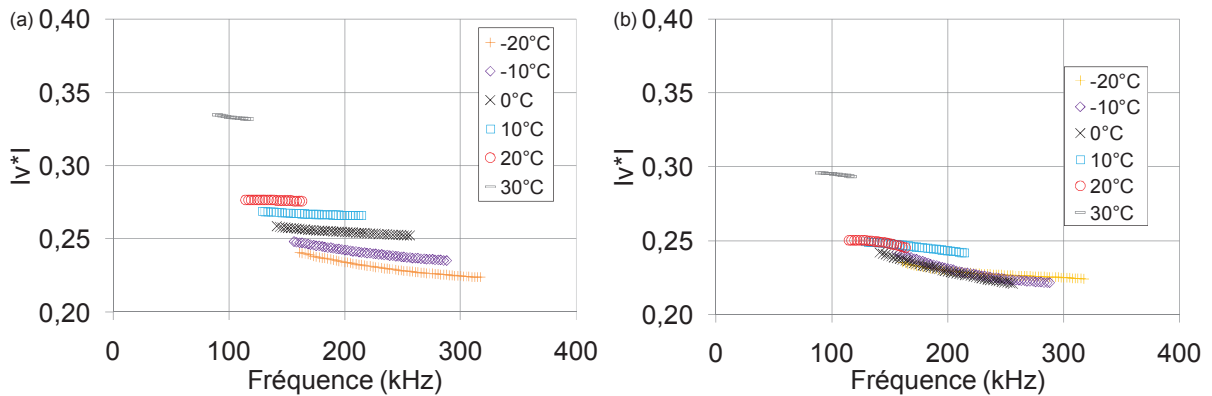


Figure V. 26 : Coefficient de Poisson expérimentaux pour les matériaux GB3 et GB5 sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d)

Par ailleurs, par comparaison avec les isothermes des coefficients de Poisson déterminées par essais mécaniques et présentées au chapitre III, on constate une évolution similaire pour les

deux matériaux notamment des valeurs élevées pour les hautes températures pour le matériau GB5.

La courbe maitresse du coefficient de Poisson peut également être tracée à la température de référence de 15°C (Figure V. 27). La translation des données ultrasonores a été réalisée en prenant le même coefficient a_T que pour la translation des modules complexes [Di Benedetto, 2008]. Les valeurs expérimentales se montrent en accord avec les données mécaniques et la modélisation 2S2P1D. De plus, on constate que les coefficients de Poisson déterminés dans les trois dimensions de l'espace convergent vers des valeurs proches à hautes fréquences ce qui conforte l'hypothèse isotrope considérée pour le matériau.

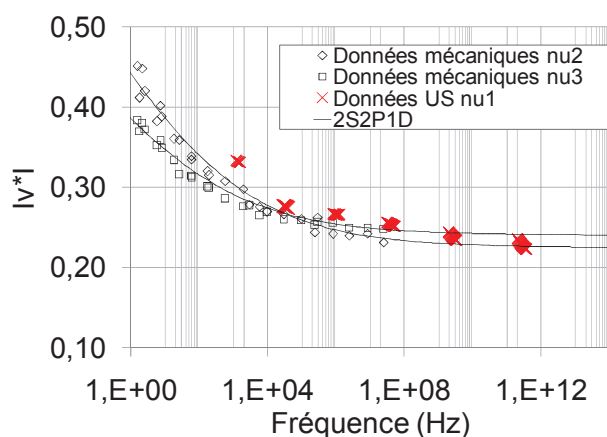


Figure V. 27 : Courbe maitresse du coefficient de Poisson à la température de référence de 15°C pour le matériau GB5

La Figure V. 28 montre une comparaison des coefficients de Poisson du bitume 35/50 et des deux graves bitumes de l'essai pour la température de -10°C. On constate que les coefficients de Poisson des graves bitumes sont des translations verticales du coefficient de Poisson du bitume les composant.

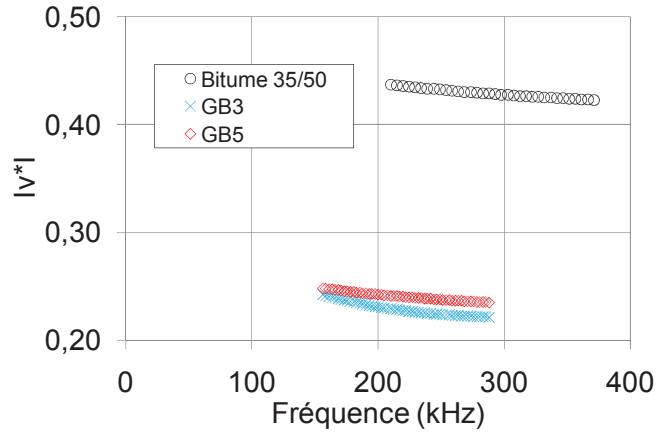


Figure V. 28 : Comparaison des coefficients de Poisson ultrasonores du bitume 35/50 et des matériaux GB3 et GB5

A présent il est possible d'utiliser le coefficient de Poisson expérimental afin de déterminer les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes théoriques notamment le facteur d'atténuation visqueux. Pour cela, nous utilisons de coefficient de Poisson déterminé avec l'hypothèse élastique dans le but de s'affranchir de l'effet du facteur d'atténuation expérimental comme le montre la Figure V. 29. En effet, l'objectif de cette démarche est de comparer le facteur d'atténuation expérimental et théorique.

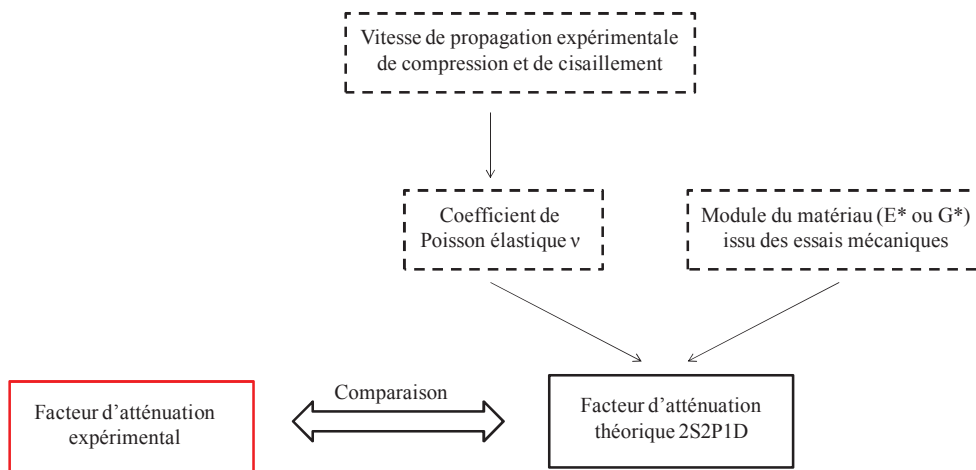


Figure V. 29 : Principe de la comparaison entre le facteur d'atténuation théorique et expérimental

La Figure V. 30 qui présente la comparaison entre le facteur d'atténuation théorique et expérimental, montre une tendance similaire mais des valeurs différentes [Larcher, 2014]. Cette différence peut être due au fait que le facteur d'atténuation théorique déterminé avec le modèle rhéologique 2S2P1D ne rend compte uniquement de l'atténuation visqueuse du matériau. Cependant, le matériau GB5 est un matériau hétérogène, dans lequel une diffusion de l'onde par les hétérogénéités entraîne une source supplémentaire d'atténuation comme présenté au paragraphe III – 3 – 1.

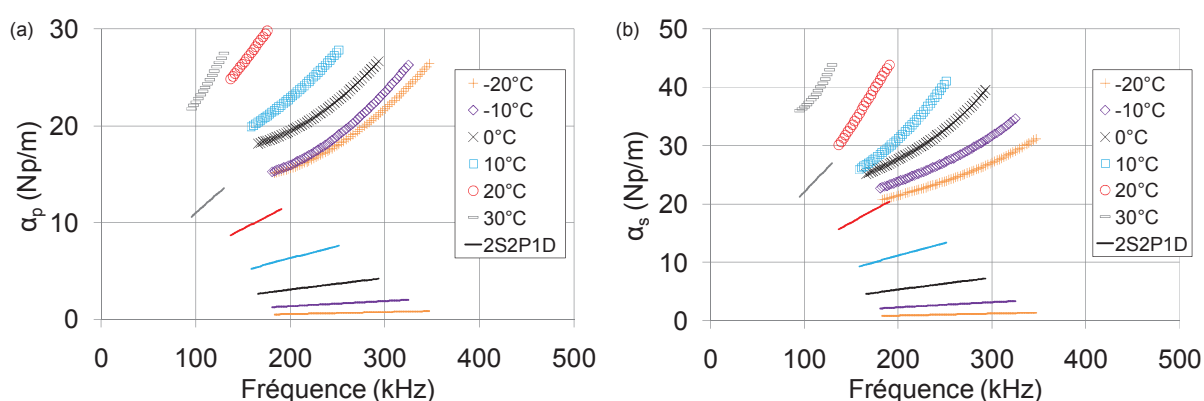


Figure V. 30 : Comparaison entre le facteur d'atténuation expérimental et théorique pour le matériau GB5 (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement

Bien que le facteur d'atténuation théorique et expérimental diffèrent, une corrélation entre ces deux facteurs est possible (Figure V. 31) et permet de retrancher la part d'atténuation due à la diffusion de l'onde par les hétérogénéités au facteur d'atténuation expérimental (somme de plusieurs mécanismes) afin d'exprimer uniquement le facteur d'atténuation dû à la part visqueuse.

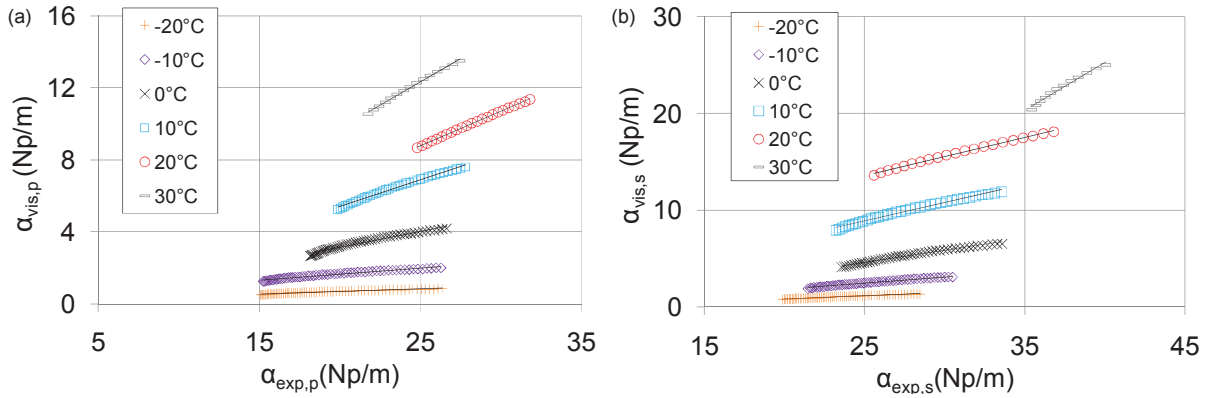


Figure V. 31 : Corrélation entre le facteur d'atténuation expérimental et théorique pour les ondes de compression (a) et de cisaillement (b)

L'évolution des coefficients directeurs des relations entre les facteurs d'atténuation théoriques et expérimentaux (Figure V. 31) en fonction de la température est exponentielle (Figure V. 32). Plus précisément, la Figure V. 32 traduit le taux d'atténuation visqueuse en fonction de la température. En effet, plus le coefficient directeur des relations entre le facteur d'atténuation théorique (purement visqueux) et expérimental tend vers 1, plus la part d'atténuation visqueuse augmente. Par ailleurs, on observe que le taux d'atténuation visqueuse des ondes de cisaillement est toujours supérieur à celui des ondes de compression ce qui traduit une plus grande susceptibilité à la viscosité du matériau pour ce type d'ondes.

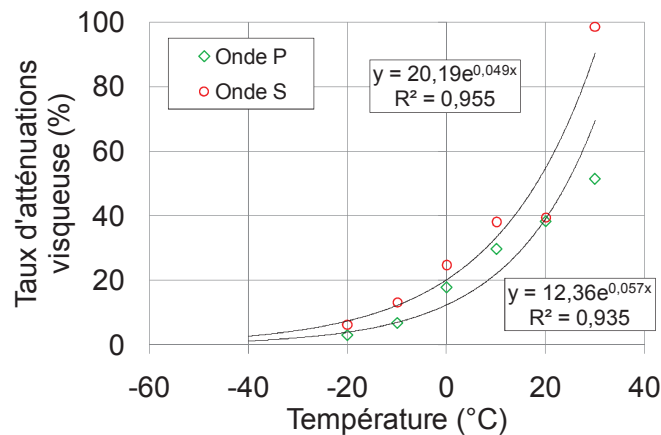


Figure V. 32 : Evolution des coefficients directeurs des relations entre le facteur d'atténuation théorique et expérimental pour le matériau GB5

L'intérêt de retrancher la part d'atténuation due à la diffusion de l'onde au facteur d'atténuation expérimental dans le but d'obtenir uniquement la part visqueuse repose sur la détermination des parties réelles et imaginaires des propriétés mécaniques des matériaux. En effet, le facteur d'atténuation représente la part anélastique de la réponse du matériau. Une surestimation de celle-ci entraîne donc une surestimation des parties imaginaires des quantités calculées. On remarque effectivement que sans correction du facteur d'atténuation expérimental la partie imaginaire du coefficient de Poisson ne peut être négligée (Figure V. 33). Par contre, après correction, le coefficient de Poisson peut être considéré comme réel en accord avec des travaux présents dans la littérature [Di Benedetto, 2008].

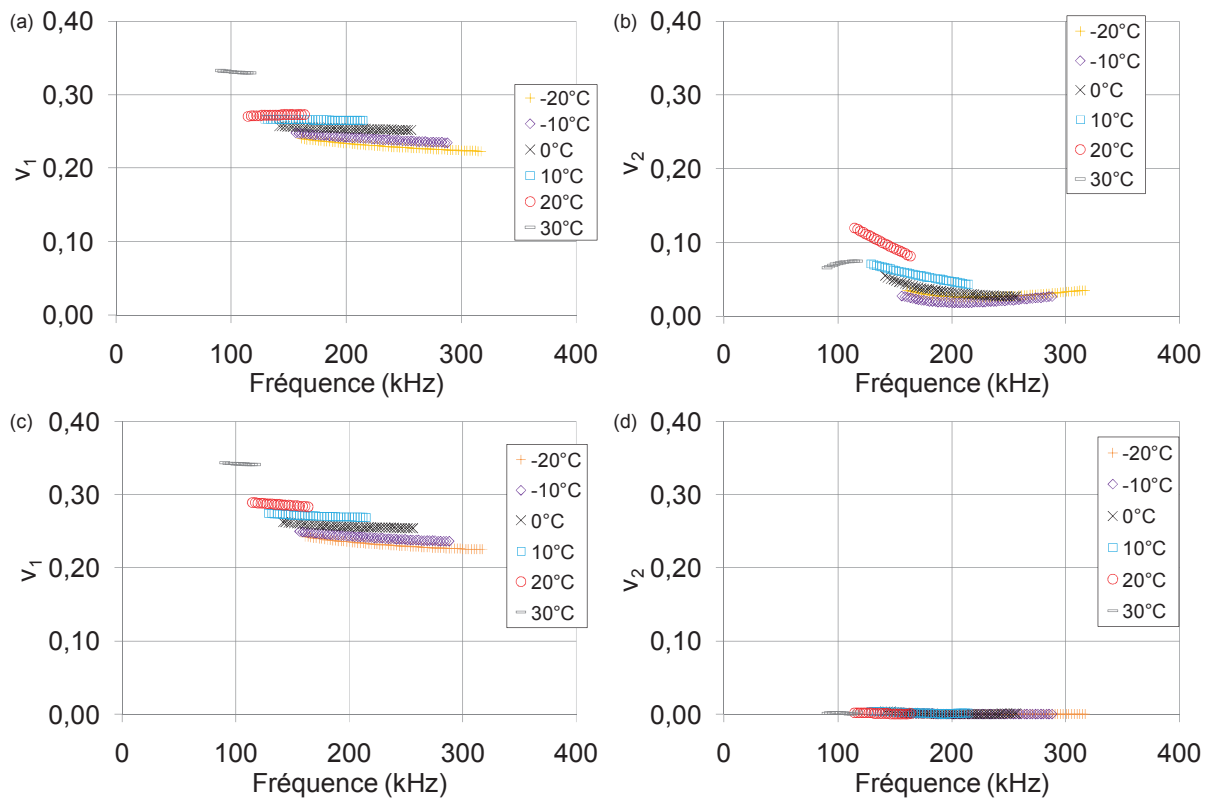


Figure V. 33 : Parties réelles et imaginaires du coefficient de Poisson du matériau GB5 sans correction (a) et (b) et avec correction (c) et (d) du facteur d'atténuation expérimental

IV - 2 - Détermination des modules complexes

Les modules d'Young du matériau pour les différentes températures peuvent être déterminés, de même que le coefficient de Poisson suivant une hypothèse élastique (Eq II. 6) ou viscoélastique (Eq II. 15). La Figure V. 34 (a) montre une nouvelle fois qu'il n'y a pas de différence entre l'une et l'autre pour la détermination d'un module à haute fréquence. Sur la Figure V. 34 (b), les isothermes de modules sont présentées et montrent la thermo-sensibilité des modules. On constate que l'isotherme à 30°C est bien inférieure aux. Ce saut peut être expliqué par un changement de comportement du matériau aux alentours de 20°C.

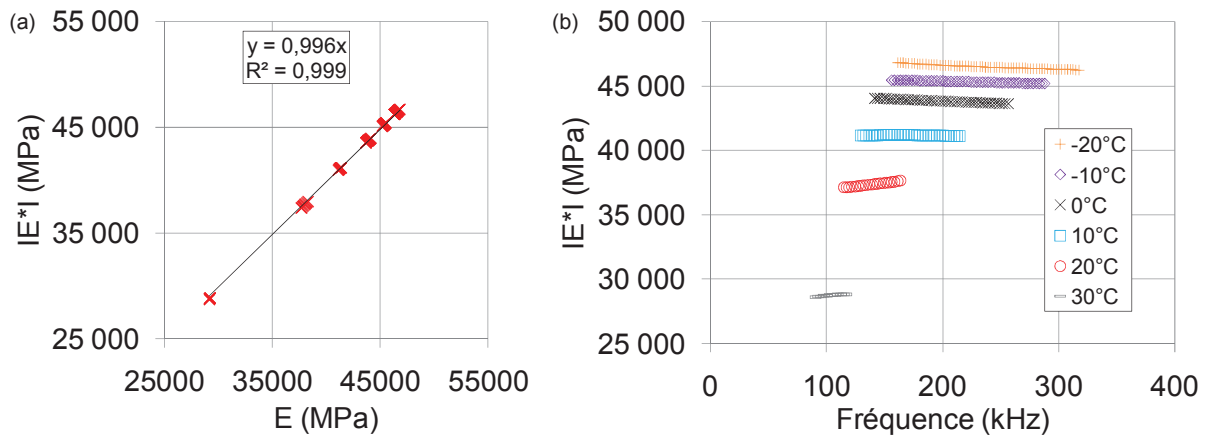


Figure V. 34 : (a) Comparaison entre l'hypothèse élastique et viscoélastique (b) Isothermes de modules d'Young du matériau GB5

La Figure V. 35 montre la translation des isothermes pour la construction de la courbe maîtresse du matériau à la température de 15°C (température de référence pour le dimensionnement des chaussées). Les coefficients de translation a_T utilisés sont les mêmes que pour la translation des isothermes issus de l'essai de module complexe mécanique.

Tout d'abord, on voit que les modules ultrasonores sont obtenus pour des fréquences non atteintes par la translation des données de l'essai mécanique, la comparaison des résultats ultrasonores nécessite donc une modélisation à haute fréquence du comportement du matériau via un modèle rhéologique.

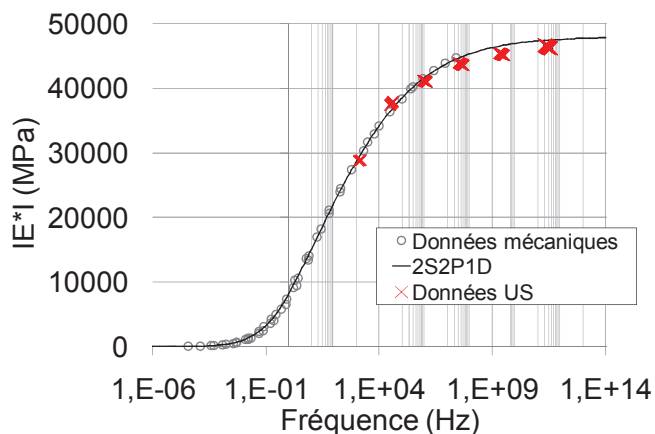


Figure V. 35 : Courbe maitresse du matériau GB5 à la température de référence de 15°C

On constate dans un premier temps que les modules translatés sont en accord avec la courbe maitresse modélisée avec le modèle rhéologique 2S2P1D à partir des données de l'essai mécanique. De plus, les modules obtenus permettent une estimation du module vitreux E_0 du matériau.

Cependant, les modules translatés ne sont pas encore utilisables pour le dimensionnement. En effet, la translation permet d'obtenir des modules de l'ordre du kiloHertz contrairement aux 10 Hz préconisés pour le dimensionnement des chaussées routières.

IV - 3 - Représentation des résultats dans les plans complexes

Comme présenté au chapitre précédent, l'hypothèse viscoélastique permet la détermination des parties réelles et imaginaires ainsi que l'angle de phase du module complexe du matériau. La Figure V. 36 (a) et (b) montre le plan de Cole – Cole et l'espace de Black sans correction du facteur d'atténuation. On constate donc qu'il y a une surestimation de la partie imaginaire ou de l'angle de phase du matériau. Néanmoins, le facteur d'atténuation ayant une très faible influence sur la détermination du module complexe ou de sa partie réelle, les valeurs obtenues permettent une estimation du module vitreux E_0 .

Une fois la correction du facteur d'atténuation expérimental effectuée, on observe une diminution de la partie imaginaire et de l'angle de phase permettant ainsi aux données expérimentales de se montrer en accord avec les données mécaniques et la modélisation

rhéologique (Figure V. 36 (c) et (d)). D’ailleurs les données ultrasonores atteignent, pour les basses températures, des valeurs non obtenues par les données mécaniques. De plus, les parties réelles et imaginaires du module complexe déterminées avec l’essai ultrasonore permettent la reconstruction en partie du plan de Cole – Cole (Figure V. 36 (c)).

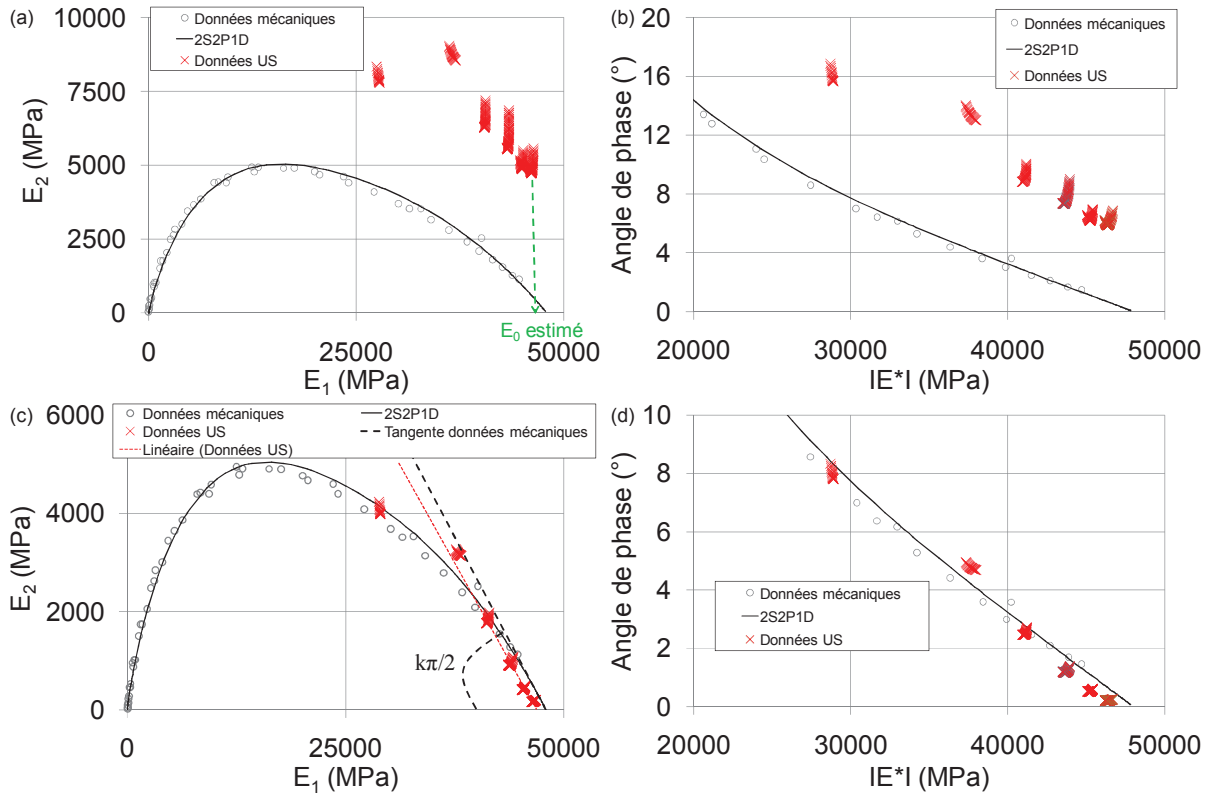


Figure V. 36 : Représentation des données ultrasonores dans le plan de Cole – Cole et l’espace de Black sans (a) et (b) et avec (c) et (d) correction du facteur d’atténuation expérimental

Sur la Figure V. 36 (c), on peut voir la tangente au plan de Cole – Cole ayant permis la détermination du paramètre k servant au calage des modèles rhéologiques avec les données mécaniques. La même tangente a été tracée avec les données US. On constate que cette tangente est parallèle à celle tracée avec les données mécaniques et donne un k de 0,195 et une module vitreux E_0 de 46930 MPa, contre respectivement avec les données mécaniques 0,207 et 48000 MPa. Cette différence peut être imputée ici aux erreurs sur la détermination de la vitesse de propagation. En effet, la tangente issue des données ultrasonore est translatée

vers la gauche par rapport à la tangente issue des données mécaniques signe d'une vitesse de propagation trop faible.

V - Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord vu la thermo-sensibilité des ondes ultrasonores entraînant un étalement temporel de celles-ci. Les pics fréquentiels des signaux diminuent également avec l'augmentation de la température.

Les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes (vitesse et facteur d'atténuation) sont déterminées suivant différentes méthodes. A nouveau, l'analyse fréquentielle se montre la plus pertinente et permet de rendre compte de la dépendance fréquentielle des paramètres de propagation notamment avec la méthode de phase. Les isothermes de vitesse de phase montrent en plus de la dépendance fréquentielle de ce paramètre, sa thermo-sensibilité. Il en est de même pour les isothermes du facteur d'atténuation qui permettent en plus, de déterminer le domaine d'atténuation. Sur les bandes passantes des signaux, l'évolution de l'atténuation en fonction de la fréquence est linéaire, bien que dans un matériau hétérogène il doit également y avoir le mécanisme de diffusion de l'onde par les granulats. Par ailleurs, dans le cadre de ces matériaux hétérogènes, les relations entre la viscosité Newtonienne, le temps caractéristique et le facteur d'atténuation expérimental n'ont pas eu des coefficients de corrélations aussi satisfaisants que pour le bitume étudié au chapitre précédent. Ceci peut être expliqué par le fait que le facteur d'atténuation expérimental déterminé est l'addition de plusieurs mécanismes et non pas seulement du mécanisme d'absorption de l'onde.

Les coefficients de Poisson sont ensuite déterminés avec les grandeurs caractéristiques de propagation expérimentales et il apparaît, en accord avec la littérature que ceux-ci peuvent être considérés comme réels. Par ailleurs, la détermination expérimentale du coefficient de Poisson permet de comparer le facteur d'atténuation théorique issu de la modélisation avec le modèle rhéologique 2S2P1D et le facteur d'atténuation expérimental. Il apparaît clairement que le facteur d'atténuation théorique ne prenant en compte uniquement que l'effet visqueux du matériau est inférieur au facteur d'atténuation expérimental. D'autres sources d'atténuation sont donc présentes dans le matériau notamment le phénomène de diffusion. Une relation entre ces deux atténuations est présentée et permet de rendre compte du taux d'atténuation visqueuse présente dans le matériau en fonction de la température. De plus, ces relations permettent de corriger les données expérimentales. Les modules complexes sont ensuite déterminés et représentés sur une courbe maîtresse à la température de 15°C qui correspond à la température de référence pour le dimensionnement des chaussées routières, la translation est réalisée avec le coefficient a_T issus des essais mécaniques. Cependant, la translation ne

permet pas d'atteindre la fréquence de 10 Hz nécessaire au dimensionnement des chaussées. Les données ultrasonores sont également représentées sur les plans complexes, en l'absence de correction du facteur d'atténuation expérimental, il est tout de même possible d'estimer la valeur du module vitreux E_0 du matériau. Par contre, la correction du facteur d'atténuation permet la reconstruction en partie des plans complexes. Il se montre alors possible d'estimer en plus du module vitreux le paramètre k nécessaire au calage des modèles rhéologiques. L'angle de phase mécanique, pouvant servir à déterminer un coefficient de translation a_T , est également représenté avec l'espace de Black. Cependant, trop peu de valeurs sont présentes dans cette étude pour pouvoir effectuer la démarche mathématique amenant à la détermination du facteur de translation de manière ultrasonore.

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est de montrer la potentialité des méthodes ultrasonores pour la caractérisation mécanique des matériaux thermo-viscoélastiques. Pour cela, l'étude s'est appuyée sur les équations de propagation d'ondes en deux dimensions dans un milieu viscoélastique isotrope. Couplées aux grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes expérimentales, ces équations ont permis la détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux à hautes fréquences.

Le traitement des signaux a été réalisé avec une interface spécialement développée pour ce travail et permettant la détermination des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes selon plusieurs méthodes présentées dans la littérature. La comparaison de ces méthodes a montré que les méthodes du domaine fréquentiel, notamment la méthode de phase, étaient plus pertinentes pour l'étude des matériaux viscoélastiques car elles permettent de rendre compte de la dépendance fréquentielle des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes pour ce type de matériaux. En effet, le comportement viscoélastique des matériaux implique que toutes les fréquences contenues dans le signal ultrasonore ne se propagent pas à la même vitesse et ne sont pas atténuées de manière identique.

L'étude expérimentale s'est scindée en deux parties : l'une sur un matériau considéré comme homogène à l'échelle des longueurs d'ondes ultrasonores, le bitume 35/50 et l'autre sur des matériaux hétérogènes, les graves bitumes GB3 et GB5 constitués de ce bitume 35/50. Les représentations sous formes d'isothermes et d'isochrones de vitesse de phase et de facteur d'atténuation ont confirmé leur dépendance à la fréquence et à la température. De plus, dans le cadre du bitume, l'étude de l'évolution du facteur d'atténuation en fonction de la viscosité Newtonienne du matériau a permis la détermination du paramètre β servant au calage des modèles rhéologiques. Par ailleurs, le but de l'étude de ces deux matériaux repose

essentiellement sur la détermination expérimentale du facteur d'atténuation. En effet, nous avons montré que dans un matériau viscoélastique homogène tel que le bitume, si l'on s'affranchissait des sources extrinsèques d'atténuation comme l'étalement géométrique du faisceau ultrasonore, le facteur d'atténuation est causé uniquement par l'absorption de l'onde par le milieu. Cependant dans un milieu hétérogène tel que les graves bitumes, une source supplémentaire d'atténuation intervient. Or pour les calculs des caractéristiques mécaniques, seule la part visqueuse du facteur d'atténuation est nécessaire. Une modélisation des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes avec le modèle rhéologique 2S2P1D a permis de retrancher la part d'atténuation causée par la diffusion de l'onde par les hétérogénéités au facteur d'atténuation expérimental.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux ont ensuite été calculées. Il a été montré que pour un simple calcul de coefficient de Poisson ou de module à haute fréquence une hypothèse de comportement élastique est largement suffisante. Ces modules, une fois translatés sur la courbe maîtresse des matériaux à la température de référence requise pour le dimensionnement des chaussées en utilisant le coefficient de translation a_T issu des données mécaniques, ne permettent pas d'atteindre la fréquence de 10 Hz. S'ils ne peuvent donc pas être utilisés pour le dimensionnement des chaussées routières, ils peuvent cependant quantifier un endommagement.

Par contre, l'expression des parties réelles et imaginaires ou de l'angle de phase nécessite le recours à une hypothèse viscoélastique en utilisant, pour les matériaux hétérogènes, un facteur d'atténuation préalablement corrigé sous peine d'une surestimation de la partie imaginaire ou de l'angle de phase de la grandeur calculée (module ou coefficient de Poisson). La détermination du coefficient de Poisson a montré sa dépendance à la fréquence et à la température, ainsi que, en accord avec la littérature, qu'il pouvait être considéré comme réel. La représentation des données ultrasonores dans les plans complexes notamment dans le plan de Cole – Cole permet d'estimer le module vitreux (G_0 ou E_0) des matériaux. De plus, pour les graves bitumes pour lesquelles les essais ont été réalisés pour différentes températures, les données ultrasonores permettent une estimation du paramètre k servant également au calage des paramètres rhéologiques.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées dans la continuité de ce travail. D'un point de vue expérimental, il sera intéressant de réitérer ces essais sur un plus grand nombre d'éprouvettes balayant une plus large gamme de fréquences et de températures. Des mesures à des fréquences inférieures et / ou des températures plus élevées permettront d'une part de pouvoir plus facilement atteindre la préconisation de dimensionnement de chaussée (15°C et 10 Hz) par translation des modules ultrasonores sur la courbes maitresses. D'autre part, des valeurs plus hautes températures et basses fréquences doivent permettre de reconstruire de manière plus complètes les plans complexes notamment le plan de Cole – Cole et éventuellement d'envisager l'estimation du module statique E_{00} ou G_{00} (module obtenu pour des hautes températures et / ou basses fréquences) ainsi que le paramètre de calage h des modèles rhéologiques. Augmenter la fréquence et / ou diminuer la température peut permettre d'améliorer la détermination du module vitreux E_0 ou G_0 étant donné que pour cette gamme de températures et de fréquences la partie réelle du module complexe est égal au module vitreux. D'un point vue général, élargir la gamme de fréquence permettra d'établir plus d'isochrones de modules complexes et d'angle de phase et de pouvoir, déterminer un coefficient de translation a_T aux fréquences ultrasonores par la méthode mathématique présentée par Chailleux et al. [Chailleux, 2006].

Concernant la détermination expérimentale du facteur d'atténuation des ondes, il semble nécessaire de cerner plus en détail tous les mécanismes en présence dans le matériau et de pouvoir les quantifier séparément afin de pouvoir s'affranchir de l'utilisation d'un modèle rhéologique en parallèle de l'essai ultrasonore. Pour cela, la modélisation de la propagation d'onde pour un milieu hétérogène, soit par éléments finis soit par modèles autocohérents, peut répondre à ce problème.

Pour finir, nous avons fait l'hypothèse de matériaux isotropes pour la détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux. Bien que pour nos matériaux celle-ci ait été suffisante, une caractérisation en trois dimensions des matériaux dans le but de les considérer comme orthotropes peut être réalisée.

Références bibliographiques

- [Arabani, 2009] Arabani M., Kheiry P.T, Ferdosi B., Laboratory evaluation of the effect of HMA mixt parameters on ultrasonic pulse wave velocities, *Road Materials and pavement Design*, Vol. 10 (1), p 223 – 232, 2009
- [Barnes, 2009 (a)] Barnes C.L., Trottier J.F., Evaluating high-frequency visco-elastic in asphalt concrete, *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 20 (2), p 116 – 130, 2009
- [Barnes, 2009 (b)] Barnes C.L., Trottier J.F., Evaluating in-service asphalt concrete damage using surface waves, *International Journal of Pavement Engineering*, p 1 – 10, 2009
- [Barnes, 2010] Barnes C.L., Trottier J.F., Evaluating laboratory-induced asphalt concrete moisture damage using surface waves, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 11, n°6, p 489 – 497, 2010
- [Baron, 1982] Baron J., Sauterey R., *Le béton hydraulique : Connaissance et pratique*, Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussée, 1982
- [Behroozi, 2010] Behroozi F., Smith J., Even W., Stokes' dream : Measurement of fluid viscosity from the attenuation of capillary waves, *American Journal of Physics*, Vol. 78, n°11, 2010
- [Benatar, 2003] Benatar A., Rittel D., Yarin A.L., Theoretical and experimental analysis of longitudinal wave propagation in cylindrical viscoelastic rods, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 51, p 1413 – 1431, 2003
- [Bennamane, 2010] Bennamane A., Khalk N., Houhat N., Boutkedjirt T., Dépendance fréquentielle de l'absorption des ultrasons dans les matériaux viscoélastiques : simulation et mesures expérimentales, *Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Métaux, IC-WNDT-MT'10*, 2010
- [Bilgutay, 1989] Bilgutay N., Onaral B., Nicoletti D., Nondestructive evaluation of grain size distributions using multifractal analysis of backscattered ultrasonic signals, *Electrical and Computer Engineering*, Department Drexel University, Philadelphia, 1989
- [Biligiri, 2009] Biligiri K.P., Kaloush K.E, Prediction of pavement materials' impedance using ultrasonic pulse velocity, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 10 (4), p 767 – 787, 2009

- [Birgisson 2006] Birgisson B., Roque R., Page G.C., Ultrasonic pulse wave velocity test for monitoring changes in Hot-Mix Asphalt integrity from exposure to moisture, Transportation Research Record 1832, p 173 – 181, 2006
- [Birgül, 2009] Birgül R., Hilbert transformation of waveforms to determine shear velocity in concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 39, p 696 – 700, 2009
- [Bodian, 2011] Propagation des ultrasons en milieu hétérogène et anisotrope : Application à l'évaluation des propriétés d'élasticité et d'atténuation d'aciers moulés par centrifugation et de soudures en inconel, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011
- [Bonnot, 1984] Bonnot J., Essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux rapport général, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, juillet – aout 1984, n°132, p 79 - 90
- [Bouchaala, 2007] Bouchaala F., Guennou C., Un modèle de prédiction des ondes sismiques en milieux géologiques visqueux, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2007
- [Bourbié, 1986] Bourbié T., Coussy O., Zinszner B., Acoustiques des milieux poreux, éditions Technip, 1986
- [Broch, 1990] Broch J.T., Principles of experimental frequency analysis, éditions Elsevier applied Science, 1990
- [Buannic, 2012] Buannic M., Di Benedetto H., Ruot C., Gallet T., Sauzéat C., Fatigue investigation of mastics and bitumens using annular shear rheometer prototype equipped with wave propagation system, 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, RILEM Bookseries, p 805 – 814, 2012
- [Caquot, 1937] Caquot A., Le rôle des matériaux dans le béton, Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, p 562 – 5582, 1937
- [Celaya, 2006] Celaya M., Nazarian S., Seismic testing to determine quality of Hot-Mix Asphalt, Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1946, p 113 – 122, 2006

- [Chailleux, 2006] Chailleux E., Ramond G., Such C., de la Roche C., A mathematical-based master-curve construction methode applied to complex modulus of nituminous materials, Road Materials and Pavement Design, EATA 2006, p 75 – 92, 2006
- [Charif, 1991] Charif K., Contribution à l'étude du comportement mécanique du béton bitumineux en petites et grandes déformations, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1991
- [Chan, 2012] Chan CM., On the interpretation of the shear wave velocity from bender element tests, ACTA Tehcnica Corviniensis – Bulletin of Engineering Tome V, 2012
- [Chekroun, 2008] Chekroun M., Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface, Thèse de doctorat, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Nantes), 2008
- [Christensen, 1992] Christensen D.W., Anderson D. A., Chemical-physical property relationships for asphalt cements and dispersed polar fluid model, American Chemical Society, Vol. 37, p 1279 – 1291
- [Clec'h, 2010] Clec'h P., Comportement des enrobés bitumineux sous sollicitation multidirectionnelle, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des travaux Publics, Université de Lyon, 2010
- [Corté, 2004] Corté J.F., Di Benedetto H., Matériaux routiers bitumineux 1- Description et propriétés des constituants, éditions Hermès / Lavoisier, 2004
- [De Larrard, 1988] De Larrard F., Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances, Rapport de Recherche LPC, 1988
- [De Larrard, 1994] De Larrard F., Sedran T., Optimization of ultra high-performance concrete by the use of a packing model, Cement and Concrete Research, Vol. 24 (6), p 997 – 1009, 1994
- [De Larrard, 2002] De Larrard F., Sedran T., Mixture – proportioning of high – performance concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 32 (11), p 1699 – 1704, 2002
- [de la Roche, 1996] de la Roche C., Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1996

[de la Roche, 2001] de la Roche C., Charrier J., Marsac P., Molliard J.M., Evaluation de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux – Apports de la thermographie infrarouge, Bulletins des Laboratoires des Ponts et Chaussées, p 19 – 28, 2001

[Delorme, 2007] Delorme J.L., de la Roche C., Wendling L., Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés, 2007

[de Oleviera, 2005] de Oleviera F.G.R., Candian M., Lucchette F.F. ;, Salgon J.L., Sales A., A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of brazilian hardwood, Building and Environment, Vol. 40, p 297-300, 2005

[de Oleviera, 2006] de Oleviera F.G.R., Sales A., Relationship between density and ultrasonic velocity in brazilian tropical woods, Bioresource technology, Vol. 97, p 2443-2446, 2006

[Di Benedetto, 2001] Di Benedetto H., Partl M.N., de la Roche Saint André C., Stiffness testing for bituminous mixtures, Materials and Structures, Vol. 34, p 66 – 70, 2001

[Di Benedetto, 2004] Di Benedetto H., Corté J.F., Matériaux routiers bitumineux 2 – Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges, éditions Hermès / Lavoisier, 2004

[Di Benedetto, 2007] Di Benedetto H., Delaporte B., Sauzéat C., Three-dimensional linear behavior of bituminous materials: experiments and modeling, International Journal of Geomechanisms, Vol. 7 (Special issue: Constitutive modeling and computational analysis of asphalt pavements), p 149-157, 2007

[Di Benedetto, 2008] Di Benedetto H., Minh N.H., Pouget S., Sauzéat C., Time-Temperature superposition principle for bituminous mixtures: three dimensional approach and extension in the non linear domain, Proceedings of the 1st International Conference on Transport Infrastructure, Beijing, p 178-188, 2008

[Di Benedetto, 2009] Di Benedetto H., Sauzéat C., Sohm J., Stiffness of bituminous mixtures using ultrasonic wave propagation, Road Materials and Pavement Design, Vol. 10 (4), p 789 – 814, 2009

[Di Benedetto, 2011] Di Benedetto H., Sauzéat C., Bilodeau K., Buannic M., Mangiafico S., Nguyen Q.T., Pouget S., Tapsoba N., Van Rompu J., General overview of the time-

temperature superposition principle validity for materials containing bituminous binder, International Journal of Roads and Airports, Vol. 1, n°1, p 35-52, 2011

[Dos Reis, 1999] Dos Reis H.L.M, Habboub A.K., Carpenter S.H., Nondestructive evaluation of complex moduli in asphalt concrete with an energy approach, Transportation Research Record, n°1681, p 170-178, 1999

[Doubbaneh, 1995] Doubbaneh E., Comportement mécanique des enrobés bitumineux des « petites » aux « grandes » déformations, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995

[Dunning, 2004] Dunning M., Karakouzian M, Vun R.Y., Bhardwaj M.C., Non-contact ultrasonic characterization of Hot Mix Asphalt (HMA), 16th World Conference of Non-Destructive Testing, 2004

[Garbacz, 2003] Garbacz A., Garboczi E.J., Ultrasonic evaluation methods applicable to polymer concrete composites, Materials and Construction Research Division, Buildings and Fire Research Laboratory, April 2003

[Garnier, 2009] Garnier V., Chaix J.F., Rossat M., Payan C., Corneloup G., Caractérisation non destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores, 19^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2009

[Grosse, 2008] Grosse C.U., Ohtsu M., Acoustic Emission Testing : Basic for Research – Applications in Civil Engineering, Springer, 2008

[Grove, 2010] Grove P., Application of nondestructive testing in civil engineering, Doctoral Thesis, University of Waterloo, Canada, 2010

[Guan, 2013] Guan J., Physical properties of Athabasca bitumen and liquid solvent mixtures, doctoral thesis, University of Calgary, 2013

[Gudmarsson, 2012] Gudmarsson A., Ryden N., Birgisson B., Application of resonant acoustic spectroscopy to asphalt concrete beams for determination of the dynamic modulus, Materials and Structures, Vol. 45, p 1903 – 1913, 2012

[Hende, 2002] Hendee W.R., Ritenour E.R., Medical Imaging Physics, Chap. 19, éditions Wiley-Liss, 2002

- [Hines, 1951] Hines C.O., Wave packets, the Poynting vector, and energy flow: Part II – Group propagation through dissipative isotropic media, *Journal Geophysics Research*, Vol. 56, p 1939 – 1953, 1951
- [Hochuli, 2001] Hochuli A.S., Sayir M.B., Poulidakos L.D., Partl M.N., Measuring the complex modulus of asphalt mixtures by structural wave propagation, 26th Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving technologists AAPT, Clearwater Beach Florida, USA, 19-21 March, 2001
- [Houel, 2007] Houel A., Arnaud L., Damage characterization of asphalt concrete specimens ultrasonic P and S wave propagation in laboratory, *Proceedings of the International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soils Engineering Materials*, 20-22 June 2007, Athens, Greece p 185 - 193
- [Houel, 2009] Houel A., Arnaud L., Damage characterization of asphalt in laboratory by ultrasonic wave propagation, *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2009
- [Huet, 1963] Huet C., Etude par une methode d'impédance du comportement visco-élastique des matériaux hydrocarbonés, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Paris, 1963
- [Hull, 2001] Hull A.J., A nonresonant technique to estimate the mechanical material properties of a viscoelastic cylinder, *Naval Undersea Warfare Division Center Division*, 2001
- [Hunaidi, 1998] Hunaidi O., Evolution-based genetic algorithms for analysis of non-destructive surface wave tests on pavements, *NDT&E International*, Vol. 31 (4), p 273 – 280, 1998
- [In, 2009] In CW, Kim JY, Kurtis K.E., Jacobs L.J., Characterization of ultrasonic Rayleigh surface waves in asphaltic concrete, *NDT&E International*, Vol. 42, p 610 – 617, 2009
- [Jiang, 2006] Jiang Z.Y., Ponniah J., Cascante G., Improved ultrasonic pulse velocity technique for bituminous material characterization, *Annual Conference of the Transportation Association of Canada Toronto*, 2006

- [Jiang, 2008] Jiang Z.Y., Ponniah J., Cascante G., Field condition assessment of longitudinal joints in asphalt pavements using seismic wave technology, Annual Conference of the Transportation Association of Canada Toronto, 2008
- [Jurado, 2008] Jurado M.C., Quantifying anisotropy in asphalt concrete pavements using an ultrasonic method, Thèse de doctorat, Université du Texas, 2008
- [Khazanovich, 2005] Khazanovich L., Velasquez R., Nesvijski G., Evaluation of top-down cracks in asphalt pavements by using a self-calibrating ultrasonic technique, Journal of the Transportation research Board, n° 1940, p 63 – 68, 2005
- [Lakes, 2006] Lakes R.S., Wineman A., On Poisson's ratio in linearity viscoelastic solids, Journal of Elasticity, Vol. 85, p 45 – 63, 2006
- [Landis, 2000] Landis E.N., Whittaker D.B., Acoustic emissions and the fracture energy of wood, Condition Monitoring of Materials and Structures, ASCE, p 21-29, 2000
- [Larcher, 2014] Larcher N., Takarli M., Angellier N., Petit C ;, Sebbah H., Towards a viscoelastic mechanical characterization of asphalt materials by ultrasonic measurements, Materials and Structures, 2014
- [Laugier, 2011] Laugier L., Haït G., Bone quantitative ultrasound, éditions Springer, 2011
- [Lefeuvre, 2001] Lefeuvre Y., Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux – Etude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus – Expérimentation – Modélisation, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2001
- [Le Huérou, 2003] Le Huérou J.Y., Gindre M., Urbach W., Waks M., Compressibility of nano inclusions in complex fluids by ultrasound velocity measurements, Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 50 (11), p 1595 – 1600, 2003
- [Lytton, 1993] Lytton R.L., Uzan J., Fernando E.G., Roque R., Hiltunen D., Stoffels S.M., Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes, SHRP-A-357, 1993

- [Madjadoumbaye, 2012] Madjadoumbaye J., Lezin Seba M., Takoukam Sandeu F., Tamo T.T., *Electronic Journal of Geotechnics Engineering*, Vol. 17, 2012
- [McCann, 2001] McCann D.M., Forde M.C., Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures, *NDT&E international*, Vol. 34, p 71 – 84, 2001
- [McGennis, 1994] McGennis R.B., Shuler S., Bahia H.U., Background of SUPERPAVE asphalt binder test methods, Final Report, 1994
- [Molyneux, 2000] Molyneux J.B., Schmitt D.R., Compressional-wave velocities in attenuating media: a laboratory physical model study, *Geophysics*, Vol. 65 (4), p 1162 – 1167, 2000
- [Mounier, 2012] Mounier D., Di Benedetto H., Sauzéat C., Determination of bituminous mixtures linear properties using ultrasonic wave propagation, Vol. 36, p 638 – 647, 2012
- [NF EN 12591] Bitumes et liants bitumineux – Spécifications des bitumes
- [NF EN 12697] Mélanges bitumineux – Méthodes d’essai pour mélange hydrocarboné à chaud
- [NF EN 13924] Bitumes et liants bitumineux – Spécifications des bitumes routiers de grade dur
- [NF EN 14023] Bitumes et liants bitumineux – Cadre des spécifications des bitumes modifiés par des polymères
- [Nguyen, 2007] Nguyen HN., Hammoum F., Ehrlacher A., Chailleux E., Analyse de la rupture d’un film de bitume par la méthode des éléments finis, 18^{ème} Congrès de Mécanique, 2007
- [Nita, 2011] Nita I., Geacai S., Study of density and viscosity variation with temperature for fuels used for Diesel engine, *Ovidius University Annals of Chemistry*, Vol. 22 (1), p 57 – 61, 2011
- [Norambuena-Contreras, 2010] Norambuena-Contreras J., Castro-Fresno D., Vega-Zamanillo A., Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test, *NDT&E International*, Vol 43, p 629 – 634, 2010

[Olard, 2003 (a)] Olard F., Di Benedetto H., General “2S2P1D” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 4 (2), p 185 – 224, 2003

[Olard, 2003 (b)] Olard F., Comportement thermomécanique des enrobes bitumineux à basses températures – Relations entre les propriétés du liant et de l’enrobé, Thèse de doctorat, 2003

[Olard, 2005] Olard F., Di Benedetto H., Dony A., Vaniscote J.C., Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics, *Materials and Structures*, Vol. 38, p 121 – 126, 2005

[Olard, 2012] Olard F., GB5 mix design: high-performance and cost-effective asphalt concretes by use of gap-graded curves and SBS modified bitumens, *Road Materials and Pavement Design*, 2012

[Pandey, 2010] Pandey D.K, Pandey S., Ultrasonics: a technique of material characterization, *Acoustic Waves*, chap. 18, édité par Don W. Dissnayake, 2010

[Peters, 2003] Peters F., Petit L., A broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media, *Ultrasonics*, Vol. 41 (5), p 357 – 363, 2003

[Piwakowski, 2004] Piwakowski B., Fnine A., Goueygou M., Buyle-Bodin F., Generation of Rayleigh waves in mortar and concrete samples, *Ultrasonics*, Vol.42, p 395 – 402, 2004

[Planche, 1997] Planche J.P., Martin D., Rey C., Champion L., Gérard J.F., Evaluation du durcissement physique des bitumes à froid : Une autre méthode pour mesurer leur teneur en paraffines, *RILEM*, Rotterdam, p 167 – 171, 1997

[Raggozino, 1981] Raggozino M., Analysis of the error in measurement of ultrasonic sound velocity in tissue due to waveform deformation by frequency-dependent attenuation, *Ultrasonics*, Vol. 19, p 135 – 138, 1981

[Ramuhalli, 2009] Ramuhalli P., Good M.S., Diaz A.A., Anderson M.T., Watson B.E., Peters T.J., Dixit M., Bond L.J., Ultrasonic characterization of cast austenitic stainless steel microstructure : discrimination between equiaxed and columnar grain material – An interim

study, US Nuclear Regulatory Commission under an Interagency Agreement with the US Department of Energy, 2009

[Rojas, 1999] rojas J., nazarian S., Tandon V., yuan D., Quality management of asphalt concrete layers using wave propagation techniques, Center for Highway Materials Research, University of Texas at el Paso, Research Report 1735-2, July 1999

[Ryden, 2009] Ryden N., Determining the asphalt mastercurve from free-free resonant testing on cylindrical samples, NDTCE'09, Non-Destructive Civil Engineering, 2009

[Sanish, 2012] Sanish K.B., Santhanam M., Characterization of strength development of concrete using ultrasonic method, 18th World Conference on Non-Destructive Testing, Durban, South Africa, 2012

[Saniie, 1989] Saniie J., Wang T., Biltugay N.M., Analysis of homomorphic processing for ultrasonic grain signal characterization, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 36 (3), 1989

[Schaschke, 2013] Schaschke C., Fletcher I., Glen N., Density and viscosity measurement of diesel fuels at combined high pressure and elevated temperature, Processes, Vol. 1 (2), p 30 – 48, 2013

[Simonetti, 2003] Simonetti F., Sound propagation in lossless waveguides coated with attenuative materials, these de doctorat, Université de Londres

[Simonin, 2005] Simonin J.M., Contribution à l'étude de l'auscultation des chaussées par méthode d'impact mécanique pour la détection et la caractérisation des défauts d'interface, Thèse de doctorat, 2005

[Singh, 2012] Singh R.N., George A.K., Al-Namaani D.N., Propagation of viscous waves and activation energy of hydrocarbon fluids, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 72, 2012

[Taner, 1979] Taner M.T., Koehler F., Sheriff R.E., Complex seismic trace analysis, Geophysics, Vol. 44, n°6, p 1041 – 1063, 1979

- [Tie, 2010] Tie B., Solas D., Thébault J., Rey C., Baudin T., Mouronval A.S., Modélisation numérique de la propagation des ultrasons dans les milieux polycristallins, 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, 2010
- [Tigdemir, 2004] Tigdemir M., Kalyoncuoglu S.F., Kalyoncuoglu U.Y., Application of ultrasonic method in asphalt concrete testing for fatigue life estimation, NDT&E International, Vol. 37, p 597 – 602, 2004
- [Underwood, 2003] Underwood S., Kim Y.R, Determination of depth of surface cracks in asphalt pavements, Journal of the Transportation Research Board 1853, p 143 – 149, 2003
- [Van der Poel, 1954] Van der Poel C., A general system describing the viscoelastic properties of bitumen and its relation to routine test data, Journal of Applied Chemistry, Vol. 4 (5), 1954
- [Van Velsor, 2011] Van Velsor J.K., Premkumar L., Chehab G., Rose J.L., Measuring the complex modulus of asphalt concrete using ultrasonic testing, Journal of Engineering Science and technology Review, Vol. 4 (2), p 160 – 168, 2011
- [Waterman, 1977] Waterman H.A., Relations between loss angles in isotropic linear viscoelastic materials, Rheologica Acta, Vol. 16, p 31-42, 1977
- [Williams, 1955] Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D., The temperature dependence of relaxation mechanism in amorphous polymers and others glass-forming liquids, Journal of the American Chemical Society, Vol. 77, p 3701 – 3707, 1955
- [Winkler, 1982] Winkler K.W., Plona T.J., Technique for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra in rocks under pressure, Journal of Geophysical research: Solid Earth, Vol. 87 (13), 1982
- [Yusoff, 2010] Yusoff N.I.Md., Mounier D., Airey G.D., The 2S2P1D : an excellent linear viscoelastic model, e-Journal of Civil Engineering, Vol. 1, n° 2, 2010
- [Yusoff, 2011] Yusoff N.I.Md., Shaw M.T., Airey G.D., Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders, Construction and Building Materials, Vol. 25, p 2171 – 2189, 2011

[Yusoff, 2012] Yussof N.I.Md., Mounier D., Ginoux M.S., Airey G;D., Modelling the rheological properties of bituminous binders using a mechanical model, Journal – The Institution of Engineers, Vol. 73, n° 2, 2012

[Zarrabi, 2005] Zarrabi M., A new procedure for estimation of shear wave velocity profiles using multi station spectral analysis of surface waves, regression line slope, and genetic algorithm methods, Thèse de doctorat, Université de Memphis, 2005

Annexes

A - I - Cartographie ultrasonore du matériau GB3

Dans cette annexe, la cartographie de vitesse du matériau GB3 est présentée réalisée selon la direction 2 (celle du compactage).

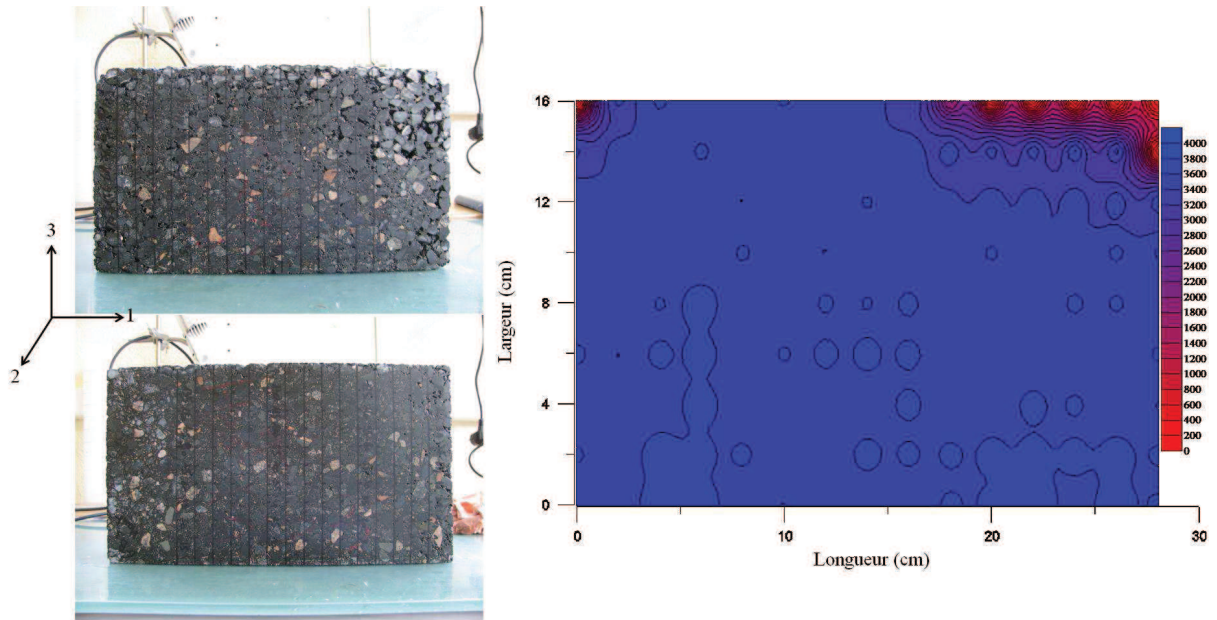


Figure A. 1 : Cartographie des vitesses de propagation pour le matériau GB3

A - II - Résultats mécaniques de l'essai DSR sur le bitume 35 / 50

Les résultats numériques de l'essai DSR réalisé par l'entreprise EIFFAGE Travaux Publics sur le bitume 35/50 sont présentés dans le Tableau A. 1.

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module de cisaillement G* (Pa)	Phase (°)
70	0,03	17	77,6
70	0,119	64	85,5
70	0,475	247	85,8
70	1,89	950	86,8
70	7,54	3690	81,9
70	30	22700	90
60	0,03	62	86,8
60	0,119	242	87,6
60	0,475	929	86,1
60	1,89	3470	85
60	7,54	12600	82,7
60	30	51500	90
50	0,03	330	86,1
50	0,119	1250	85,2
50	0,475	4590	82,9
50	1,89	16200	80,2
50	7,54	54700	76,3
50	30	178000	75,8
40	0,03	2280	83,7
40	0,119	8070	80,8
40	0,475	27300	77,8
40	1,89	88100	74,6
40	7,54	271000	71,2
40	30	791000	67,7
30	0,03	22800	76,9
30	0,119	72600	73,5
30	0,475	219000	69,9
30	1,89	625000	65,6
30	7,54	1650000	60,7
30	30	4040000	55,6
15	0,03	936000	60,9
15	0,119	2290000	55,3
15	0,475	5130000	49,8
15	1,89	10500000	44,5
15	7,54	20000000	39,6
15	30	35400000	35,1

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module de cisaillement G* (Pa)	Phase (°)
10	0,01	1520000	57,7
10	0,038	3450000	51,9
10	0,144	7140000	46,6
10	0,548	13700000	41,5
10	2,08	24400000	36,9
10	7,9	40800000	32,7
10	30	64300000	28,8
0	0,01	12200000	42,3
0	0,038	22000000	37,2
0	0,144	36700000	32,7
0	0,548	57800000	28,6
0	2,08	85800000	24,9
0	7,9	121000000	21,5
0	30	162000000	18,3
-10	0,01	61800000	28,5
-10	0,038	91800000	24,4
-10	0,144	127000000	20,6
-10	0,548	169000000	17,7
-10	2,08	215000000	14,9
-10	7,9	262000000	12,4
-10	30	310000000	10,2
-20	0,01	173000000	18,4
-20	0,038	221000000	16,8
-20	0,144	268000000	13,7
-20	0,548	317000000	10,5
-20	2,08	363000000	8,5
-20	7,9	406000000	6,8
-20	30	444000000	5,4
-30	0,01	279000000	14,0
-30	0,038	333000000	11,2
-30	0,144	380000000	9,0
-30	0,548	423000000	6,6
-30	2,08	462000000	5,3
-30	7,9	494000000	4,2
-30	30	522000000	3,4

Tableau A. 1 : Résultats de l'essai de module complexe du bitume 35/50

A - III - Résultats de l'essai de traction / compression du matériau GB3

Le matériau GB3 a été caractérisé mécaniquement par l'ENTPE. Pour cela, un essai de module complexe en traction / compression sur une éprouvette cylindrique a été réalisé. Le tableau suivant présente les résultats numériques de l'essai (Tableau A. 2).

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module d'Young E* (MPa)	Phase E* (°)	v ₂	Phase v ₂ (°)	v ₃	Phase v ₃ (°)
39	0,03	92,77	37,55	0,43	4,27	0,38	3,81
39	0,10	134,48	41,87	0,46	3,10	0,41	2,40
39	0,30	214,25	46,44	0,47	1,50	0,43	1,16
39	1	387,49	50,55	0,48	-0,10	0,44	0,05
39	3	691,85	52,09	0,48	-1,55	0,43	-0,94
39	10	1341,96	51,01	0,48	-2,81	0,43	-2,40
29	0,03	255,18	52,29	0,47	-0,35	0,43	-0,24
29	0,10	440,99	53,23	0,47	-1,01	0,43	-0,76
29	0,30	781,54	52,22	0,47	-1,63	0,43	-1,24
29	1	1476,20	49,11	0,47	-2,64	0,42	-1,86
29	3	2511,35	44,94	0,45	-3,16	0,41	-2,74
29	10	4299,11	38,82	0,45	-3,68	0,40	-4,23
20	0,03	991,62	45,32	0,44	-0,54	0,41	0,29
20	0,10	1570,50	45,91	0,45	-1,58	0,42	-0,85
20	0,30	2542,95	42,97	0,44	-2,37	0,41	-1,86
20	1	4205,13	37,64	0,43	-3,03	0,40	-2,91
20	3	6272,17	32,17	0,42	-3,53	0,39	-3,96
20	10	9169,04	26,27	0,40	-4,15	0,37	-5,11
16	0,03	1737,46	43,14	0,44	-1,48	0,41	-0,83
16	0,10	2734,39	41,40	0,44	-2,20	0,40	-1,92
16	0,30	4227,44	37,04	0,43	-2,78	0,39	-2,61
16	1	6508,67	31,18	0,41	-3,34	0,38	-3,59
16	3	9061,42	26,00	0,40	-3,83	0,36	-4,35
16	10	12412,67	20,87	0,37	-4,40	0,34	-5,22
11	0,03	3390,86	37,18	0,43	-1,95	0,40	-1,88
11	0,10	4981,50	34,03	0,42	-2,54	0,38	-2,55
11	0,30	7088,68	29,37	0,41	-3,07	0,37	-3,38
11	1	9933,47	24,10	0,39	-3,79	0,35	-3,93
11	3	12866,22	19,79	0,37	-4,05	0,33	-4,24
11	10	16396,72	15,88	0,35	-4,16	0,32	-4,86

2	0,03	10004,70	22,28	0,38	-2,88	0,35	-3,17
2	0,10	12642,34	19,20	0,36	-3,45	0,33	-3,40
2	0,30	15429,01	16,07	0,35	-3,70	0,32	-3,42
2	1	18629,01	13,01	0,33	-3,84	0,30	-3,45
2	3	21588,57	10,78	0,31	-3,52	0,29	-2,92
2	10	24960,53	8,80	0,31	-2,54	0,29	-3,70
-6	0,03	19446,05	11,70	0,33	-3,47	0,30	-2,70
-6	0,10	22219,44	9,99	0,31	-3,19	0,29	-2,49
-6	0,30	24771,99	8,35	0,30	-2,80	0,28	-2,20
-6	1	27387,88	6,91	0,29	-2,52	0,27	-1,91
-6	3	29803,93	5,89	0,28	-2,06	0,26	-1,63
-6	10	32820,81	4,71	0,30	-2,22	0,26	-2,81
-16	0,03	28533,72	6,16	0,28	-2,37	0,27	-1,73
-16	0,10	30723,64	5,23	0,28	-2,02	0,26	-1,56
-16	0,30	32566,63	4,45	0,27	-1,80	0,26	-1,10
-16	1	34380,44	3,66	0,27	-1,40	0,25	-0,68
-16	3	36164,18	3,13	0,27	-1,18	0,25	-0,29
-16	10	38113,62	2,77	0,27	-0,18	0,25	-1,33
-25	0,03	36211,38	3,11	0,26	-0,64	0,26	-0,04
-25	0,10	37570,84	2,68	0,26	-0,48	0,26	-0,29
-25	0,30	38649,17	2,23	0,25	-0,68	0,26	0,01
-25	1	39700,80	1,80	0,25	-0,54	0,26	0,39
-25	3	40709,83	1,83	0,26	0,14	0,25	0,46
-25	10	42404,42	1,19	0,29	-1,31	0,27	-0,61

Tableau A. 2 : Résultats de l'essai de module complexe du matériau GB3

A - IV - Résultats de l'essai de traction / compression du matériau GB5

Le matériau GB5 a été caractérisé mécaniquement par l'ENTPE. Pour cela, un essai de module complexe en traction / compression sur une éprouvette cylindrique a été réalisé. Le tableau suivant présente les résultats numériques de l'essai (Tableau A. 2).

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module d'Young E* (MPa)	Phase E* (°)	v ₂	Phase v ₂ (°)	v ₃	Phase v ₃ (°)
39	0,03	29,16	60,29	0,62	-0,71	0,64	-3,73
39	0,10	58,88	61,50	0,63	-0,97	0,58	-3,87
39	0,30	118,30	62,27	0,60	-1,61	0,53	-4,12
39	1	258,81	61,98	0,58	-2,15	0,49	-3,26
39	3	529,17	60,61	0,57	-3,52	0,46	-2,81
39	10	1141,95	57,14	0,54	-5,32	0,44	-3,05
29	0,03	174,62	56,57	0,54	0,70	0,48	-2,22
29	0,10	336,29	57,61	0,53	-1,53	0,47	-2,12
29	0,30	639,97	56,46	0,54	-3,02	0,45	-1,97
29	1	1277,37	53,22	0,54	-4,38	0,43	-2,00
29	3	2319,09	48,87	0,53	-5,49	0,42	-2,73
29	10	4277,31	41,66	0,50	-6,14	0,41	-4,34
21	0,03	569,86	55,03	0,54	-2,48	0,45	-1,07
21	0,10	1107,51	52,85	0,53	-3,89	0,44	-1,37
21	0,30	2006,79	48,73	0,52	-4,86	0,44	-1,56
21	1	3646,92	42,92	0,50	-5,60	0,43	-2,88
21	3	5790,55	36,51	0,47	-6,25	0,41	-3,79
21	10	9103,34	28,88	0,45	-6,34	0,38	-5,41
16	0,03	1340,84	49,67	0,52	-4,15	0,44	-0,77
16	0,10	2437,62	45,78	0,49	-4,45	0,42	-1,57
16	0,30	4035,50	40,61	0,49	-5,33	0,42	-2,67
16	1	6523,03	34,05	0,47	-6,06	0,40	-3,68
16	3	9459,56	27,87	0,45	-6,04	0,38	-4,59
16	10	13440,31	21,62	0,40	-6,54	0,36	-5,88
12	0,03	3046,03	42,52	0,48	-4,31	0,42	-1,47
12	0,10	4992,38	37,04	0,47	-5,46	0,41	-2,75
12	0,30	7401,42	31,51	0,45	-6,02	0,39	-3,32
12	1	10628,63	25,57	0,42	-6,11	0,37	-4,42
12	3	14081,53	20,42	0,39	-5,90	0,35	-5,02
12	10	18257,18	15,57	0,36	-5,65	0,32	-6,08
3	0,03	10323,51	25,21	0,41	-5,73	0,37	-3,60
3	0,10	13666,93	20,50	0,38	-5,44	0,35	-4,05
3	0,30	16956,74	16,82	0,36	-5,94	0,33	-4,42
3	1	20625,36	13,37	0,34	-4,61	0,31	-4,26
3	3	24006,40	11,04	0,32	-3,36	0,30	-3,77

-6	0,03	21189,34	12,74	0,33	-4,95	0,31	-4,37
-6	0,10	24531,53	10,33	0,31	-3,72	0,30	-3,27
-6	0,30	27449,13	8,57	0,31	-3,40	0,29	-3,39
-6	1	30374,87	6,98	0,30	-3,55	0,28	-2,69
-6	3	32982,04	6,15	0,28	-1,30	0,26	-2,34
-15	0,03	31680,39	6,38	0,28	-2,72	0,28	-1,67
-15	0,10	34239,99	5,27	0,27	-1,80	0,27	-2,03
-15	0,30	36356,88	4,40	0,27	-1,59	0,26	-2,15
-15	1	38413,91	3,58	0,26	-0,78	0,26	-1,80
-15	3	40234,61	3,59	0,26	1,38	0,26	-0,50
-24	0,03	39903,46	3,00	0,24	-1,59	0,25	-1,76
-24	0,10	41538,21	2,47	0,24	-0,53	0,26	-1,67
-24	0,30	42708,61	2,08	0,24	-0,42	0,25	-1,51
-24	1	43871,55	1,68	0,24	-0,36	0,25	0,07
-24	3	44698,93	1,45	0,23	-0,29	0,25	2,11

Tableau A. 3 : Résultats de l'essai de module complexe du matériau GB5

A - V - Comparaison des grandeurs caractéristiques en fonction des différentes fréquences d'excitation du transducteur

La Figure A. 2 et Figure A. 3 montrent les grandeurs caractéristiques de propagation des ondes (vitesse de phase et facteur d'atténuation) en fonction de la fréquence pour différentes fréquences d'excitation des transducteurs. On constate tout d'abord que quelles que soient les fréquences d'excitation des transducteurs les valeurs des vitesses de phase (Figure A. 2) et du facteur d'atténuation (Figure A. 3) sont relativement similaires : la fréquence d'excitation du transducteur n'influence donc pas la détermination des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes. Cependant, le fait d'exciter le transducteur à une fréquence plus élevée (700 kHz), permet de palier aux phénomènes d'atténuation préférentielle des hautes fréquences et d'obtenir des grandeurs de propagation des ondes cohérentes sur une plus large gamme fréquentielle notamment pour le facteur d'atténuation des ondes (Figure A. 3).

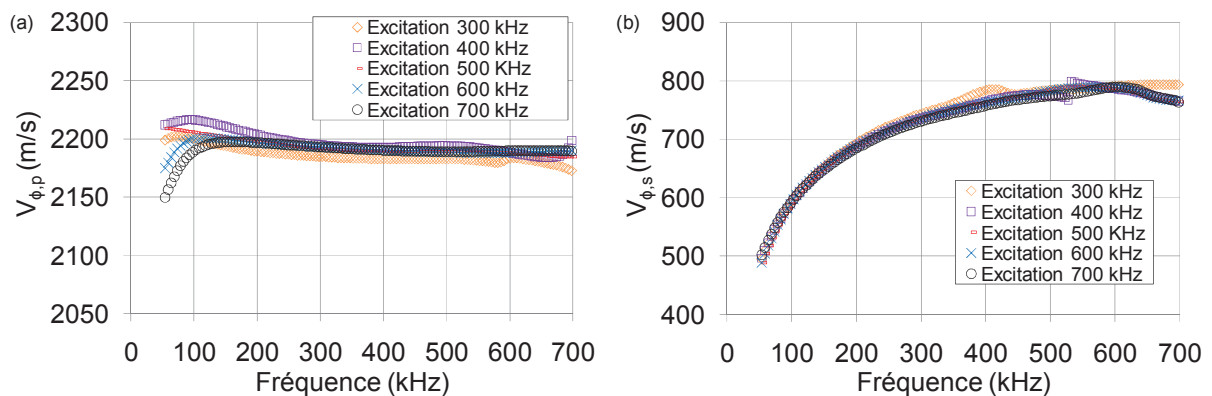


Figure A. 2 : Comparaison de la vitesse de propagation en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement

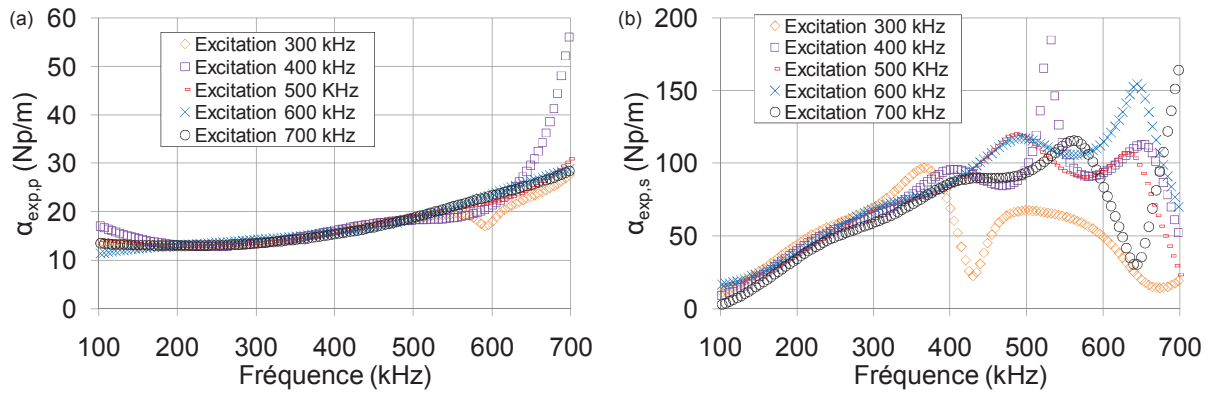


Figure A. 3 : Comparaison du facteur d'atténuation en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement

A - VI - Résultats ultrasonores obtenus sur le bitume présentés sur une large gamme fréquentielle

Dans cette annexe, les résultats présentés sur la bande passante des signaux pour le bitume 35/50 dans le chapitre IV sont à nouveaux présentés sur une large gamme fréquentielle afin de constater l'intérêt de l'utilisation de la bande passante.

A - VI - 1 - Déphasage des signaux

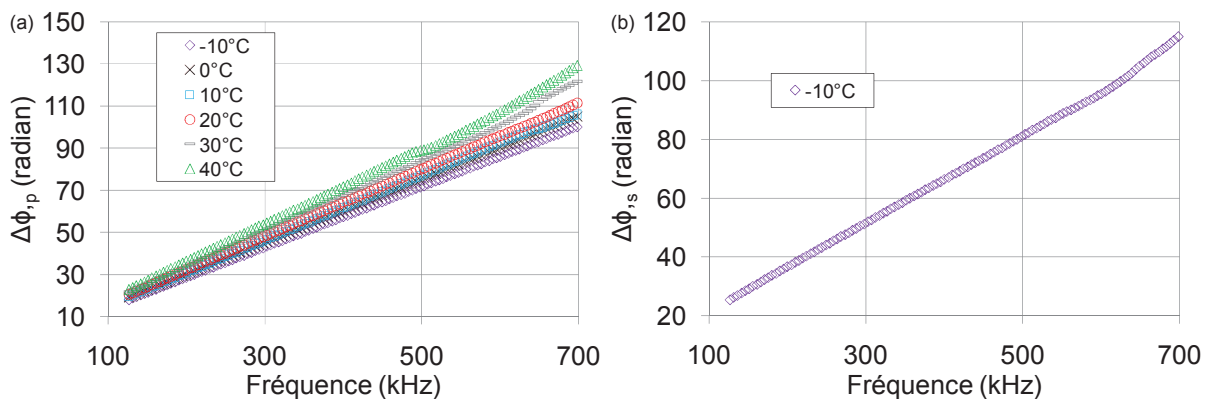


Figure A. 4 : Déphasage en fonction de la température des signaux (a) de compression (b) de cisaillement

A - VI - 2 - Vitesse de propagation

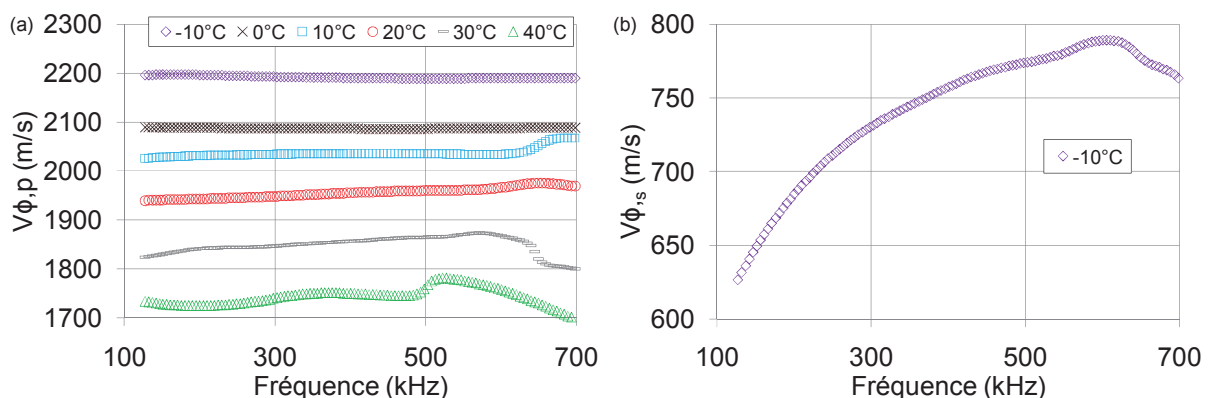


Figure A. 5 : Isothermes des vitesses de phase des signaux (a) de compression (b) de cisaillement

A - VI - 3 - Facteur d'atténuation

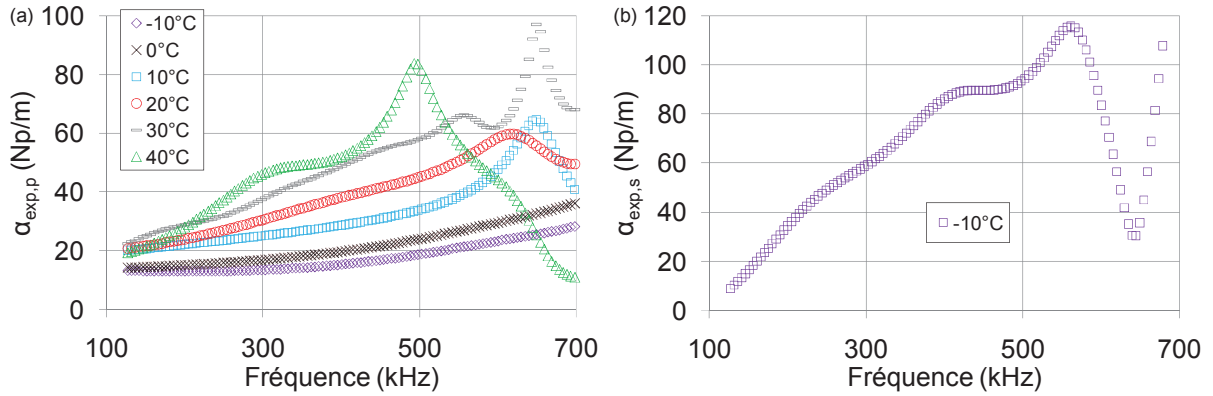


Figure A. 6 : Isothermes du facteur d'atténuation des signaux (a) de compression (b) de cisaillement

A - VI - 4 - Longueur d'onde

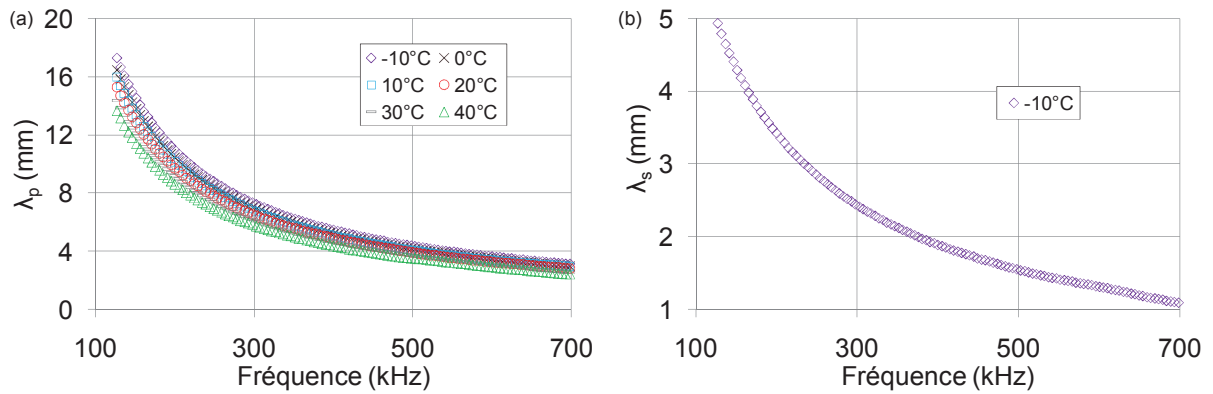


Figure A. 7 : Longueur d'onde des signaux (a) de compression (b) de cisaillement

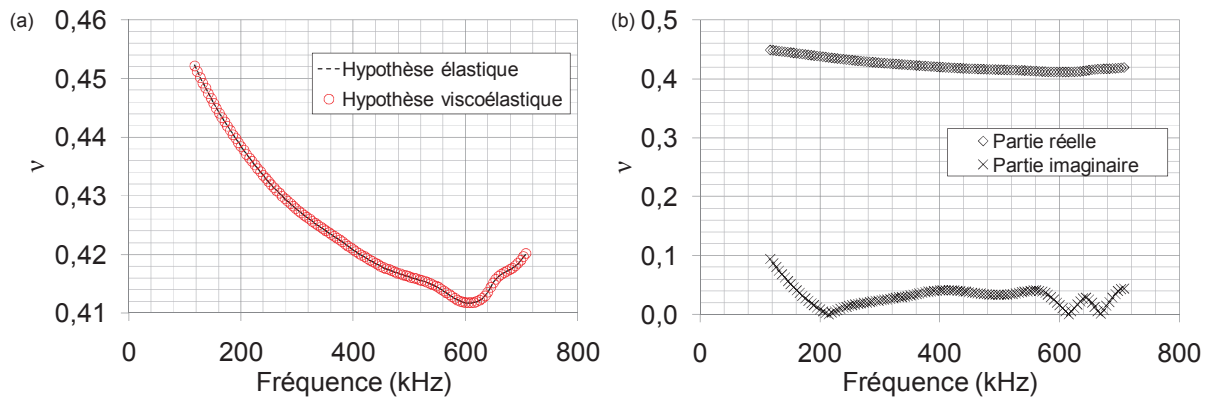
A - VI - 5 - Coefficient de Poisson

Figure A. 8 : (a) Comparaison du coefficient de Poisson déterminé selon les hypothèses élastique et viscoélastique (b) Partie réelle ν_1 et imaginaire ν_2 du coefficient de Poisson complexe ν^*

A - VII - Résultats ultrasonores obtenus sur les graves bitumes sur une large gamme fréquentielle

Les résultats présentés ici viennent compléter les résultats présentés dans le chapitre V en les montrant sur une plus large gamme fréquentielle afin de constater l'intérêt de l'utilisation de la bande passante.

A - VII - 1 - Déphasage des signaux

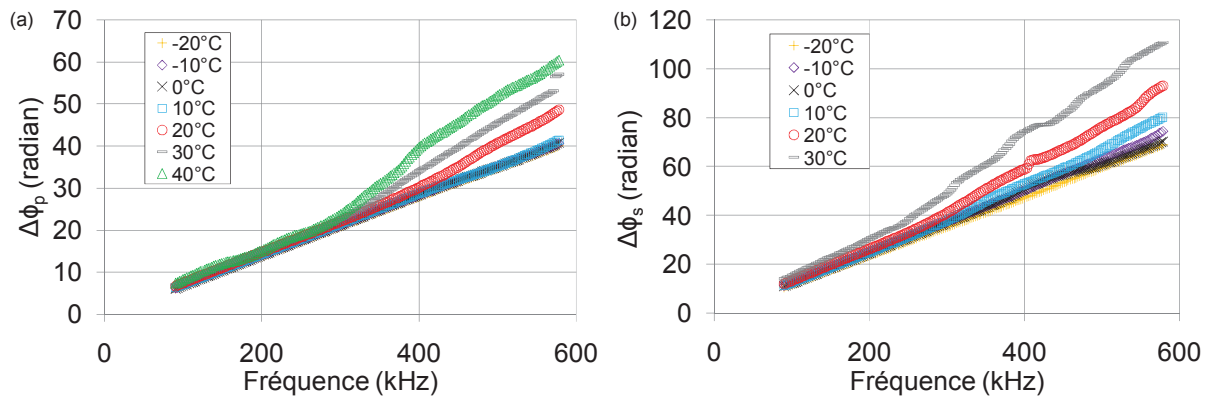


Figure A. 9 : Déphasage en fonction de la température pour le matériau GB5 des signaux (a) de compression (b) de cisaillement

A - VII - 2 - Vitesse de propagation

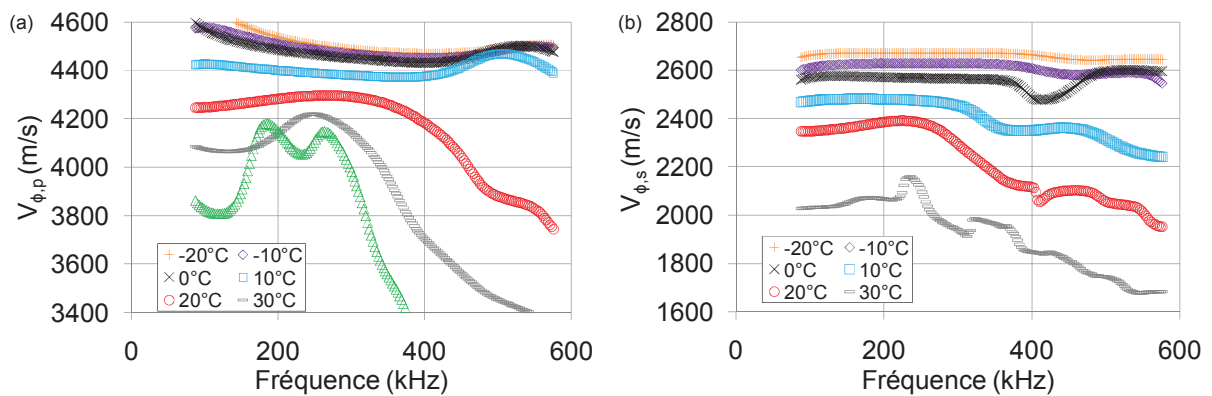


Figure A. 10 : Isothermes des vitesses de phase pour le matériau GB5 (a) pour les ondes de compression (b) de cisaillement

A - VII - 3 - Facteur d'atténuation

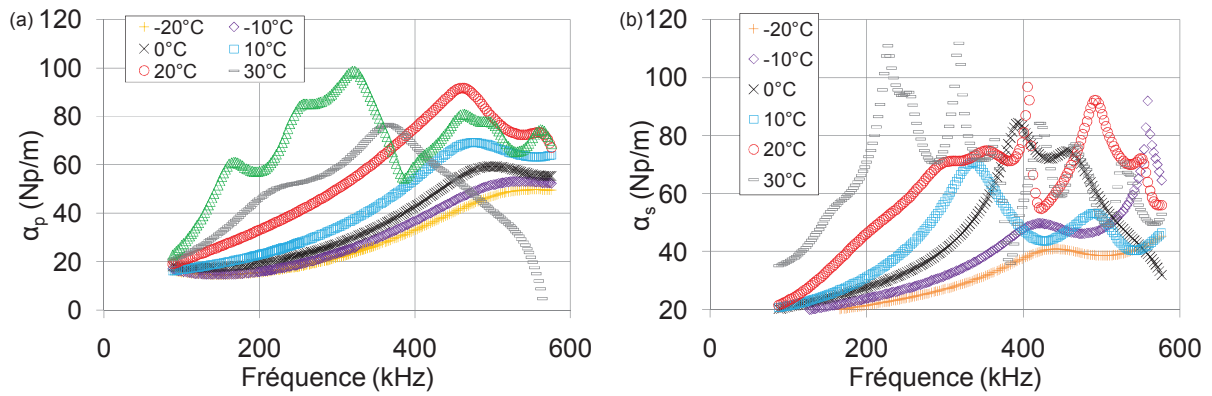


Figure A. 11 : Isothermes du facteur d'atténuation pour le matériau GB5 des ondes (a) de compression (b) de cisaillement

A - VII - 4 - Longueur d'ondes

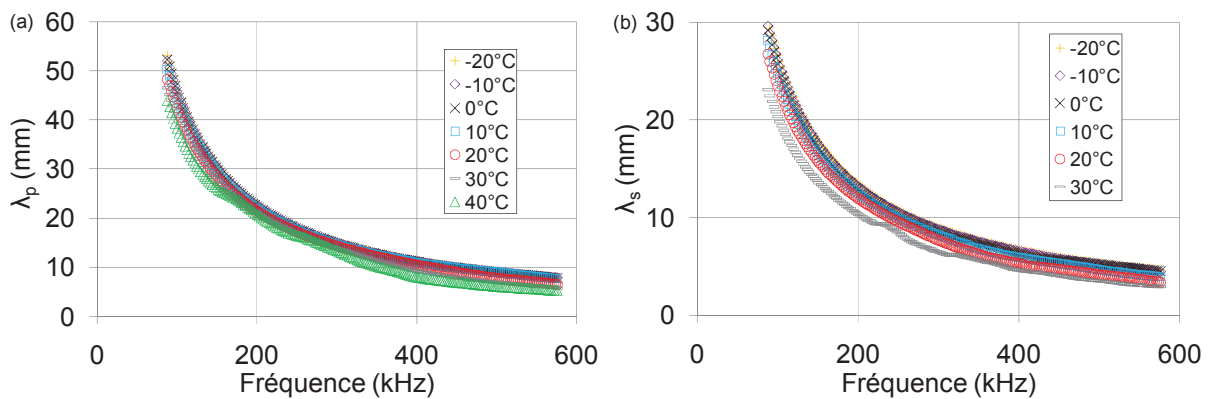


Figure A. 12 : Longueur d'onde des ondes (a) de compression (b) de cisaillement pour le matériau GB5

A - VII - 5 - Coefficient de Poisson

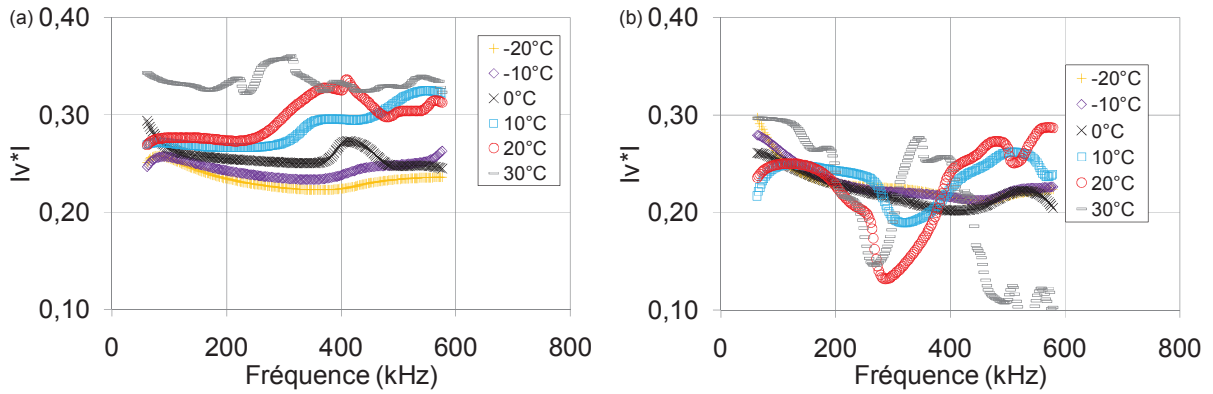


Figure A. 13 : Coefficient de Poisson expérimentaux pour le matériau (a) GB5 (b) GB3

A - VII - 6 - Modules complexes d'Young

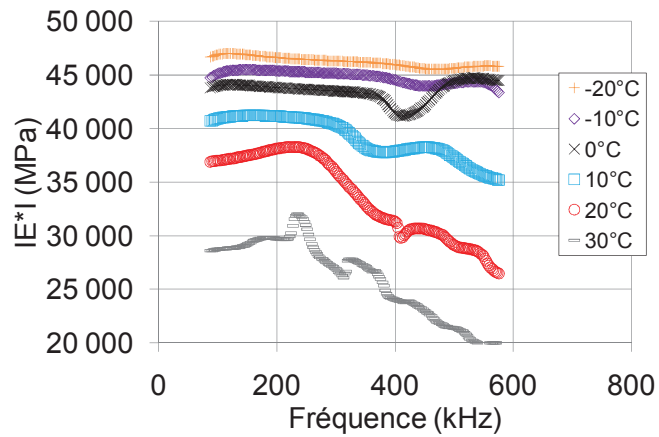


Figure A. 14 : Isothermes du module d'Young complexe du matériau GB5

Nomenclature

Grandeurs caractéristiques des matériaux

SYMBOLE	SIGNIFICATION
ρ	masse volumique
E	module d'Young élastique
G	module de cisaillement élastique
$ E^* $	norme du module d'Young complexe
$ G^* $	norme du module de cisaillement complexe
E_1	partie réelle du module d'Young
G_1	partie réelle du module de cisaillement
E_2	partie imaginaire du module d'Young
G_2	partie imaginaire du module de cisaillement
φ	angle de phase
ν	coefficient de Poisson élastique
$ \nu^* $	coefficient de Poisson complexe
ν_1	partie réelle du coefficient de Poisson
ν_2	partie imaginaire du coefficient de Poisson
D	diamètre du plus gros grain
a_T	coefficient de translation
λ, μ	coefficients de Lamé

Propagation d'onde

SYMBOLE	SIGNIFICATION
σ	composantes du tenseur des contraintes
ε	composantes du tenseur des déformations
C	matrice de rigidité
u_i	champ de déplacement
k	nombre d'onde
k^*	nombre d'onde complexe
α_{total}	facteur d'atténuation global
$\alpha_{visqueux}$	facteur d'atténuation causé par l'absorption
$\alpha_{diffusion}$	coefficient d'atténuation causé par la diffusion
$\alpha_{diffusion}$	coefficient d'atténuation causé par l'étalement géométrique
$\Delta\phi$	déphasage entre les signaux
L_1	distance de propagation la plus petite
L_2	distance de propagation la plus grande
ΔL	différence entre les distances de propagation
V_g	vitesse de groupe
V_ϕ	vitesse de phase
λ	longueur d'onde
f	fréquence
ω	pulsation ($\omega = 2\pi f$)
A	amplitude d'une onde

Modélisation rhéologique

SYMBOLE	SIGNIFICATION
β	constante
η	viscosité newtonienne
δ	constante
ω	pulsation ($\omega = 2\pi f$)
E_{00} ou G_{00}	module statique
E_0 ou G_0	module vitreux
h	exposant tel que $0 < h < 1$
ν_0	coefficient de Poisson à hautes fréquences et / ou basses températures
ν_{00}	coefficient de Poisson à basses fréquences et / ou hautes températures
k	exposant tel que $0 < k < 1$
i	nombre complexe défini par $i^2 = -1$
τ	temps caractéristique

Table des figures

Chapitre I :

Figure I. 1 : Sollicitations induites par le trafic [Di Benedetto, 2005].....	6
Figure I. 2 : Sollicitations induites par la température [Di Benedetto, 2005]	7
Figure I. 3 : Domaine de comportement du bitume [Olard, 2005].....	9
Figure I. 4: Domaines de comportement des enrobés bitumineux [Di Benedetto, 2001]	10
Figure I. 5 : Essais homogènes (a) et non homogènes (b).....	13
Figure I. 6 : Principe de l'essai Dynamic Shear Rheometer (DSR).....	15
Figure I. 7 : Les différents types d'ondes.....	18
Figure I. 8 : Exemple d'application du calcul du temps de parcours de l'onde entre l'impulsion et la réception [Garbacz, 2003].....	23
Figure I. 9 : Evolution du module d'Young élastique calculé avec des ondes de compression en fonction du volume des vides [Jurado, 2008].....	24
Figure I. 10 : Evolution du module calculé avec des ondes de surface en fonction du volume des vides [Celaya, 2006]	24
Figure I. 11 : Evolution des modules calculés avec les essais mécaniques et ultrasonores en fonction des cycles d'humidification pour les différents matériaux testés [Barnes, 2010].....	25
Figure I. 12 : Evolution des vitesses de compression (a) et de cisaillement (b) en fonction de la teneur en bitume [Arabani, 2009].....	26
Figure I. 13 : Transformées de Fourier pour des signaux enregistrés à deux distances de propagation différentes [In, 2009].....	27
Figure I. 14 : Comparaison de l'évolution de l'atténuation en fonction de la fréquence entre un matériau sain et un matériau présentant de la ségrégation [In, 2009]	28
Figure I. 15 : Evolution des paramètres ultrasonores en fonction du compactage [Jiang, 2006]	29
Figure I. 16 : Evolution de l'impédance acoustique (EFR) en fonction du volume des vides [Biligiri, 2009].....	31
Figure I. 17 : Corrélation entre l'essai mécanique de fatigue et le modèle de prédiction [Tigdemir, 2004]	32

Figure I. 18 : Evolution de la micro déformation et de la perte d'énergie des ondes de compression pendant un essai de fatigue à la température -10°C [Houel, 2009].....	32
Figure I. 19 : Exemple de l'application « Colibri » pour deux chaussées présentant une assise saine et dégradée	34
Figure I. 20 : Propagation d'onde parallèlement et perpendiculairement à la fissure [Khazanovich, 2005]	35
Figure I. 21 : Relation entre le rapport des vitesses et la profondeur de la fissure [Khazanovich, 2005]	36
Figure I. 22 : (a) Baisse d'énergie transmise (b) ratio de la vitesse de phase en fonction de la profondeur de fissure [Underwood, 2003]	36
Figure I. 23 : Comparaison des coefficients de transmission pour différentes dalles testées [Jiang, 2008]	37
Figure I. 24 : Comparaison des lois de décroissance exponentielle énergétique des différents matériaux de l'étude [Dos Reis, 1999]	38
Figure I. 25 : (a) Principe de l'essai (b) Mode propre 1 (c) Mode propre 2 [Ryden, 2009].....	39
Figure I. 26 : Evolution de la fréquence de résonance (a) et du facteur d'amortissement (b) en fonction de la température [Ryden, 2009]	39
Figure I. 27 : (a) Modules calculés pour des températures allant de -10°C à 55°C pour les deux fréquences de résonance (b) Courbe maitresse du matériau à 25°C [Ryden, 2009]	40
Figure I. 28 : Différents modes de vibrations (a) modes de flexion (b) modes longitudinaux [Gudmarsson, 2012]	41
Figure I. 29 : Isothermes du matériau [Gudmarsson, 2012].....	41
Figure I. 30 : Courbes maitresses en fonction des différents axes à la température de référence de 10°C [Gudmarsson, 2012]	42
Figure I. 31 : (a) Isothermes d'angle de phase (b) Courbe maitresse de l'angle de phase à la température référence de 10°C [Gudmarsson, 2012]	43
Figure I. 32 : Comparaison des modules ultrasonores avec les modules mécaniques et un modèle de prédiction [Norambuena – Contreras, 2010]	44
Figure I. 33 : (a) Modules déterminés sur la chaussée existante (b) Comparaison avec des modules déterminés en laboratoire [Celaya, 2006]	45
Figure I. 34 : Comparaison des courbes maitresses ultrasonores avec les courbes maitresses mécaniques et le modèle 2S2P1D [Di Benedetto, 2009]	46

Figure I. 35 : Pic fréquentiel des ondes de compression (a) et de cisaillement (b) [Mounier, 2012].....	47
Figure I. 36 : Comparaison de modules complexes obtenus avec la méthode de la résonance libre et de propagation d'ondes ultrasonores [Mounier, 2012]	49
Figure I. 37 : Evolution du facteur d'atténuation en fonction de la fréquence pour les ondes (a) de compression (b) de cisaillement [Van Velsor, 2011]	50
Figure I. 38 : Courbe maitresse du module (a) de cisaillement complexe (b) d'Young complexe [Van Velsor, 2011]	50
Figure I. 39 : Angle de phase en fonction de la fréquence équivalente [Van Velsor, 2011] ...	51

Chapitre II :

Figure II. 1: Etat des contraintes	56
Figure II. 2 : Mode opératoire de l'essai ultrasonore	64
Figure II. 3 : Principe de génération d'onde par un transducteur.....	65
Figure II. 4 : Calibration des transducteurs (a) de compression (b) de cisaillement.....	66
Figure II. 5 : Schéma de principe du dispositif expérimental	67
Figure II. 6 : Photographie des bâtis (a) vue de dessus) (b) vue de côté.....	68
Figure II. 7 : Bâtis avec les éprouvettes (a) de GB5 (b) de bitume 35/50.....	69
Figure II. 8 : Cartographie de vitesses de propagation de l'éprouvette GB5 suivant la direction 2.....	70
Figure II. 9 : Détermination du champ de Fresnel et du champ de Fraunhofer pour le bitume 35/50.....	72
Figure II. 10 : Exemple de suivi de stabilisation pour le bitume 35/50 pour une augmentation de température de 10°C.....	74
Figure II. 11 : (a) FFT et (b) phase et différence de phase des signaux ayant traversé deux distances différentes d'acier	76
Figure II. 12 : (a) Superposition de dix signaux enregistrés à une distance de 10 cm (b) Rapport de l'écart type des dix signaux sur le signal moyen pour le matériau GB3 à la température de 10°C.....	77
Figure II. 13 : Méthodes de détermination des vitesses dans le domaine temporel : (a) différence temporelle pics maximums positifs (b) négatifs (c) premier décrochement de zéro (d) pics enveloppe	78

Figure II. 14 : Phase de deux signaux différents	79
Figure II. 15 : Méthodes de calcul de l'atténuation dans le domaine temporel : amplitudes maximales des signaux (a) pics positifs (b) pics négatifs (c) pic de l'enveloppe	81
Figure II. 16 : Méthodes de détermination de l'atténuation dans le domaine fréquentiel.....	82
Figure II. 17 : (a) Détermination de la bande passante sur une transformée de Fourier (b) Chevauchement des bandes passantes des ondes de compression et de cisaillement pour le bitume 35/50 à -10°C	83
Figure II. 18 : Domaine fréquentiel des essais mécaniques et ultrasonores.....	84
Figure II. 19 : (a) Chevauchement des bandes passantes des FFT de signaux enregistrés à deux distances différentes (b) Interspectre des signaux	85

Chapitre III :

Figure III. 1 : (a) Fraction granulaires (b) Courbe granulométrique des matériaux GB3 et GB5	89
Figure III. 2 : (a) Vue d'ensemble de l'appareil DSR (b) Zoom de l'essai DSR.....	90
Figure III. 3 : (a) Courbes isothermes du bitume 35/50 (b) Courbes isochrones du bitume 35/50.....	91
Figure III. 4 : Représentations des directions sur l'éprouvette (a) avant carottage (b) après carottage (c) Dispositif d'essai de module complexe traction/compression de l'ENTPE (d) Principe de détermination des déformations	92
Figure III. 5 : Courbes isothermes (a) GB3 et (b) GB5.....	92
Figure III. 6 : Courbes isochrones(a) GB3 et (b) GB5.....	93
Figure III. 7 : Isothermes de coefficient de Poisson selon la direction 2 (a) GB3 (b) GB5.....	93
Figure III. 8 : Isothermes de coefficient de Poisson selon la direction 3 (a) GB3 (b) GB5.....	94
Figure III. 9 : Courbe maitresse de la GB3 à la température de référence de 22°C.....	95
Figure III. 10 : Plan de Cole – Cole (a) du bitume 35/50 (b) de la GB3 et de la GB5.....	97
Figure III. 11 : Espace de Black (a) pour le bitume 35/50 (b) pour la GB3 et la GB5	98
Figure III. 12 : Cellules rhéologiques élémentaires : ressort (a), amortisseur (b), élément parabolique (c).....	99
Figure III. 13 : Modèle rhéologique de Huet	100
Figure III. 14 : Méthode de détermination des paramètres de calibration des modèles rhéologiques dans le plan de Cole-Cole.....	101

Figure III. 15 : Modèle rhéologique de Huet-Sayegh	102
Figure III. 16 : Modèle rhéologique 2S2P1D.....	103
Figure III. 17 : (a) Comparaison des modèles rhéologiques de Huet et Huet-Sayegh pour un bitume 35-50 à la température de référence de 15°C (b) Comparaison des modèles rhéologiques pour le matériau GB3 à la température de référence 15°C.....	105
Figure III. 18 : Prédiction des modules complexes des graves bitumes GB3 et GB5 à partir du module du bitume 35/50.....	107
Figure III. 19 : Principe de la détermination théorique des paramètres de propagation d'onde	108
Figure III. 20 : (a) isothermes (b) isochrone à 500 kHz de la vitesse de propagation des ondes S du bitume 35/50 sur la gamme de fréquences de l'essai ultrasonore.....	109
Figure III. 21 : (a) isothermes (b) isochrone à 500 kHz de la vitesse de propagation des ondes P du matériau GB5 sur la gamme de fréquences de l'essai ultrasonore.....	109
Figure III. 22 : (a) isothermes (b) isochrone à 500 kHz du facteur d'atténuation des ondes S du bitume 35/50 sur la gamme de fréquences de l'essai ultrasonore	110
Figure III. 23 : (a) isothermes (b) isochrone à 500 kHz du facteur d'atténuation des ondes P du matériau GB5 sur la gamme de fréquences de l'essai ultrasonore.....	111

Chapitre IV :

Figure IV. 1 : Signaux enregistrés et normés à la distance de propagation L_2 des ondes de cisaillement et de compression pour toutes les températures d'essais pour une fréquence d'excitation du transducteur de 700 kHz.....	117
Figure IV. 2 : Transformées de Fourier (a) des ondes de compression (b) des ondes de cisaillement pour une excitation du transducteur à 700 kHz	118
Figure IV. 3 : (a) Signaux des ondes de cisaillement pour une excitation du transducteur à 700 kHz (b) Transformées de Fourier associée aux signaux (-10°C)	119
Figure IV. 4 : (a) Signaux des ondes de compression pour une excitation du transducteur de 700 kHz à -10°C (b) Transformées de Fourier associée aux signaux à -10°C.....	119
Figure IV. 5 : Evolution des fréquences des signaux de compression en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour la distance L_1 (b) pour la distance L_2	120

Figure IV. 6 : Evolution des fréquences des signaux de cisaillement en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour la distance L_1 (b) pour la distance L_2	121
Figure IV. 7 : Evolution des fréquences interspectre des signaux et du chevauchement des bandes passantes en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour les ondes de cisaillement (b) pour les de compression	122
Figure IV. 8 : Evolution du pic fréquentiel et de la bande passante des ondes de compression pour une excitation à 700 kHz en fonction de la température.....	122
Figure IV. 9 : Déphasage en fonction de la température des signaux de compression (a) et de cisaillement (b) sur leurs bandes passantes	123
Figure IV. 10 : (a) Vitesse de phase (b) Comparaison des méthodes de détermination de la vitesse de propagation des ondes de compression à la température de -10°C	125
Figure IV. 11 : (a) Vitesse de phase (b) Comparaison des méthodes de détermination de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement à la température de -10°C	125
Figure IV. 12 : Evolution du rapport $f/\Delta\phi$ en fonction de la fréquence pour les ondes de cisaillement et de compression à la température de -10°C	126
Figure IV. 13 : (a) Facteur d'atténuation de phase des ondes de compression à -10°C (b) Comparaison des méthodes de détermination du facteur d'atténuation des ondes de compression à -10°C	128
Figure IV. 14 : (a) Facteur d'atténuation de phase des ondes de cisaillement à -10°C (b) Comparaison des méthodes de détermination du facteur d'atténuation des ondes de cisaillement à -10°C	128
Figure IV. 15 : Isothermes des vitesses de phase des signaux de compression (a) et de cisaillement (b) sur leurs bandes passantes	129
Figure IV. 16 : Isothermes du facteur d'atténuation des signaux de compression (a) et de cisaillement (b) sur leurs bandes passantes	130
Figure IV. 17 : Longueur d'onde des signaux de compression (a) et de cisaillement (b) sur leurs bandes passantes.....	131
Figure IV. 18 : Evolution de la sensibilité cinétique en fonction de la température (a) du facteur d'atténuation (b) du déphasage	132
Figure IV. 19 : Isochrones à 300 kHz de la vitesse de phase des ondes P (a) du facteur d'atténuation des ondes P et évolution de la viscosité Newtonienne (b)	133

Figure IV. 20 : Evolution du facteur d'atténuation expérimental des ondes P (a) en fonction de la viscosité Newtonienne (b) en fonction du temps caractéristique τ	134
Figure IV. 21 : Prédiction du paramètre β avec le facteur d'atténuation expérimental en fonction de la fréquence et de la température.....	135
Figure IV. 22 : Chevauchement des bandes passantes des ondes de cisaillement et des ondes de compression à la température de -10°C en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur	137
Figure IV. 23 : (a) Comparaison du coefficient de Poisson déterminé selon les hypothèses élastique et viscoélastique (b) Partie réelle v_1 et imaginaire v_2 du coefficient de Poisson complexe v^*	138
Figure IV. 24 : Comparaison des données expérimentales avec la modélisation (a) des vitesses de phases (b) et du facteur d'atténuation.....	139
Figure IV. 25 : (a) Chevauchement des transformées de Fourier des deux types d'ondes à la température de -10°C (b) présentation des points A,B et C sur les transformées de Fourier	140
Figure IV. 26 : Comparaison entre l'hypothèse élastique et viscoélastique pour la détermination des modules ultrasonores (a) de cisaillement (b) d'Young.....	142
Figure IV. 27 : (a) Module de cisaillement complexe ultrasonore du bitume 35/50 à la température de référence de -10°C (b) zoom de la figure avec représentation des zones d'erreur sur la détermination du module ultrasonore	142
Figure IV. 28 : (a) Module d'Young complexe ultrasonore du bitume 35/50 à la température de référence de -10°C (b) zoom de la figure avec représentation des zones d'erreur sur la détermination du module ultrasonore.....	143
Figure IV. 29 : Représentation des résultats ultrasonores dans le plan complexe (a) de Cole – Cole (b) zoom de la représentation.....	144
Figure IV. 30 : Représentation des résultats ultrasonores dans le plans complexe (a) de Cole – Cole (b) zoom de la représentation.....	145
Figure IV. 31 : (a) Représentation des résultats ultrasonores avec leurs zones d'erreurs dans l'espace de Black (b) zoom de la représentation.....	147
Figure IV. 32 : Influence des grandeurs caractéristiques de propagation d'ondes dans la détermination des parties réelles et imaginaires du module complexe ainsi que l'angle de phase.....	148

Chapitre V :

Figure V. 1 : Signaux d'ondes de cisaillement enregistrés et normés à la distance de propagation L_2 pour des températures de -20°C à 30°C et une excitation des transducteurs à 700 kHz pour le matériau GB5	153
Figure V. 2 : Signaux d'ondes de compression enregistrés et normés à la distance de propagation L_2 pour des températures de -20°C à 40°C et une excitation des transducteurs à 700 kHz pour le matériau GB5	154
Figure V. 3 : Transformées de Fourier (a) des ondes de compression (b) des ondes de cisaillement pour une excitation du transducteur à 700 kHz aux différentes températures d'essais pour le matériau GB5	155
Figure V. 4 : (a) Signaux des ondes de cisaillement pour une excitation du transducteur de 700 kHz à 10°C (b) Transformées de Fourier associées aux signaux à 10°C pour le matériau GB5	156
Figure V. 5 : (a) Signaux des ondes de compression pour une excitation du transducteur de 700 kHz à 10°C (b) Transformées de Fourier associées aux signaux à 10°C pour le matériau GB5	156
Figure V. 6 : Evolution des fréquences des signaux de compression en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de 10°C pour le matériau GB5 (a) pour la distance L_1 (b) pour la distance L_2	157
Figure V. 7 : Evolution des fréquences des signaux de cisaillement en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de 10°C pour le matériau GB5 (a) pour la distance L_1 (b) pour la distance L_2	157
Figure V. 8 : Evolution des fréquences interspectre des signaux et des bandes passantes en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de 10°C pour le matériau GB5 (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement.....	158
Figure V. 9 : Evolution du pic fréquentiel et de la bande passante pour une excitation de 700 kHz en fonction des températures d'essais pour le matériau GB5 pour les ondes (a) de compression (b) de cisaillement	159
Figure V. 10 : Déphasage en fonction de la température des signaux de compression et de cisaillement sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d) pour le matériau GB5	159

Figure V. 11 : Comparaison des méthodes de détermination des vitesses de propagation (a) des ondes de compression (b) des ondes de cisaillement pour le matériau GB5	162
Figure V. 12 : Evolution du rapport fréquence sur déphasage pour les ondes (a) de compression (b) de cisaillement pour le matériau GB5	163
Figure V. 13 : Comparaison des méthodes de détermination du facteur d'atténuation (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement	164
Figure V. 14 : Isothermes des vitesses de phase pour les ondes de compression et de cisaillement sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d) pour le matériau GB5	165
Figure V. 15 : Isothermes du facteur d'atténuation des ondes de compression et de cisaillement sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d) pour le matériau GB5	165
Figure V. 16 : Longueur d'onde des ondes de compression et de cisaillement sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d) pour le matériau GB5	166
Figure V. 17 : Evolution du rapport $\Delta L/\lambda$ en fonction de la fréquence pour les ondes (a) de compression (b) de cisaillement	167
Figure V. 18 : Sensibilité cinétique du facteur d'atténuation (a) et du déphasage (b)	168
Figure V. 19 Isochrones de vitesse de phase des ondes (a) de compression (b) de cisaillement	169
Figure V. 20 : Evolution de la viscosité Newtonienne du matériau GB5 fonction du facteur d'atténuation des ondes (a) de compression (b) de cisaillement	169
Figure V. 21 : (a) Evolution de la viscosité Newtonienne et (b) du temps caractéristique τ en fonction du facteur d'atténuation expérimental	170
Figure V. 22 : Rapport entre les vitesses de propagation des ondes P dans le bitume et la GB5	171
Figure V. 23 : Principe théorique de la détermination de $V\phi_{00}$ et $V\phi_0$ pour le bitume 35/50	172
Figure V. 24 : Prédiction des vitesses de propagation (a) des ondes P (b) des ondes S pour le matériau GB5 à partir des vitesses de propagation dans le bitume 35/50 à -10°C	173
Figure V. 25 : Comparaison entre le coefficient de Poisson élastique et viscoélastique	175
Figure V. 26 : Coefficient de Poisson expérimentaux pour les matériaux GB3 et GB5 sur une large gamme fréquentielle (a) et (b) et sur leurs bandes passantes (c) et (d)	175

Figure V. 27 : Courbe maitresse du coefficient de Poisson à la température de référence de 15°C pour le matériau GB5	176
Figure V. 28 : Comparaison des coefficients de Poisson ultrasonores du bitume 35/50 et des matériaux GB3 et GB5	177
Figure V. 29 : Principe de la comparaison entre le facteur d'atténuation théorique et expérimental	177
Figure V. 30 : Comparaison entre le facteur d'atténuation expérimental et théorique pour le matériau GB5 (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement.....	178
Figure V. 31 : Corrélation entre le facteur d'atténuation expérimental et théorique pour les ondes de compression (a) et de cisaillement (b).....	179
Figure V. 32 : Evolution des coefficients directeurs des relations entre le facteur d'atténuation théorique et expérimental pour le matériau GB5	179
Figure V. 33 : Parties réelles et imaginaires du coefficient de Poisson du matériau GB5 sans correction (a) et (b) et avec correction (c) et (d) du facteur d'atténuation expérimental	180
Figure V. 34 : (a) Comparaison entre l'hypothèse élastique et viscoélastique (b) Isothermes de modules d'Young du matériau GB5.....	181
Figure V. 35 : Courbe maitresse du matériau GB5 à la température de référence de 15°C...	182
Figure V. 36 : Représentation des données ultrasonores dans le plan de Cole – Cole et l'espace de Black sans (a) et (b) et avec (c) et (d) correction du facteur d'atténuation expérimental	183

Annexes

Figure A. 1 : Cartographie des vitesses de propagation pour le matériau GB3	206
Figure A. 2 : Comparaison de la vitesse de propagation en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement.....	212
Figure A. 3 : Comparaison du facteur d'atténuation en fonction de la fréquence d'excitation du transducteur à la température de -10°C (a) pour les ondes de compression (b) pour les ondes de cisaillement	213
Figure A. 4 : Déphasage en fonction de la température des signaux (a) de compression (b) de cisaillement.....	214

Figure A. 5 : Isothermes des vitesses de phase des signaux (a) de compression (b) de cisaillement.....	214
Figure A. 6 : Isothermes du facteur d'atténuation des signaux (a) de compression (b) de cisaillement.....	215
Figure A. 7 : Longueur d'onde des signaux (a) de compression (b) de cisaillement.....	215
Figure A. 8 : (a) Comparaison du coefficient de Poisson déterminé selon les hypothèses élastique et viscoélastique (b) Partie réelle ν_1 et imaginaire ν_2 du coefficient de Poisson complexe ν^*	216
Figure A. 9 : Déphasage en fonction de la température pour le matériau GB5 des signaux (a) de compression (b) de cisaillement	217
Figure A. 10 : Isothermes des vitesses de phase pour le matériau GB5 (a) pour les ondes de compression (b) de cisaillement.....	217
Figure A. 11 : Isothermes du facteur d'atténuation pour le matériau GB5 des ondes (a) de compression (b) de cisaillement.....	218
Figure A. 12 : Longueur d'onde des ondes (a) de compression (b) de cisaillement pour le matériau GB5	218
Figure A. 13 : Coefficient de Poisson expérimentaux pour le matériau (a) GB5 (b) GB3	219
Figure A. 14 : Isothermes du module d'Young complexe du matériau GB5.....	219

Table des tableaux

Chapitre I :

Tableau I. 1 : Vitesses de propagation des ondes en fonction des directions de propagation..	30
Tableau I. 2 : Valeurs des modules d'Young, de cisaillement et coefficient de Poisson.....	30
Tableau I. 3 : Angle de phase et coefficient de Poisson déterminé avec le modèle 2S2P1D [Di Benedetto, 2009]	46
Tableau I. 4 : Comparaison des coefficients de Poisson obtenus de manière expérimentale et par le modèle 2S2P1D (a) pour des fréquences différentes (b) après recalage des fréquences [Mounier, 2012]	48

Chapitre II :

Tableau II. 1 : Dimensions des éprouvettes	73
--	----

Chapitre III :

Tableau III. 1 : Paramètres de calibration du modèle rhéologique 2S21PD pour le bitume 35/50.....	106
Tableau III. 2 : Paramètres de calibration du modèle rhéologique 2S21PD pour les matériaux GB3 et GB5	106

Chapitre IV :

Tableau IV. 1 : Comparaison des vitesses de phase des ondes P et S par rapport au modèle 2S2P1D.....	139
Tableau IV. 2 : Comparaison du facteur d'atténuation des ondes P et S par rapport au modèle 2S2P1D.....	141
Tableau IV. 3 : Comparaison des modules de cisaillement complexe $ G^* $ par rapport au modèle rhéologique 2S2P1D.....	143

Tableau IV. 4 : Comparaison des modules d'Young complexe $ E^* $ par rapport au modèle rhéologique 2S2P1D	144
Tableau IV. 5 : Comparaison des parties réelle G_1 et imaginaire G_2 du module complexe de cisaillement avec le modèle rhéologique 2S2P1D	146
Tableau IV. 6 : Comparaison des parties réelle E_1 et imaginaire E_2 du module complexe d'Young avec le modèle rhéologique 2S2P1D	146
Tableau IV. 7 : Comparaison des angles de phase avec le modèle 2S2P1D.....	147

Chapitre V :

Tableau V. 1 : Valeurs de $V\phi_{00}$ et $V\phi_0$ pour les deux types d'ondes pour différentes valeurs de coefficient de Poisson pour le matériau GB5	172
---	-----

Annexes

Tableau A. 1 : Résultats de l'essai de module complexe du bitume 35/50.....	207
Tableau A. 2 : Résultats de l'essai de module complexe du matériau GB3.....	209
Tableau A. 3 : Résultats de l'essai de module complexe du matériau GB5.....	211

Résumé :

Ce travail de thèse se place dans le cadre de la problématique de la caractérisation des matériaux thermo-viscoélastiques en laboratoire avec une application sur les matériaux bitumineux. Actuellement, la caractérisation mécanique de ces matériaux nécessite des essais coûteux autant en termes de temps, que de matériel et de matériau. L'objectif est de proposer une alternative à ces essais par le biais d'un essai de Contrôle Non Destructif (CND) basé sur la mesure des grandeurs caractéristiques de la propagation des ondes ultrasonores. Les matériaux de l'étude, un bitume et deux enrobés bitumineux ont été développés par l'entreprise EIFFAGE Travaux Publics. Les enrobés bitumineux font l'objet d'une étude visant l'optimisation de la structure granulaire des enrobés bitumineux dans le but d'augmenter leurs performances mécaniques.

Une attention particulière est portée aux méthodes de détermination des grandeurs caractéristiques de la propagation d'ondes et à la prise en compte de leur dépendance fréquentielle.

Les données expérimentales de référence, issues des essais standards de module complexe (G^* et E^*), sont représentées et interprétées sur la base de différentes représentations : courbes maîtresses, plan de Cole – Cole et espace de Black. Ces représentations sont également extrapolées à l'aide d'un modèle rhéologique à spectre continu, le modèle 2S2P1D.

La caractérisation de ces matériaux par la méthode ultrasonore repose sur deux aspects : d'une part la détermination de la vitesse de phase et du facteur d'atténuation des ondes de compression et de cisaillement ; d'autre part la détermination des grandeurs mécaniques (G^* , E^* et ν^*) par le biais des équations de propagation en 2D dans un milieu élastique ou viscoélastique isotrope.

Les résultats obtenus montrent une bonne adéquation entre les données ultrasonores, les mesures mécaniques et les prédictions du modèle rhéologique. Les représentations complexes par séparation des parties réelles et imaginaire montrent l'apport essentiel de l'hypothèse viscoélastique dans l'exploitation des données ultrasonores et la nécessité de la prise en compte des différents mécanismes dissipatifs conduisant l'atténuation des ondes dans un matériau hétérogène viscoélastique.