

LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES DE
CISAILLEMENT POUR LA CARACTÉRISATION DES
ENROBÉS RECYCLÉS À FROID

par

Quentin LECURU

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTRÉAL, LE 14 AVRIL 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Quentin Lecuru, 2025



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Yannic Ethier, B.Ing., M.Sc.A, Ph.D., directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, B.Ing, M.Ing., Ph.D., codirecteur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Vladimir Brailovski, M.Ing., Ph.D, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. François Duhaime, B.Sc., B.Ing., Ph.D., membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mourad Karray, B.Ing., M.Sc.A., Ph.D., membre du jury
Département de génie civil à Université de Sherbrooke

M. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, Ph.D., examinateur externe
Département de génie structurel et de construction civile à l'Université Fédérale de Ceará

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 10 MARS 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Merci à tous ceux qui ont participé à ce projet, de près ou de loin. Je laisse chacun estimer sa part de mérite.

Merci à Géowave et Mitacs pour le financement.

LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES DE CISAILLEMENT POUR LA CARACTÉRISATION DES ENROBÉS RECYCLÉS À FROID

Quentin LECURU

RÉSUMÉ

Les enrobés recyclés à froid (ERF) en très jeune âge s'assimilent à un matériau granulaire non lié et vont ensuite devenir un matériau cohérent lorsque la cure s'effectue. Cet aspect initial est dû à la présence d'eau dans le mélange en jeune âge, à des fins de maniabilité. Pour cette raison, les essais classiques de caractérisation des enrobés bitumineux ne sont pas adaptés. Cependant, il est important de connaître le comportement des ERF en très jeune âge, après le compactage, en raison de la réouverture rapide de la chaussée au trafic. Une technique non destructive basée sur les ondes de cisaillement, le *Piezoelectric Ring Actuator Technique* (P-RAT) est utilisée. Cette technique d'analyse fréquentielle détermine la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement (V_s). Elle a été utilisée dans les sols et les bétons avec succès ainsi que dans un projet de mémoire pour caractériser les ERF en jeune âge.

Le présent doctorat poursuit ces travaux et vise à déterminer la pertinence du paramètre V_s pour caractériser les ERF lors de leur cure. De plus, il est important d'évaluer les limites du P-RAT quant aux matériaux testés et aux conditions d'essais. Enfin, le P-RAT sera utilisé pour déterminer le comportement anisotropique des ERF.

Les premiers essais réalisés sur des plaques d'ERF montrent l'évolution des paramètres V_s , la perte d'eau et l'amplitude des signaux de 90 minutes après compactage à 30 jours de cure à l'air libre. V_s et la perte d'eau évoluent rapidement en jeune âge et atteignent par la suite une asymptote. Un lien entre ces paramètres existe, mais le manque de mesures en très jeune âge empêche de modéliser correctement leur évolution.

Ensuite, des mesures de V_s sur des cylindres d'ERF compactés à différentes teneurs en vide (10,7 à 17,5 %) à la presse à cisaillement giratoire (PCG) sont réalisées. Des améliorations au montage expérimental permettent de commencer les essais 10 minutes après compactage et la

température de surface et la perte d'eau sont mesurées en parallèle. Il apparaît que cette dernière est influencée par la température de surface et les conditions de cure (air libre ou étuve) ainsi que par la géométrie des spécimens. Le modèle Michaelis-Menten est utilisé pour modéliser avec succès les évolutions de V_s et de la perte d'eau en fonction du temps de cure. La prépondérance de la création de liens bitumineux comparativement à la perte d'eau est mise en avant. V_s évolue linéairement avec la compacité, passant de 253 à 330 m.s⁻¹ et de 370 à 610 m.s⁻¹ pour les valeurs initiales et finales, respectivement. Les résultats de V_s obtenus sont cohérents avec les données de la littérature.

Finalement, l'anisotropie des ERF est évaluée via V_s . Les mesures dans trois directions diffèrent de 0,6 à 11,5 % et une tendance symétrique apparaît dans les plaques d'ERF testées. Des mesures de V_p via une méthode temporelle montrent le même phénomène. De plus, la tomodensitométrie met en évidence un alignement préférentiel des granulats dans la direction de déplacement de la roue de compactage.

Mots-clés : Vitesse des ondes de cisaillement, enrobé recyclé à froid, analyse fréquentielle, anisotropie, cure

SHEAR WAVE VELOCITY TO CHARACTERIZE COLD RECYCLED MIXES

Quentin LECURU

ABSTRACT

Cold recycled mixes (CRM) at a very young age are similar to an unbound granular material and will then become a cohesive material when cured. This initial aspect is due to the presence of water in the mix at a young age, for handling purposes. For this reason, conventional asphalt mix characterisation tests are not suitable. However, it is important to know how CRM behaves at a very young age, after compaction, as the pavement quickly reopens to traffic. A non-destructive technique based on shear waves velocity, the Piezoelectric Ring Actuator Technique (P-RAT), is used. This frequency analysis technique determines the propagation velocity of the shear wave (V_s). It has been used successfully in soils and concretes and in a dissertation project to characterise CRMs at a young age.

The present PhD project continues this work and aims to determine the relevance of the V_s parameter for characterising CRMs during curing. It is also important to assess the limitations of P-RAT in terms of the materials tested and the test conditions. Finally, P-RAT will be used to determine the anisotropic behaviour of CRMs.

Initial tests on CRM plates show the evolution of the V_s parameters, water loss and signal amplitude from 90 minutes after compaction to 30 days of curing in open air. V_s and water loss evolve rapidly at young age and then reach an asymptote. A link between V_s and water loss exists, but the lack of measurements at a very young age means that their evolution cannot be modeled correctly.

Subsequently, V_s measurements were carried out on CRM cylinders compacted to different void contents (10.7 to 17.5 %) using a shear gyratory compactor (SGC). Improvements to the experimental set-up allow tests to begin 10 minutes after compaction, and surface temperature and water loss are measured in parallel. The latter was found to be influenced by surface temperature and curing conditions (free air or oven), and by specimen geometry. The

Michaelis-Menten model is used to successfully model the evolution of V_s and water loss as a function of curing time. The preponderance of bituminous bond creation compared to water loss is highlighted. V_s evolves linearly with compaction, increasing from 253 to 330 m.s⁻¹ and from 370 to 610 m.s⁻¹ for initial and final values, respectively. The V_s results obtained are consistent with literature data.

Finally, the anisotropy in CRMs is evaluated based on V_s . Measurements in three directions differ from 0.6 to 11.5 % and a symmetrical trend appears in the CRM plates tested. V_p measurements via a temporal method show the same phenomenon.

In addition, computed tomography scans (CT-Scan) reveal a preferential alignment of aggregates in the direction of the compacting wheel.

Keywords: Shear wave velocity, cold recycled asphalt mixes, frequency analysis, anisotropy, curing

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Généralités sur le recyclage des enrobés bitumineux	5
1.1.1 Réfection de la chaussée	5
1.1.2 Recyclage à chaud et à froid	6
1.1.3 Matériaux recyclés	6
1.2 Les enrobés recyclés à froid (ERF).....	8
1.2.1 Émulsion	8
1.2.2 Recyclage à froid sur place	10
1.2.3 Comportement du matériau et anisotropie	12
1.3 Les essais classiques sur les EBC et les ERF	15
1.3.1 Essai de traction indirecte	16
1.3.2 Essai triaxial.....	17
1.3.3 Essai de module complexe.....	19
1.3.4 Résistance à la déformation permanente.....	22
1.3.5 Retour sur la notion d'essai en jeune âge.....	23
1.4 Importance de l'eau et de la cure dans les ERF	24
1.4.1 Effet du ciment.....	25
1.4.2 Effet de la température.....	26
1.4.3 Effet de l'humidité	26
1.4.4 Modèle Michaelis-Menten	27
1.5 Méthodes de caractérisation basées sur les ondes mécaniques.....	28
1.5.1 Les ondes mécaniques.....	28
1.5.1.1 Onde de corps	28
1.5.1.2 Onde de surface.....	30
1.5.1.3 Dispersion et vitesse des ondes.....	31
1.5.2 Méthode temporelle	32
1.5.3 Méthodes fréquentielles	33
1.5.3.1 Méthode de résonance d'impact (Impact Resonance Method) ..	33
1.5.3.2 Colonne de résonance	35
1.5.3.3 Méthodes basées sur les ondes de surface	36
1.5.3.4 Corrélation croisée	37
1.6 La technique d'actuateur d'anneaux piézoélectriques (P-RAT).....	38
1.6.1 Le matériau piézoélectrique	38
1.6.2 Utilisation d'éléments piézoélectriques	38
1.6.3 Le P-RAT (Ethier, 2009; Karray et al., 2015)	40
1.6.4 Usage du P-RAT et du paramètre V_s	43
1.7 Tomodensitométrie assistée par ordinateur	44
1.8 Sommaire	45

CHAPITRE 2	OBJECTIFS, ORGANISATION DE LA THÈSE ET APPROCHE EXPÉIMENTALE	49
2.1	Motivations	49
2.2	Objectifs et pertinence des articles	50
2.3	Agencement de la thèse	52
2.4	Matériaux	53
2.4.1	Partie 1 – Article 1	54
2.4.2	Partie 2 – Article 2	56
2.4.3	Partie 3 – Article 3	59
2.4.4	Mastic bitumineux	61
2.5	Éléments généraux et procédures communes concernant le P-RAT	62
2.5.1	Transducteurs piézoélectriques	63
2.5.1.1	Conception des transducteurs	63
2.5.1.2	Transducteurs utilisés.....	67
2.5.2	Génération et acquisition des signaux P-RAT	68
2.5.3	Traitement des signaux P-RAT / Analyse fréquentielle des signaux	71
2.5.4	Test des transducteurs à vide	74
2.6	Méthodologie Partie 1 – Article 1	76
2.6.1	Montage expérimental	76
2.6.1.1	Spécimens cylindriques	76
2.6.1.2	Plaques d'ERF	76
2.6.2	Procédure expérimentale.....	78
2.6.2.1	Spécimens cylindriques	78
2.6.2.2	Plaques d'ERF	78
2.6.3	Modification apportée au modèle Michaelis-Menten	80
2.7	Méthodologie Partie 2 – Article 2	80
2.7.1	Montage expérimental	81
2.7.2	Procédure expérimentale.....	83
2.7.2.1	Volet Évolution	83
2.7.2.2	Volet Contrôle.....	86
2.8	Méthodologie Partie 3 - Article 3	87
2.8.1	Montage expérimental de la mesure de V_s	87
2.8.2	Essai UPV	88
2.8.3	Essai de traction-compression dynamique.....	88
2.8.4	Essai de tomodensitométrie assistée par ordinateur (CT-Scan).....	90
2.8.5	Procédure expérimentale.....	98
2.8.5.1	Essais sur les sections de plaque	98
2.8.5.2	Essais sur les spécimens cylindriques	100
2.9	Essais sur le mastic bitumineux	100
2.9.1	Montage expérimental	100
2.9.2	Procédure expérimentale.....	102
CHAPITRE 3	CHARACTERIZATION OF COLD IN-PLACE RECYCLED MATERIALS AT YOUNG AGE USING SHEAR WAVE VELOCITY.....	103

3.1	Introduction.....	104
3.2	Objective.....	104
3.3	Background.....	105
	3.3.1 Standard testing method on cold recycled asphalt.....	105
	3.3.2 Wave-based methods	105
	3.3.3 The piezoelectric ring actuator method.....	107
3.4	Materials and Methods.....	110
	3.4.1 Materials used and specimens.....	110
	3.4.2 Sensors used.....	112
	3.4.3 Experimental methodology	113
3.5	Results and Discussion	115
	3.5.1 Preliminary results on cylinders.....	115
	3.5.2 Tests on slabs	117
	3.5.2.1 Mass of Water	117
	3.5.2.2 V_s Measurement.....	119
	3.5.2.3 Amplitude Analysis	125
	3.5.3 Analysis.....	127
3.6	Conclusion and Recommendations.....	130
3.7	Données expérimentales	131
 CHAPITRE 4 ANALYSE COMPLÉMENTAIRE DE L'ARTICLE 1		133
4.1	Introduction.....	133
4.2	Utilisation du modèle Michaelis-Menten.....	133
4.3	Plaque et temps de mesure	139
4.4	Essais préliminaires	143
	4.4.1 Matériaux	143
	4.4.2 Procédure expérimentale.....	144
	4.4.3 Résultats.....	144
4.5	Conclusion	147
 CHAPITRE 5 EARLY-AGE STIFFENING OF COLD RECYCLED BITUMINOUS MATERIALS USING SHEAR WAVE VELOCITY ...		149
5.1	Introduction.....	150
5.2	Objectives	151
5.3	Background.....	151
	5.3.1 CRM and curing conditions	151
	5.3.2 Wave based technique and P-RAT	152
	5.3.2.1 Wave based technique.....	152
	5.3.2.2 Piezoelectric ring actuator technique (P-RAT)	153
5.4	Materials and Methods.....	155
	5.4.1 Materials used	156
	5.4.2 Experimental setup.....	157
	5.4.3 Experimental methodology	160
	5.4.3.1 Monitoring of the evolution	160
	5.4.3.2 Control	162

5.5	Results and Discussion	163
5.5.1	Water loss.....	163
5.5.2	V_s measurements.....	168
5.5.3	Relation between V_s and water loss	181
5.6	Conclusion and recommendations	183
5.7	Données expérimentales	185
CHAPITRE 6 ESSAIS SUR LE MASTIC BITUMINEUX		187
6.1	Introduction.....	187
6.2	Matériaux et procédure expérimentale.....	187
6.3	Résultats.....	188
6.4	Influence du mastic bitumineux sur V_s	189
6.5	Conclusion	191
CHAPITRE 7 ASSESSMENT OF ANISOTROPY IN COLD IN-PLACE RECYCLED MATERIALS USING SHEAR WAVE VELOCITY AND COMPUTED TOMOGRAPHY ANALYSIS		193
7.1	Introduction.....	194
7.2	Objectives	194
7.3	Background	195
7.3.1	Wave-base methods	197
7.3.2	The P-RAT.....	198
7.4	Materials and methods	199
7.4.1	Materials used and specimens.....	200
7.4.2	P-RAT anisotropy measurements	203
7.4.3	UPV.....	204
7.4.4	Complex modulus E^*	204
7.4.5	Computed Tomography Scan (CT-Scan).....	205
7.5	Results and analysis	207
7.5.1	P-RAT Shear wave velocity (V_s) results.....	207
7.5.2	UPV test results.....	214
7.5.3	Complex modulus	217
7.5.4	3D image analysis results.....	219
7.6	Conclusion	225
7.7	Supplementary files	227
7.8	Données expérimentales	227
CHAPITRE 8 ANALYSE GÉNÉRALE		229
8.1	Introduction.....	229
8.2	La caractérisation des ERF au moyen de V_s	229
8.2.1	Évolution de V_s	229
8.2.2	Eau et cure.....	233
8.2.3	Lien entre V_s et l'eau.....	234
8.2.4	Pertinence du modèle Michaelis-Menten.....	235
8.2.5	Retour sur la notion de jeune âge.....	236
8.2.6	Réflexion sur les valeurs obtenues et lien avec la littérature	238

8.3	Choix du transducteur et reproductibilité de la mesure	241
8.4	Utilisation du CT-Scan	243
8.5	V _s et P-RAT pour caractériser les ERF.....	248
	CONCLUSION.....	251
	RECOMMANDATIONS	255
ANNEXE I	INFORMATIONS ADDITIONNELLES SUR LES TRANSDUCTEURS	259
ANNEXE II	DÉTAILS SUR LES PARAMÈTRES DES SIGNAUX ÉMIS AVEC LA MÉTHODE P-RAT	263
ANNEXE III	EXEMPLES D'INTERPRÉTATION DE SIGNAUX AVEC LA MÉTHODE P-RAT	265
ANNEXE IV	PLANIFICATION DES ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS C-12, C-15 ET C-17.....	273
ANNEXE V	MODÈLE MICHAELIS-MENTEN, DÉTAIL DES CALCULS.....	277
ANNEXE VI	ÉLÉMENTS SUPPLÉMENTAIRES ARTICLE 3 - CHAPITRE 7.....	281
APPENDICE A	DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES PLAQUES 1 ET 2 – CHAPITRE 3	287
APPENDICE B	DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LE SPÉCIMEN C-12 – CHAPITRE 5	299
APPENDICE C	DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LE SPÉCIMEN C-15 – CHAPITRE 5	311
APPENDICE D	DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LE SPÉCIMEN C-17 – CHAPITRE 5	325
APPENDICE E	DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS CONTROL-10 ET CONTROL-12 – CHAPITRE 5.....	337
APPENDICE F	DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS CONTROL-17 – CHAPITRE 5.....	339
APPENDICE G	DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS SLAB1_1 À SLAB1_10 – CHAPITRE 7.....	345
APPENDICE H	DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS SLAB2_1 À SLAB2_4 – CHAPITRE 7.....	351

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	357
--	-----

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 2.1	Informations relatives aux spécimens cylindriques du volet évolution	58
Tableau 2.2	Informations relatives aux spécimens cylindriques du volet contrôle	58
Tableau 2.3	Informations relatives aux plaques d'ERF.....	60
Tableau 2.4	Dimensions des transducteurs.....	67
Tableau 2.5	Fréquences de résonance et amortissement propres aux couples de transducteurs	75
Tableau 2.6	Informations relatives à la prise de mesure pour les deux plaques d'ERF	79
Tableau 2.7	Informations relatives à la prise de mesure pour les spécimens C-17, C-15 et C-12.....	86
Tableau 3.1	Dimension of transducers, mm	112
Tableau 3.2	Main curing values for the slab specimens	117
Tableau 3.3	Particular values of V_s , $m.s^{-1}$	124
Tableau 4.1	Paramètres A, B et C du modèle MM pour l'évolution de V_s et de la perte d'eau dans les plaques 1 et 2	134
Tableau 4.2	Informations relatives aux spécimens pour les essais préliminaires.....	143
Tableau 4.3	Comparaison des valeurs de V_s des spécimens Contrôle-12 et Contrôle-17_3	147
Tableau 5.1	Information concerning specimens monitored over 30 days	157
Tableau 5.2	Information concerning control specimens.....	157
Tableau 5.3	Comparison of MM model C parameter and geometric configuration for each specimen	167
Tableau 5.4	Relative difference, $\Delta\%$, for a specific pair of transducers	174
Tableau 5.5	Relative standard deviation $\sigma\%$ between pairs of transducers in a specific specimen	174

Tableau 5.6	Michaelis-Menten model parameters for specimens C-12, C-15 and C-17; and curing time necessary to reach specific values of V_s , according to the MM model.....	177
Tableau 5.7	Analysis of Variance.....	177
Tableau 5.8	Particular values of V_s and equivalent modulus for each specimen; Relative difference of V_s and equivalent modulus among specimens with C-12 as reference	179
Tableau 5.9	V_s mean values for every pair of transducers at 30 days of curing.....	180
Tableau 5.10	Michaelis-Menten model parameter for specimens C-12, C-15, and C-17; V_s with respect to the water loss	183
Tableau 6.1	Valeurs moyennes de V_s et écart type pour les spécimens de mastic bitumineux	189
Tableau 6.2	Valeurs de $V_{s_spécimen}$ en fonction des paramètres V_{s_mastic} , h_{mastic} pour deux V_{s_exp} mesurée et deux hauteurs de spécimen considérées; Les écarts relatifs, $\Delta\%$, sont présentés.....	190
Tableau 7.1	Information on sections of slab 2.....	202
Tableau 7.2	Minimal V_s values, maximal V_s values and relative standard deviation ($\sigma\%$) for the pairs of transducers in slab 1	212
Tableau 7.3	Mean V_s values and relative standard deviation ($\sigma\%$) among the three pairs of transducers in slab 2.....	212
Tableau 7.4	2S2P1D parameters.....	217
Tableau 8.1	Valeurs initiales et finales de l'évolution de V_s en relation avec le temps de première mesure et la durée de la cure	230
Tableau 8.2	Paramètres du modèle MM associés à l'évolution de V_s dans les spécimens testés	231
Tableau 8.3	Paramètres du modèle MM associés à l'évolution de la perte d'eau dans les spécimens testés	233
Tableau 8.4	Écart type entre les valeurs moyennes de V_s pour les différents couples de transducteur utilisés dans les spécimens d'ERF testés.	241
Tableau 8.5	Écart type relatif entre les valeurs moyennes de V_s pour les différents couples de transducteur utilisés dans les sections des plaques 1 et 2 du Chapitre 7.....	242

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Définition du MR Tirée de BNQ 2560-600 (2003, p. 7)	7
Figure 1.2	Illustration du retraitement de type 1 Tirée de Bitume Québec (2020, p. 2).....	11
Figure 1.3	Illustration du retraitement de type 2 Tirée de Bitume Québec (2020, p. 2).....	12
Figure 1.4	Système d'axe utilisé dans Di Benedetto et al. (2009); a) orientation dans la plaque ; b) orientation dans les spécimens cylindriques Adaptée de Di Benedetto et al. (2009, p. 21)	14
Figure 1.5	Représentation schématique de l'essai triaxial	18
Figure 1.6	Exemple de courbe maîtresse et du principe d'équivalence temps- température Adaptée de Perraton et al. (2018, p. 4)	20
Figure 1.7	Illustration du modèle 2S2P1D Adaptée de Nguyen et al. (2020, p. 181)	21
Figure 1.8	Comportement des ondes de compression (a) et de cisaillement (b) Adaptée de Bačić, Librić, Kačunić, & Kovačević (2020, p. 3)	29
Figure 1.9	Comportement des ondes de Rayleigh (c) et de Love (d) Adaptée de Bačić et al. (2020, p. 3)	31
Figure 1.10	Schéma de principe de l'essai d'impact de résonance, dans le cas d'une excitation longitudinale.....	34
Figure 1.11	Schéma de principe de l'effet de Poisson dans le cas d'un anneau piézoélectrique	39
Figure 2.1	Courbe granulométrique du GBR 0-10 mm utilisé dans l'article 1	54
Figure 2.2	Presse à cisaillement giratoire vide avec un moule de 100 mm de diamètre.....	55
Figure 2.3	Compacteur de plaque LPC	56
Figure 2.4	Courbe granulométrique du GBR 0-20 mm.....	57
Figure 2.5	Granulométrie des GBR 0-10 mm et 0-20 mm utilisés dans l'article 3.....	59

Figure 2.6	Représentation schématique de la découpe des sections dans les plaques 1 a), et 2 b); le système d'axe présenté est utilisé dans la suite de l'étude.....	60
Figure 2.7	Moules en impression 3D remplis de mastic bitumineux. À gauche 30 mm et à droite 15 mm de hauteur	61
Figure 2.8	Moule de 15 mm avec mastic bitumineux recouvert d'une fine couche d'argile broyée.....	62
Figure 2.9	Transducteurs 38-34 mm avec pierre poreuse en acier fritté et croix de 1 mm	64
Figure 2.10	Transducteur 26-22 mm à gauche et 19-16 mm à droite; Pierre centrale en 4 morceaux avec rainure à gauche et damier en relief à droite	65
Figure 2.11	Moules en silicone pour les transducteurs 51-45 mm (a), pour les transducteurs 26-22 mm avec 4 quarts de disque et anneau piézoélectrique (b) et 36-31 mm (c). La croix en silicone permet le placement des 4 quarts de disque.....	66
Figure 2.12	Capsule pour transducteur 26-22 mm A avec et sans transducteur	68
Figure 2.13	Schéma du dispositif d'émission et d'acquisition des signaux	69
Figure 2.14	Forme de signaux utilisés pour l'émission. a) Demi-Sinus Arrondi; b) Demi-Sinus; c) Gaussienne; d) Sinus Arrondi; e) Sinus; f) Ondelette	70
Figure 2.15	Interface du programme d'analyse fréquentielle P-RAT sous LabView Transducteur 26-22 mm A, Gau-10kHz-12V-28dB, Spécimen C-15, Mesure 39	72
Figure 2.16	Essai à vide, transducteur 19-16 mm DSA-15kHz-12V-14dB	74
Figure 2.17	Plaque support avec bouchon à gauche et porte transducteur 38-34 mm à droite	77
Figure 2.18	Bouchon en acier à gauche et porte transducteur 38-34 mm à droite	77
Figure 2.19	Montage expérimental. Le spécimen reposant sur la mousse est instrumenté avec le couple de transducteurs 26-22 mm A	81
Figure 2.20	Image thermique traitée avec le programme Flir Thermal Studio	82
Figure 2.21	Planification des mesures pour le spécimen C-17	84

Figure 2.22	Planification des mesures pour le spécimen C-15	85
Figure 2.23	Planification des mesures pour le spécimen C-12	85
Figure 2.24	Spécimen 3 installé dans la chambre thermique de la presse MTS et instrumenté, avant essai	89
Figure 2.25	Illustration de l'application d'un filtre gaussien 3D de taille 5 voxels; à gauche image d'origine; à droite image filtrée; spécimen Slab2_3C ...	91
Figure 2.26	Illustration de l'hétérogénéité des intensités, à gauche avec un fort contraste, à droite contraste régulier	92
Figure 2.27	Illustration du filtre Manual RBF; à gauche l'image d'origine ; à droite l'image filtrée; le contraste est similaire pour les 2 images, les points verts sont disposés manuellement comme référence pour le filtre.....	93
Figure 2.28	Exemple de l'opération morphologique d'érosion de taille 3 voxels	94
Figure 2.29	Segmentation des granulats dans le spécimen Slab2_3C. L'opération morphologique d'érosion a été appliquée	94
Figure 2.30	Représentation schématique du processus de segmentation	95
Figure 2.31	Orientation des particules dans le logiciel Dragonfly	96
Figure 2.32	Illustration du filtre CLAHE. À gauche, l'image d'origine; à droite, l'image filtrée qui présente un plus fort contraste	97
Figure 2.33	Illustration de l'hétérogénéité possible au sein de l'image 3D à la suite de l'application d'un filtre CLAHE sur le spécimen Slab2_2C	98
Figure 2.34	Spécimen Slab1_7 équipé du couple de transducteur 26-22 mm A dans la direction 1.....	99
Figure 2.35	Montage expérimental avec capsule inférieure 26-22 mm installée.....	101
Figure 2.36	Montage expérimental avec capsule supérieure et spécimen de mastic ..	101
Figure 3.1	Schematic of experimental and actual transfer function Adaptée de Karray et al. (2015, p. 5).....	108
Figure 3.2	(A) Cylinder specimen equipped with a sensor couple and (B) slab specimen equipped with three sensor couples	114

Figure 3.3	(A) Temporal signal and (B) frequency spectrum of a tested signal without bitumen mastic. (C) Temporal signals and (D) frequency spectrum of a tested signal with mastic; 38-34 mm transducers, 107-mm-tall cylinder specimen	116
Figure 3.4	Evolution of water loss for (A) Slab 1 and (B) Slab 2.....	118
Figure 3.5	Evolution of the received signal over time for half-roundish sinus: 5kHz, 12V, 14dB, Slab 2	120
Figure 3.6	V_s measurements using P-RAT for Slab 1 with respect to (a) time and (b) water loss in the slab.....	122
Figure 3.7	V_s measurements using P-RAT for Slab 2 with respect to (a) time and (b) water loss in the slab.....	123
Figure 3.8	Amplitude of received signals for three input signals with respect to (a) time, (b) water loss, and (c) V_s	126
Figure 3.9	Results of the spectral analysis: (a) water loss with respect to time for both slabs; V_s measurement with respect to time for (b) Slab1 and (c) Slab 2	128
Figure 4.1	Évolution de V_s en fonction du temps, (a); évolution de la perte d'eau en fonction du temps, (b); plaque 1. Modélisation Michaelis-Menten	135
Figure 4.2	Évolution de V_s en fonction du temps, (a); évolution de la perte d'eau en fonction du temps, (b); plaque 2. Modélisation Michaelis-Menten	136
Figure 4.3	Évolution de l'amplitude des signaux en fonction du temps, (a); évolution de l'amplitude en fonction de la perte d'eau, (b); évolution de l'amplitude en fonction de la vitesse de l'onde de cisaillement, (c); Modélisation Michaelis-Menten	137
Figure 4.4	Évolution de V_s en fonction de la perte d'eau dans la plaque 1; Modélisation Michaelis-Menten	138
Figure 4.5	Évolution de V_s en fonction de la perte d'eau dans la plaque 2; Modélisation Michaelis-Menten	139
Figure 4.6	Évolution de V_s sur une période de 24 heures, plaque 1.....	140
Figure 4.7	Évolution de V_s sur une période de 24 heures, plaque 2	141

Figure 4.8	Évolution de la température de surface et de la masse d'eau perdue pour les plaques 1 et 2; (a) période de 24 heures après la compaction; (b) période de 72 heures après la compaction.....	142
Figure 4.9	Évolution de la perte d'eau et de V_s en fonction du temps de cure du spécimen Contrôle-17_3 sur une période de 50 jours.....	145
Figure 4.10	Évolution de la perte d'eau et de V_s en fonction du temps de cure du spécimen Contrôle-17_3 sur une période de 2 jours.....	146
Figure 5.1	General scheme of the P-RAT setup, in a geotechnical application Adaptée de Karray et al. (2015, p. 5).....	154
Figure 5.2	Scheme of the experimental campaign	156
Figure 5.3	Experimental setup with a specimen, (A); closeup view of a specimen with the 36-31 mm transducer pair, (B) and (C); Thermal picture of the specimen (D).....	158
Figure 5.4	Experimental planning for specimen C-12	161
Figure 5.5	Evolution of the water loss and surface temperature during the 48 hours after compaction for the 3 tested specimens	164
Figure 5.6	Evolution of the water loss in specimens C-12, C-15 and C-17, over 30 days of curing.....	165
Figure 5.7	Evolution of the normalized water loss with respect to curing over 2 days	166
Figure 5.8	Evolution of the water loss and surface temperature for 5 days for 2 slabs Adaptée de Lecuru et al. (2019, p. 345).....	168
Figure 5.9	Evolution of V_s values, surface temperature and water loss evolution for specimen C-12 over 30 days, logarithmic scale	169
Figure 5.10	Evolution of V_s values, surface temperature and water loss evolution for specimen C-15 over 30 days, logarithmic scale	170
Figure 5.11	Evolution of V_s values, surface temperature and water loss evolution for specimen C-17 over 30 days, logarithmic scale	171
Figure 5.12	Comparison of Mean V_s for specimen C-12, C-15 and C-17 over 30 days of curing, logarithmic scale. The MM models are presented	175
Figure 5.13	Evolution of V_s values and water loss in specimen Control-17_3, over curing (7 days in oven, then room temperature).....	176

Figure 5.14	Mean V_s values for every pair of transducers with respect to void ratio; hollow symbols refer to control specimen V_s values	181
Figure 5.15	V_s with respect to measured water loss for every specimen over 30 days of curing.....	182
Figure 6.1	Résultat de V_s dans les spécimens de mastic bitumineux.....	188
Figure 7.1	Example of input signal and received signal	198
Figure 7.2	Schematic of the experimental campaign	200
Figure 7.3	Schematic view of : A) slab 1, B) slab 2; C) real specimens after curing and cutting, slab 2	201
Figure 7.4	Parameters Φ and θ schematic definition, Dragonfly	206
Figure 7.5	V_s measurements using P-RAT and influence of the bitumen mastic interface; Temporal signals A) and B); P-RAT analysis C) and D); Frequency decomposition E) and F) without and with bitumen mastic, respectively. Section Slab2_3, dir. 2, 26-22 mm transducers, DSA-10kHz-12V signal.....	209
Figure 7.6	Shear wave velocity with respect to direction for tested sections of slab 1. Sections with * have also been tested with a bitumen mastic interface. The relative differences between mean V_s values are displayed	210
Figure 7.7	Shear wave velocity with respect to directions for each section of the slab 2. Sections with * has been tested with and without a bitumen mastic interface. The relative differences between mean V_s values is displayed.....	211
Figure 7.8	PUNDIT P-wave results in three directions for each section of slab 2 in three arrival time setups. The relative difference between mean V_s values is displayed.....	215
Figure 7.9	UPV P and S waves signals comparison in different directions and sections of slab 2	216
Figure 7.10	Master curve of cylinder cored in direction 3 for section Slab2_3 and Slab2_4 at a reference temperature of 20°C. The calculated complex modulus from UPV tests are also plotted.....	219
Figure 7.11	Individually labelled particles bigger than 1 mm ³ , specimen Slab2_3C, ORS Dragonfly	220

Figure 7.12	Particles orientation in specimen Slab2_2C (A), Slab2_3C (B), and Slab2_4C (C). Phi and Theta values	221
Figure 7.13	Particles orientation in specimens Slab2_3C for 2 configurations; A) XZY, phi calculated regarding dir.1 axis; B) YZX, phi calculated regarding dir.2 axis	223
Figure 8.1	Évolution de V_s et du taux d'évolution de V_s en fonction du paramètre C	238
Figure 8.2	Valeurs moyennes de V_s pour les différents couples de transducteurs en fonction de la teneur en vide du spécimen testé, avant et après la cure. Les mesures de V_s pour la plaque anisotropie correspondent à V_s dir. 2	239
Figure 8.3	Teneur en vide dans les 3 directions dans les spécimens de Slab2; a) selon l'axe de la direction 3, 20 mm représente la partie avant de la plaque; b) selon la direction 2, 0 mm représente le fond de la plaque; c) selon la direction 1. Les formes grises représentent les cylindres balayés	245
Figure 8.4	Plaque Slab2 (Chapitre 7) après démolage; de gauche à droite : Avant, Sommet, Arrière et Vue de côté de la plaque	246
Figure 8.5	Surestimation des voxels de vide dans le spécimen Slab2_2C, dir.1. Les parties bleutées sont les particules considérées comme du vide	247

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
CIR	Cold In-place Recycling
CR	Colonne de résonance
CTAA	Canadian technical asphalt association
CT-Scan	Computed tomography scan
E	Module d'Young
E*	Module complexe
EB	Enrobé bitumineux
EBC	Enrobé bitumineux coulé à chaud
ERF	Enrobé recyclé à froid
FDR	Full depth reclamation
G	Module de cisaillement
GBR	Granulat bitumineux recyclé
IR	Impact de résonance
ITS	Indirect tensile strength
ITSM	Indirect tensile stiffness modulus
LPC	Laboratoire des ponts et chaussées
MASW	Multichannel analysis of surface waves
MM	Michaelis-Menten
MMASW	Multi modal analysis of surface waves
M _r	Module résilient

MR	Matériaux recyclés
MTMD	Ministère des Transports et de la Mobilité durable
MTQ	Ministère des Transports du Québec
Onde P	Onde primaire ou onde de compression
Onde S	Onde secondaire ou onde de cisaillement
PCG	Presse à cisaillement giratoire
P-RAT	Piezoelectric ring actuator technique
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
S	Résistance à la traction indirecte
SASW	Spectral analysis of surface waves
UPV	Ultrasonic pulse velocity
V_{gr}	Vitesse de groupe
V_p	Vitesse de propagation de l'onde de compression
V_{ph}	Vitesse de phase
V_s	Vitesse de propagation de l'onde de cisaillement
2S2P1D	2 Springs, 2 Parabolic creep, 1 Dashpot

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE LONGUEUR

m	mètre
mm	millimètre
μm	micromètre

UNITÉ DE MASSE

g	gramme
---	--------

UNITÉS MÉCANIQUES

Vitesse

m.s^{-1} mètre par seconde

Force et contrainte

MPa	mégapascal
N	Newton
kN	kilonewton

Angle et phase

rad radian

Vitesse angulaire

rad.s^{-1} radian par seconde

UNITÉ DE TEMPÉRATURE

$^{\circ}\text{C}$ degré Celsius

UNITÉS DE TEMPS

s	seconde
min	minute
h	heure
j	jour

Fréquence

Hz	Hertz
kHz	kilohertz

UNITÉ DE GAIN

dB décibel

UNITÉS ÉLECTRIQUES

kV	kilovolt
μA	microampère

INTRODUCTION

S'inscrivant dans une démarche écologique et économique, le recyclage des matériaux routiers se présente comme une solution pour permettre la réfection des chaussées bitumineuses. En effet, lorsqu'un défaut dans une des couches d'enrobé bitumineux menace l'intégrité de la chaussée, il est nécessaire de réfectionner la couche concernée. Réutiliser les matériaux encore viables dans leur grande majorité afin de reconstituer une couche d'enrobé représente un gain considérable. Cette approche s'intitule le recyclage des enrobés bitumeux.

Il existe deux grands types de recyclage, à chaud et à froid. Le premier intègre une certaine proportion de matériaux bitumineux recyclés dans un enrobé malaxé et compacté à chaud. Le second permet de réutiliser, en partie ou en totalité, les matériaux bitumineux directement sur place. Le recyclage à froid présente donc un intérêt écologique et économique supérieur au recyclage à chaud.

Cependant, lors de la réalisation d'un enrobé recyclé à froid, une certaine quantité de bitume doit être ajoutée au mélange sous forme d'émulsion de bitume ou de mousse de bitume. Celles-ci confèrent au mélange nouvellement créé un comportement très évolutif, le faisant passer d'un état granulaire à un matériau cohérent, comme attendu d'un enrobé bitumineux classique.

Faisant suite à un projet de mémoire sur le même sujet, la présente étude évalue l'utilisation d'une méthode basée sur l'analyse fréquentielle d'ondes de cisaillements afin de caractériser des matériaux bitumineux recyclés à froid de type MR-7 traités à l'émulsion de bitume. L'accent sera mis sur le très jeune âge, qui correspond à la période suivant le compactage. D'autres applications de cette méthode sont explorées. La thèse est au format *Thèse par article*, et est articulée comme suit.

Le premier Chapitre présente la revue de la littérature. Le recyclage des enrobés bitumineux et les matériaux ainsi obtenus sont détaillés. Les paramètres à l'étude sont abordés. Cela permet de présenter, dans les grandes lignes, les essais couramment utilisés pour caractériser les

enrobés recyclés à froid (ERF). Les techniques utilisant les ondes sont introduites et en particulier la méthode P-RAT (*Piezoelectric Ring Actuator Technique*) utilisée dans cette étude. Finalement, l'analyse d'images 3D obtenues par tomodensitométrie est abordée.

Le deuxième Chapitre présente les objectifs du doctorat ainsi que le programme expérimental. Les matériaux utilisés sont présentés. Les montages expérimentaux et leurs composants sont introduits. Enfin, le déroulement des campagnes expérimentales est présenté.

Le Chapitre 3 présente le premier article qui traite des essais préliminaires et de la mise en place du P-RAT pour tester des ERF. La difficulté à tester les ERF en très jeune âge via les essais classiques y est rappelée et le P-RAT est proposé comme solution. Les paramètres de V_s , de l'eau perdue et de l'amplitude des signaux sont analysés et des liens sont créés entre eux. Il apparaît que l'utilisation de V_s via le P-RAT est prometteur pour caractériser les ERF en jeune âge 90 minutes après le compactage.

Le Chapitre 4 présente un complément d'analyse à l'article présenté au chapitre précédent. L'utilisation du modèle Michaelis-Menten y est proposée afin de modéliser les données. Une nouvelle analyse du lien entre V_s et la perte d'eau est effectuée et il en découle les améliorations apportées au montage expérimental qui sont présentées au Chapitre 2. Des essais préliminaires sont présentés.

Le Chapitre 5 présente le deuxième article qui approfondit l'utilisation du P-RAT dans un ERF plus jeune compacté à différentes teneurs en vide. Les modifications apportées au montage expérimental permettent de commencer les essais 10 minutes après la compaction. L'évolution des paramètres est modélisée grâce au modèle Michaelis-Menten. Celui-ci permet d'évaluer l'influence de la cure sur le comportement des ERF testés. Des liens sont faits entre les résultats du P-RAT et des essais classiques réalisés sur un ERF similaire.

Le Chapitre 6 introduit les essais réalisés sur le mastic bitumineux utilisé afin d'améliorer le contact entre les transducteurs et le matériau testé. Ce mastic est utilisé dans les travaux

présentés au Chapitre 7. Les résultats de V_s obtenus y sont présentés et les facteurs d'influences discutés.

Le Chapitre 7 présente le troisième article qui vise à évaluer l'anisotropie dans un ERF à l'aide du P-RAT. Les enrobés bitumineux et les ERF sont généralement considérés comme des matériaux isotropes. Dans le cas contraire, l'orientation directionnelle dans laquelle les essais sont réalisés influencerait les résultats des essais effectués. Des essais cherchant à évaluer le comportement anisotropique des enrobés bitumineux existent, mais pas concernant les ERF. Ainsi dans cet article, le P-RAT est utilisé pour mesurer V_s dans trois directions. Des mesures similaires sont obtenues avec une technique temporelle basée sur les ondes. Des essais de module complexe sont réalisés et les résultats sont comparés avec ceux issus des ondes. Enfin, les résultats obtenus sont complétés par une analyse d'images 3D obtenues par tomodensitométrie.

Le Chapitre 8 consiste en une analyse globale des résultats obtenus dans les travaux présentés aux Chapitres 3 à 7. La pertinence du paramètre V_s afin de caractériser les ERF y est discutée, aussi bien vis-à-vis de la cohérence des résultats obtenus qu'au travers de comparaisons avec la littérature. De plus, un retour est fait sur l'utilisation du P-RAT au cours de ce doctorat.

Un retour sur les éléments principaux est effectué dans la conclusion et les principales contributions y sont présentées. Le projet a soulevé de nouvelles questions et des pistes de recherche sont abordées dans les recommandations.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre fait état des éléments issus de la littérature qui sont d'intérêt pour le présent doctorat. Les enrobés bitumineux recyclés sont présentés et plus spécifiquement les enrobés recyclés à froid. Les essais classiques utilisés pour caractériser les ERF sont présentés et leurs limites mises en avant, en lien avec l'importance de la cure dans les ERF. Des techniques basées sur l'utilisation d'ondes mécaniques sont présentées et particulièrement la technique P-RAT. Finalement, l'utilisation de la tomodensitométrie dans l'étude des enrobés bitumineux est présentée.

1.1 Généralités sur le recyclage des enrobés bitumineux

1.1.1 Réfection de la chaussée

Une chaussée peut être rigide ou souple, la différence résidant dans la composition du corps de la chaussée et du revêtement. La première est constituée d'une fondation granulaire recouverte d'une dalle de béton. La seconde se compose de couches de matériaux granulaires, généralement non traités, qui vont apporter de la résistance mécanique à la chaussée et permettre la répartition des charges vers le sol support. Ces couches sont recouvertes d'une ou plusieurs couches d'enrobés bitumeux qui isolent et protègent les fondations et d'une couche supplémentaire appelée couche de roulement qui assure le confort et la sécurité des usagers (Carter, Donovan, MacInnis, & Strynadka, 2018).

Avec le trafic et le temps, la chaussée se dégrade. Un entretien régulier permet de prolonger l'espérance de vie de la chaussée, de limiter les coûts associés et de moins perturber le trafic des usagers comparativement à une reconstruction totale de la chaussée.

Dès lors que les défauts sont prononcés, une réhabilitation est possible. Cependant, si les dommages sont trop grands ou ont atteint l'infrastructure, la reconstruction de la chaussée dans son entiereté est nécessaire (Bitume Québec, 2017).

Dans le cas où une réhabilitation serait nécessaire, il convient de retirer les couches défaillantes et de les remplacer. Le choix reste ensuite de déterminer si des matières premières neuves ou des matériaux issus des couches retirées seront utilisés. Le second choix permet de réaliser des économies et de réduire la quantité de rebuts, diminuant ainsi l'impact écologique. Cette seconde voie devient de plus en plus répandue, et s'appelle le recyclage des enrobés bitumineux.

1.1.2 Recyclage à chaud et à froid

Le recyclage des EB peut se faire à chaud. Celui-ci est assez similaire à la création d'un enrobé bitumineux à chaud (EBC) classique, dans le sens où les éléments vont être chauffés à des températures de 150 à 180 °C.

Le recyclage à froid vise à réduire l'énergie calorifique apportée au mélange, en incorporant le liant bitumineux sous forme de mousse de bitume (bitume chaud mis en contact avec de l'eau) ou d'émulsion de bitume (particules de bitumes en suspension dans de l'eau), et ce, à des températures inférieures à 100 °C. Pour un usage similaire, le recyclage à froid est donc plus écologique, car il consomme moins d'énergie calorifique.

1.1.3 Matériaux recyclés

Au Québec, les matériaux recyclés (MR) sont classés selon la norme NQ 2560-600 (BNQ, 2003). Cette norme distingue sept catégories de MR, classé de MR-1 à MR-7, en fonction du pourcentage massique de leurs constituants à savoir les résidus d'enrobés bitumineux ou granulats bitumineux recyclés (GBR), les résidus de béton et les granulats naturels. La Figure 1.1 présente les différents types MR.

Le choix du MR est lié à l'usage qu'on souhaite en faire. Dans le cas des chaussées souples, les MR-5 seront principalement utilisés en tant que couches de fondation et les MR-7 en couche de base. Les MR peuvent être traités ou non avec un liant hydrocarboné ou hydraulique. Le cas échéant, on parle de matériaux retraités (MTQ, 1996; CFTR, 2003).

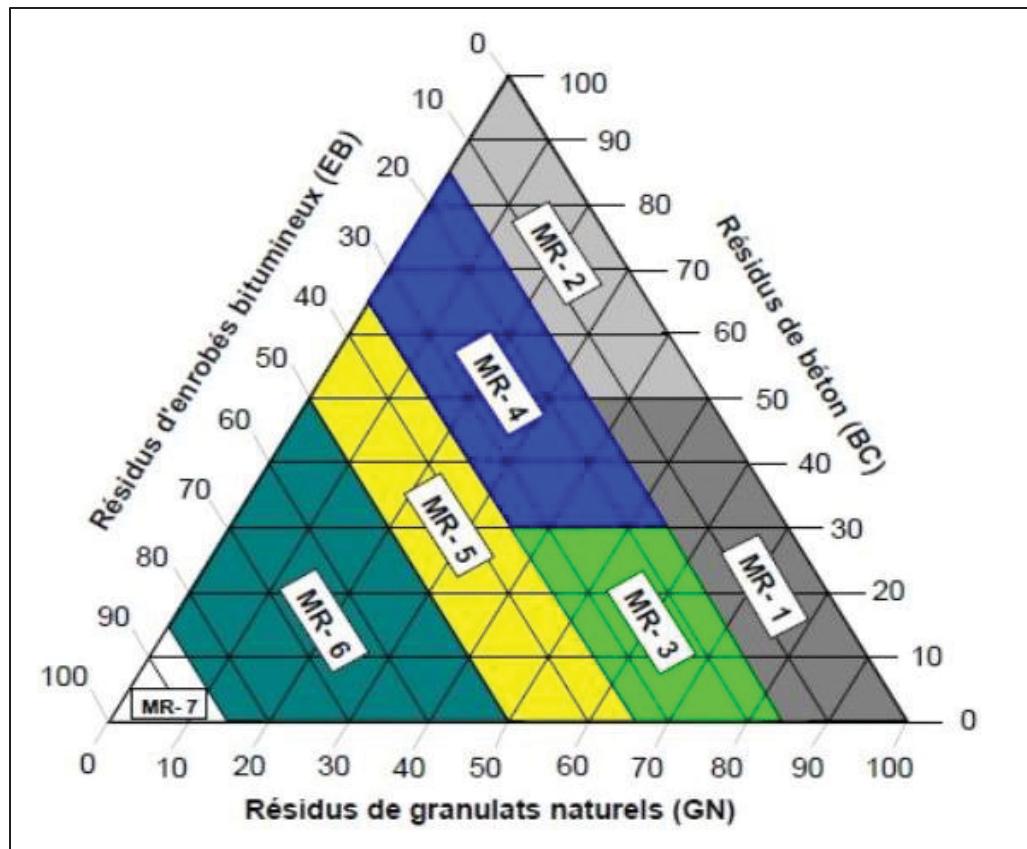


Figure 1.1 Définition du MR
Tirée de BNQ 2560-600 (2003, p. 7)

Lors de la confection d'une couche d'enrobé recyclé, par exemple, les propriétés du MR choisi doivent être prises en compte. En effet, le MR est composé d'un squelette granulaire, ainsi que d'une quantité de bitume. L'enrobé bitumineux formé doit répondre à des exigences de performance et de conformité aux normes. Ainsi, des ajustements sont apportés au MR. En effet, le squelette granulaire peut être modifié en ajoutant des granulats vierges et des fines (granulats fins, de calibre 0-125µm, d'origines diverses visant à combler les vides ou renforcer des propriétés mécaniques par des interactions chimiques).

1.2 Les enrobés recyclés à froid (ERF)

Les ERF se caractérisent par l'ajout de liant d'apport sous la forme de mousse de bitume ou d'émulsion de bitume, contrairement aux enrobés recyclés à chaud où le liant d'apport est sous la forme de bitume chaud. Dans les deux cas, le liant d'apport doit permettre au bitume présent dans le MR de s'intégrer à l'enrobé recyclé et donc jouer pleinement son rôle de liant.

Dans le cas des ERF, une quantité d'eau supplémentaire dite d'ajout est incorporée au mélange. Du ciment ou de la chaux peuvent également être ajoutés, la quantité variant en fonction du type d'ERF souhaité (Carter, Herman, Perration, & Ortega, 2008; Cardone, Grilli, Bocci, & Graziani, 2015; Bitume Québec, 2020). La présente étude se concentre sur des ERF traités à l'émulsion de bitume, aussi les mousses de bitumes ne seront pas abordées.

1.2.1 Émulsion

Une émulsion est, par définition, un mélange de deux liquides non miscibles (Asphalt Institute, 1997; Shanbara et al., 2021). L'un des deux liquides est dispersé dans l'autre. Dans le cas d'une émulsion de bitume, c'est ce dernier qui est dispersé dans l'eau. En premier lieu, une énergie mécanique est apportée afin de maintenir séparés l'eau est le bitume. Par la suite, c'est l'ajout de produit tensio-actif qui permettra cette séparation.

Les molécules des tensio-actifs sont composées d'une tête polaire hydrophile et ionisable dans l'eau et d'une queue hydrophobe. La queue est une longue chaîne hydrocarbonée et, vu la nature d'hydrocarbure du bitume, va être attirée par le bitume et se planter dans les billes de bitume. La tête ionisable va quant à elle rester dans l'eau et créer une charge électrique en surface de la bille de bitume. Dépendamment du tensio-actif utilisé, et de la nature acide ou basique du milieu, une charge positive ou négative sera générée (Asphalt Institute, 1997; Shanbara et al., 2021).

Émulsion anionique

Elles sont caractérisées par une charge négative en surface des gouttes de bitume du fait de l'utilisation d'un tensio-actif de type acide carboxylique R-COOH dont la chaîne carbonée R est la queue du tensio-actif et le groupe carboxylique COOH en est la tête (Asphalt Institute, 1997). C'est celle-ci qui va s'ioniser en présence d'eau pour donner une tête chargée négativement COO-. L'ionisation doit se produire en présence d'une base, la soude (NaOH) étant généralement utilisée. Le pH est supérieur à 10.

Émulsion cationique

Elles sont caractérisées par une charge positive en surface des gouttes de bitume du fait de l'utilisation d'un tensio-actif de type sel aminé R-NH₂ dont la chaîne carbonée R est la queue du tensio-actif et le groupe amine NH₂ en est la tête (Asphalt Institute, 1997). C'est celle-ci qui va s'ioniser en présence d'eau pour donner une tête chargée positivement NH₃⁺. L'ionisation doit se produire en présence d'une base, l'acide chlorhydrique étant généralement utilisé. Le pH est inférieur à 4.

Rupture de l'émulsion

La stabilité de l'émulsion est liée à ces charges. En effet, une répulsion électrostatique des billes de bitume par rapport aux autres s'opère, ce qui permet à l'émulsion de rester sous sa forme et donc d'être stockée. Ainsi, un changement de pH annulera la répulsion électrostatique et conduira à la rupture de l'émulsion. Ce sont donc les éléments qui sont ajoutés à l'émulsion qui vont être responsables de ce changement. En effet, les granulats possèdent une polarité, certain étant chargés positivement et d'autre négativement. Leur ajout va donc provoquer une variation de pH dans le mélange et donc la rupture de l'émulsion. Cette rupture se décompose en trois étapes (Asphalt Institute, 1997; Shanbara et al., 2021).

L’agglomération des billes de bitume par sédimentation intervient en premier. Du fait de la gravité et des différences de densité de la phase dispersée et de la phase dispersante, les billes sont attirées vers le fond du réservoir. C’est ce qui se déroule naturellement lors du stockage, et une simple agitation du mélange permet de contrer ce phénomène. Par la suite s’opère la flocculation qui est une autre forme d’agglomération, mais cette fois régie par les forces d’attraction entre les billes (force de Van der Waals). L’insertion d’éléments perturbant le pH du mélange diminue la force de répulsion électrostatique liée aux charges recouvrant les billes de bitume. Cela mène à l’apparition d’une prépondérance des forces de Van der Waals, d’où la flocculation des billes de bitume. On considère que la rupture débute à cette phase. Finalement, la coalescence mène à la création d’un film de bitume continu, les billes s’étant rejoindes. Cette phase apparaît lors de la mise en place de l’enrobé bitumineux et s’accompagne du départ de l’eau.

Les granulats possèdent une charge et donc les émulsions vont réagir avec eux. Les émulsions anioniques ne vont réagir qu’en présence de granulats négatifs, alors que les émulsions cationiques réagissent en présence de granulats positifs et négatifs. Dans un souci de polyvalence, on utilise le plus souvent des émulsions cationiques (Xiao, Yao, Wang, Li, & Amirkhanian, 2018; Jain & Singh, 2021; Shanbara et al., 2021).

Dans le cas des ERF en place traités à l’émulsion, on ajoute parfois du ciment entre 0.5 et 1.5 % (Bitume Québec, 2020). En plus de permettre une rapide montée en cohésion, le ciment est basique et donc va accélérer la rupture de l’émulsion cationique qui est globalement acide.

1.2.2 Recyclage à froid sur place

L’utilisation de MR afin de recréer des EB est pertinente, économiquement et écologiquement (Shanbara et al., 2021). Si en plus, on supprime le transport de ce MR, les gains augmentent encore plus. Le retraitement en place présente cet atout majeur. Une seule machine effectue le décohézionnement de la chaussée, l’introduction du liant d’apport et d’autres composants aux MR, le malaxage et l’épandage. Un rouleau compacteur suit la machine.

Au Québec, le recyclage à froid en place se décompose en trois techniques appelées type 1 à 3 (Bitume Québec, 2007-2020).

Lorsque les défauts à corriger se trouvent dans les couches supérieures de la chaussée, un type 1 est effectué. Le revêtement présent sur la chaussée, généralement un enrobé bitumineux à chaud, va être broyé et réutilisé, comme présenté à la Figure 1.2. Un type 1 s'effectue pour une profondeur comprise entre 75mm et 150mm. On utilise donc un MR-7 dans ce procédé. Dans la littérature, on trouve ce procédé sous le nom de *Cold In-place Recycling* (CIR).

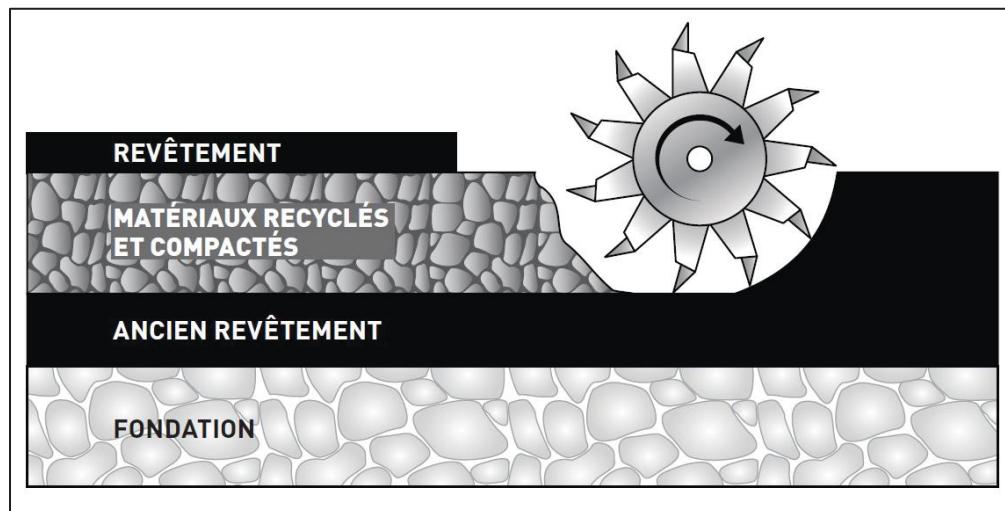


Figure 1.2 Illustration du retraitement de type 1
Tirée de Bitume Québec (2020, p. 2)

Si les défauts sont plus profonds et touchent la structure de la chaussée, un type 2 est effectué. En plus du revêtement, une partie de la fondation est également broyée comme présenté dans la Figure 1.3. Le MR obtenu est donc un mélange de résidus d'EB et de granulats vierges, généralement un MR-5. Ce MR peut être traité, ou non, avec une émulsion de bitume ou de la mousse de bitume. Un type 2 s'effectue pour une profondeur comprise entre 100 mm et 300 mm. Dans la littérature, on trouve ce procédé sous le nom de *Full Depth Reclamation* (FDR). Le type 3 diffère du type 2 par l'ajout d'une étape de fraisage de la couche supérieure, afin de réduire l'épaisseur et générer moins de MR.

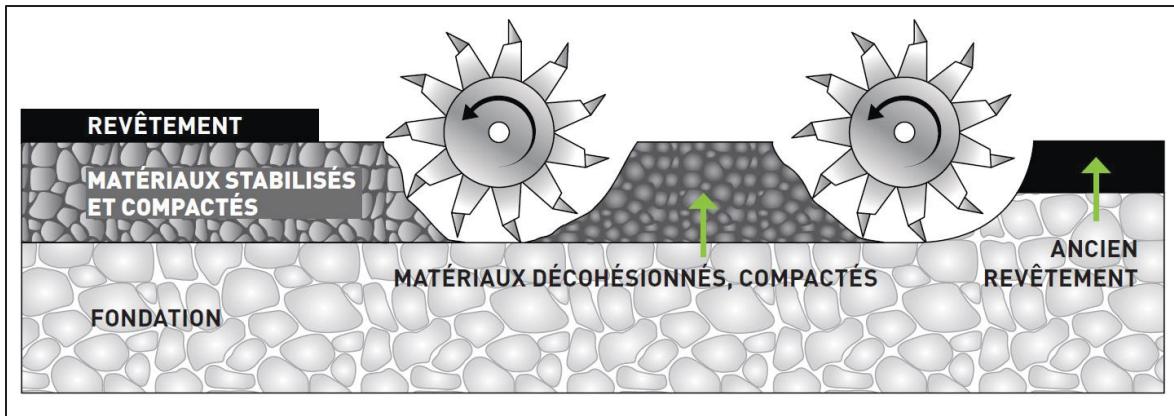


Figure 1.3 Illustration du retraitement de type 2

Tirée de Bitume Québec (2020, p. 2)

Après la pose d'un ERF fabriqué en place ou en centrale, une période de cure est nécessaire avant de le recouvrir, habituellement par un enrobé à chaud conventionnel. Au Québec, bien qu'aucune norme n'encadre cela, il est d'usage d'attendre deux semaines avant de recouvrir la couche d'ERF. Le trafic est cependant réouvert quelques heures après le compactage de l'ERF en place. En Ontario, une cure de deux semaines et une teneur en eau (*moisture content*) inférieure à 2 % (OPSS Provincial, Nov. 2015) sont à respecter avant de recouvrir l'ERF.

1.2.3 Comportement du matériau et anisotropie

Le comportement d'un ERF juste après sa production est assimilable à un matériau granulaire humide en très jeune âge (Santagata, Chiappinelli, Riviera, & Baglieri, 2010; Juntao, Tanzhong, Jinxiang, Yongli, & Jiapang, 2015; Orosa, Pérez, & Pasadín, 2022). Ce comportement change dans le temps pour se rapprocher du comportement des EBC. Dans la caractérisation des EBC, il est considéré que le matériau est isotrope et homogène (Larcher, Takarli, Angellier, Petit, & Sebbah, 2013; Pham et al., 2015; Di Benedetto, Sauzéat, & Clec'h, 2016; Perraton, Di Benedetto, Sauzéat, Nguyen, & Pouget, 2018; Nguyen, Pham, Di Benedetto, & Sauzéat, 2020), les mêmes hypothèses sont conservées dans l'étude des ERF.

Un matériau est considéré comme isotrope si ses propriétés mécaniques sont indépendantes de la direction observée (Lai, Rubin, & Krempl, 2010). Ainsi, il réagira de la même façon, peu

importe la direction dans laquelle une contrainte est appliquée. Le contraire se produit si le matériau est anisotrope. Dans le cas d'un matériau anisotrope, il faut considérer la façon dont sont obtenus les spécimens, car en fonction de la direction choisie, différentes propriétés seront évaluées. De plus, il est important de savoir identifier les sources d'anisotropie, afin de les prendre en compte lors de la réalisation de modèles (Underwood, Heidari, Guddati, & Kim, 2005) et donc lors du dimensionnement.

Underwood et al. (2005), Pham et al. (2015), Di Benedetto et al. (2016) et Nguyen et al. (2020) et Hao, Yingcheng, Pan, Tao, & Guoqiang (2024) ont évalué le comportement anisotropique des EBC. Les premiers ont montré que les EBC testés présentent des propriétés qui dépendent de la direction (dans le sens de la compaction et orthogonal à cette direction). Il semblerait que l'anisotropie n'influence pas le comportement dans le domaine des petites déformations, et donc le module dynamique. Cependant, dans le cas d'essai de compression pure, les valeurs de module différent. Une température d'essai plus élevée induit un plus fort comportement anisotropique, ce qui est aussi montré par Hao et al. (2024). Les deuxièmes ont étudié le coefficient de Poisson complexe et ont estimé qu'une isotropie transversale existe (*transverse isotropy*). Les troisièmes ont étudié le module complexe et le coefficient de Poisson dans 3 orientations différentes, en se basant sur un repère orthonormé. Il ressort de cette étude que la mesure du coefficient de Poisson est compliquée et que des différences de 25 % de la valeur du module ont été mesurées. Ils concluent que le matériau serait orthotropique. Enfin, Nguyen et al. (2020) ont comparé la valeur du module obtenue dans des cylindres carottés au sein d'une plaque d'EBC dans 3 directions différentes. Il ressort de cela que l'EBC testé présente un comportement anisotropique. L'essai de module complexe est présenté en détail à la section 1.3.3. Des modélisations numériques réalisées par Lin, Hu, Guan, Easa, & Jiang (2021) confirment la considération anisotropique du matériau.

Dans une autre étude, Di Benedetto, Sauzéat, & Sohm (2009) ont utilisé la vitesse de propagation d'ondes de compression (V_p) pour évaluer le module d'EBC. Il apparaît que, pour un spécimen compacté avec le compacteur de plaque LPC, les valeurs de V_p dans le plan XY sont supérieures à la valeur obtenue dans la direction Z (voir Figure 1.4 A). Dans le cas de

spécimens cylindriques obtenus à la presse à cisaillement giratoire (PCG), la valeur de V_p dans la direction de compactage, Z est supérieur aux valeurs obtenues dans le plan XY (voir Figure 1.4 B). Un comportement anisotropique est donc observé, et la méthode de compactage influence celui-ci.

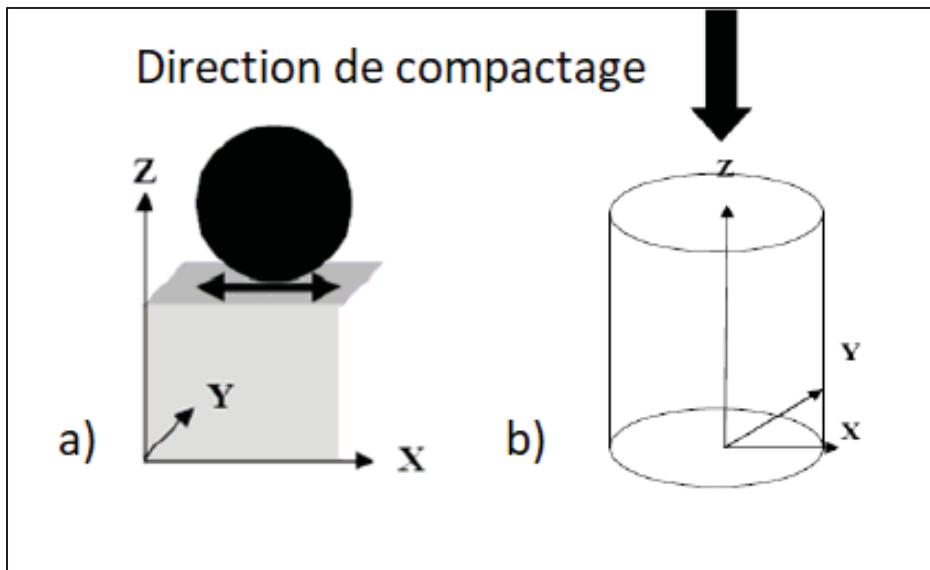


Figure 1.4 Système d'axe utilisé dans Di Benedetto et al. (2009);
a) orientation dans la plaque ; b) orientation dans les spécimens cylindriques
Adaptée de Di Benedetto et al. (2009, p. 21)

En géotechnique, on distingue deux types d'anisotropies. Une qui est inhérente au matériau et donc liée aux particules et à la façon dont le sol s'est constitué (gravité, consolidation, etc.). Par exemple, les argiles se déposent en couches, ce qui cause un comportement anisotropique (Pennington, Nash, & Lings, 1997; Santamarina, Klein, & Fam, 2001; Ethier, 2009). L'autre est liée à la contrainte et résulte des actions extérieures (Ethier, 2009; Nguyen, Szymkiewicz, Reiffsteck, Bourgeois, & Mestat, 2011).

Dans certaines études, la distinction entre les deux anisotropies est faite pour les enrobés bitumineux. L'anisotropie inhérente serait due à l'orientation des granulats, à l'orientation des contacts entre les granulats, et aux vides (Underwood et al., 2005; Bhasin, Izadi, & Bedgaker, 2011; Alanazi, Kassem, & Jung, 2018). L'évaluation de cette anisotropie peut être effectuée

via des images obtenues par tomodensitométrie assistée par ordinateur (CT-Scan, expliqué en détail à la section 1.7). Bhasin et al. (2011) montrent que le mastic bitumineux aurait une orientation préférentielle de 90 à 45 degrés par rapport à la direction de compactage, pour des mélanges avec peu et plus de gros granulats, respectivement. Cela montre la présence d'une anisotropie induite par le compactage en plus de l'anisotropie inhérente. De plus, il apparaît que les gros granulats influencent la direction de l'anisotropie. Alanazi et al. (2018) ont utilisé le critère de degré d'anisotropie inhérente (DIA, *degree of inherent anisotropy*), quotient des moments d'inertie minimum et maximum, pour quantifier l'anisotropie inhérente des vides. Il est mis en avant que les EBC testés sont anisotropes, et que l'anisotropie diminue avec l'augmentation de la compacité. De plus, la méthode de compactage influence l'anisotropie.

L'anisotropie induite (qui résulte de contrainte) se transcrirait par la somme des dommages appliqués au spécimen testé (*damage-induced*) et qui causerait un réagencement de l'orientation des vides (Underwood et al., 2005). De plus, pour un confinement plus élevé, i.e. une contrainte exercée sur le spécimen plus élevée, l'anisotropie augmente. Cette anisotropie est quantifiée par un ratio des déformations radiales et des déformations axiales (Underwood et al., 2005; Alanazi et al., 2018). Cependant, les déformations mesurées sont grandes et sortent du cadre des petites déformations (Masad, Tashman, Somedavan, & Little, 2002; Underwoold et al., 2005; Alanazi et al., 2018).

Ainsi, la notion d'anisotropie induite dans les enrobés bitumineux est liée à la manière de réaliser l'essai, notamment la présence ou non d'un confinement.

1.3 Les essais classiques sur les EBC et les ERF

Cette section présente une description des essais utilisés afin de caractériser aussi bien les EBC que les ERF et qui sont d'intérêts pour la présente étude.

1.3.1 Essai de traction indirecte

L'essai de traction indirecte consiste à appliquer une force de compression diamétrale dans le sens de la longueur sur un échantillon cylindrique prélevé sur la chaussée à tester ou confectionné en laboratoire. Cet échantillon peut être une éprouvette Marshall, une éprouvette obtenue grâce à la PCG ou une carotte de chantier. Les deux principaux essais en traction indirecte sont la résistance en traction indirecte effectuée avec un chargement monotone, et la mesure de la rigidité par un chargement répété.

Résistance à la traction indirecte (ITS)

Cet essai consiste à appliquer une déformation évoluant de façon constante sur l'échantillon jusqu'à la rupture de celui-ci. La résistance à la traction indirecte S est homogène à une pression et est calculée avec l'équation 1.1 (ASTM D6931-17, ASTM International, 2017):

$$S = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \quad (1.1)$$

Avec d le diamètre (m), t la hauteur de l'échantillon (m) et P la charge appliquée lors de la rupture (N).

Cet essai est utilisé pour caractériser les ERF (Fu, Jones, Harvey, & Halles, 2010; Juantao et al., 2015; Godenzoni, Cardone, Graziani, & Bocci, 2016; Graziani, Godenzoni, Cardone, Bocci, & Bocci, 2017; Graziani, Iafelice, Raschia, Perraton, & Carter, 2018; Raschia, Perraton, Graziani, & Carter, 2020; Orosa et al., 2022a; Goli, Sasidharan, Raj Kumar, & Bharath, 2023). Hormis Goli et al. (2023) qui ont effectué l'essai 1 heure après compactage, il ressort des travaux cités qu'une période de cure d'au moins 1 jour est nécessaire pour réaliser l'essai sur un ERF.

Chargement répété en traction indirecte

Ce test consiste à appliquer de façon répétitive un chargement à l'échantillon en intégrant un temps de repos de 0,4 ou 0,9 seconde entre chaque chargement de 0,1 seconde. On obtient par cet essai le module résilient de l'échantillon qui correspond au rapport de l'amplitude de la contrainte imposée sur la microdéformation élastique relevée (Goli et al., 2023). L'équation 1.2 (Goli et al., 2023) présente le calcul, avec M_r le module résilient (MPa), $\sigma_{cyclique}$ la contrainte sinusoïdale (MPa) et ϵ la microdéformation relevée (m/m).

$$M_r = \frac{\sigma_{cyclique}}{\epsilon} \quad (1.2)$$

Le module résilient représente donc le comportement élastique du matériau. L'essai nécessite, avant de relever les valeurs, que quelques cycles soient réalisés afin d'atteindre une certaine stabilité. Goli et al. (2023), ont réalisé cet essai sur des ERF, après un jour de cure.

1.3.2 Essai triaxial

L'essai triaxial, couramment utilisé pour caractériser les matériaux non liés, peut être employé pour déterminer le module résilient (M_r) des ERF, notamment en très jeune âge, qui peuvent être assimilés à des matériaux granulaires en raison de leur manque de cohésion. Adapter ce test à ces enrobés a donc du sens (Santagata et al., 2010). Pour simuler la compression dans le sol, l'essai est réalisé sous confinement. Ainsi, dans le cas des EB, il est possible de reproduire la compression exercée par le reste de la chaussée sur l'échantillon analysé. Ce confinement implique l'application d'une contrainte radiale constante (σ_3) ainsi que d'une contrainte axiale de compression constante ($\sigma_{compression}$) sur l'échantillon, voir Figure 1.5.

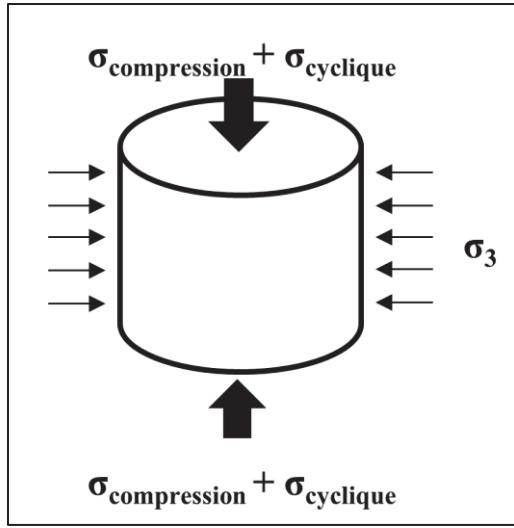


Figure 1.5 Représentation schématique de l'essai triaxial

Afin de réaliser l'essai, une contrainte σ_{cyclique} est exercée axialement sur le spécimen pendant un temps t_c suivi d'une période de repos t_r . Le module résilient M_r (MPa) est obtenu par le rapport de la contrainte exercée, σ_{cyclique} (MPa) et la déformation élastique ε (m/m), comme présenté à l'équation 1.2 de la section 1.3.1.

Des essais triaxiaux ont été réalisés sur les ERF (Santagata et al., 2010; Fu et al., 2010; Gandi, Kabago, Carter, & Singh, 2015; Guatimosim, Vasconcelos, Bernucci, & Jenkins, 2016; Kuchiishi, Vasconcelos, & Bernucci, 2019; Orosa et al., 2022b; Orosa, Pérez, & Pasadín, 2023). Santagata et al. (2010) ont pu tester des ERF 1 heure et 2,5 heures après compactage, auxquelles il faut ajouter une période de conditionnement avant l'essai (1 et 2,5 heures pour les essais à 20 et 60 °C, respectivement). Orosa et al. (2022b; 2023) ont quant à eux attendu 4 heures avant de tester leurs ERF. Kuchiishi et al. (2019) cherchaient à évaluer les performances des ERF une fois la cure complétée.

En suivant les procédures de l'AASHTO T-307, il apparaît qu'un essai complet dure au moins 2 000 secondes (500 cycles de préparations et 15 séquences de 100 cycles). Il est donc possible

que lors de la caractérisation d'un ERF en très jeune âge, les propriétés de celui-ci varient au cours d'un essai.

1.3.3 Essai de module complexe

Les essais de module complexe sont conçus pour évaluer le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux à diverses températures et fréquences de sollicitations. Les déformations appliquées sont de faible amplitude, ce qui devrait situer l'essai dans le domaine viscoélastique linéaire (Carter & Perraton, 2002; Cardone et al., 2015; Mangiafico, Babadopoulos, Sauzéat, & Di Benedetto, 2018). Par conséquent, la rigidité reste indépendante des déformations et des contraintes.

En élasticité linéaire, la rigidité est représentée par le module d'Young, E , défini comme étant le rapport de la contrainte σ sur la déformation ϵ . En raison de la nature viscoélastique des matériaux bitumineux, une transition vers le domaine complexe est nécessaire pour maintenir une relation réaliste entre la contrainte et la déformation. Le module complexe (E^*) est défini comme le rapport entre la contrainte complexe et la déformation complexe à une température et une fréquence spécifique. Il se compose de deux éléments : la partie réelle (E_1) est considérée comme l'aspect élastique de l'enrobé bitumineux, tandis que la partie imaginaire (E_2) représente son aspect visqueux.

$$E^* = E_1 + jE_2 \quad (1.3)$$

Au Québec, les essais sont réalisés en traction/compression, et la déformation est imposée suivant une loi sinusoïdale de faible amplitude ($\epsilon < 100 \mu\text{def}$). L'essai est considéré comme étant dans le domaine élastique linéaire. Cependant une dépendance du module à la déformation appliquée, ainsi qu'au nombre de cycles effectués est observable (Mangiafico et al., 2018; Nguyen et al., 2019).

Grâce au principe d'équivalence temps-température, il est possible d'obtenir des courbes décrivant le comportement d'un EB à des températures et des fréquences non accessibles lors des essais. On peut ainsi tracer, pour une température donnée, une courbe dite maîtresse de l'EB qui exprime la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence des sollicitations. La Figure 1.6 présente un exemple de transposition menant à la courbe maîtresse.

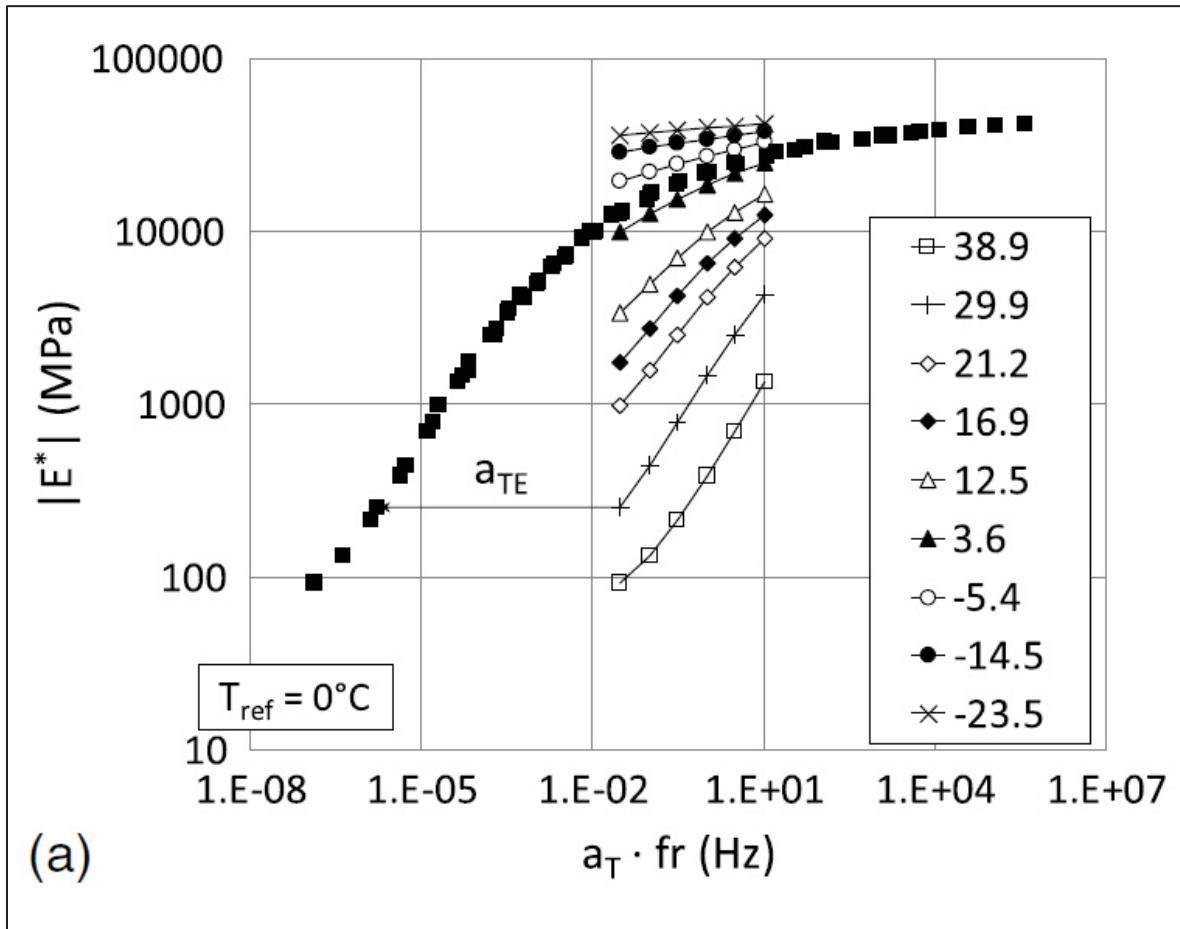


Figure 1.6 Exemple de courbe maîtresse et du principe d'équivalence temps-température
Adaptée de Perraton et al. (2018, p. 4)

L'essai de module complexe a été utilisé avec succès aussi bien sur les EB à chaud (Pham et al., 2015; Di Benedetto et al., 2016; Mangiafico et al., 2018; Perraton et al., 2018; Nguyen et al., 2019; Nguyen et al., 2020) que dans les ERF (Cardone et al., 2015; Diefenderfer, Bowers, Schwartz, Farzaneh, & Zhang, 2016; Li, Lyv, Fan, & Zhang, 2019; Kuchiishi et al., 2019;

Graziani, Raschia, Mignini, Carter, & Perraton, 2020; Raschia et al., 2021a; Raschia et al., 2021b; Nguyen et al., 2023).

Cardone et al. (2015) ainsi que Nguyen et al. (2023) ont testé des ERF de 1 jour après leur compactage à 28 jours de cure, cherchant ainsi à évaluer l'évolution du E^* . Les autres auteurs cités plus haut ont testé des ERF avec une cure plus avancée, de 14 à 28 jours.

Modèle 2S2P1D

Afin de modéliser le comportement viscoélastique des EB et des bitumes dans le cas de petites déformations, le modèle 2S2P1D peut être utilisé, parmi d'autres. Ce modèle rhéologique est une amélioration du modèle Huet-Sayegh (Di Benedetto et al., 2016; Mangiafico et al., 2018; Nguyen et al., 2019; Nguyen et al., 2020). Il se compose de deux ressorts, deux éléments de fluage parabolique et d'un amortisseur, comme illustré à la Figure 1.7.

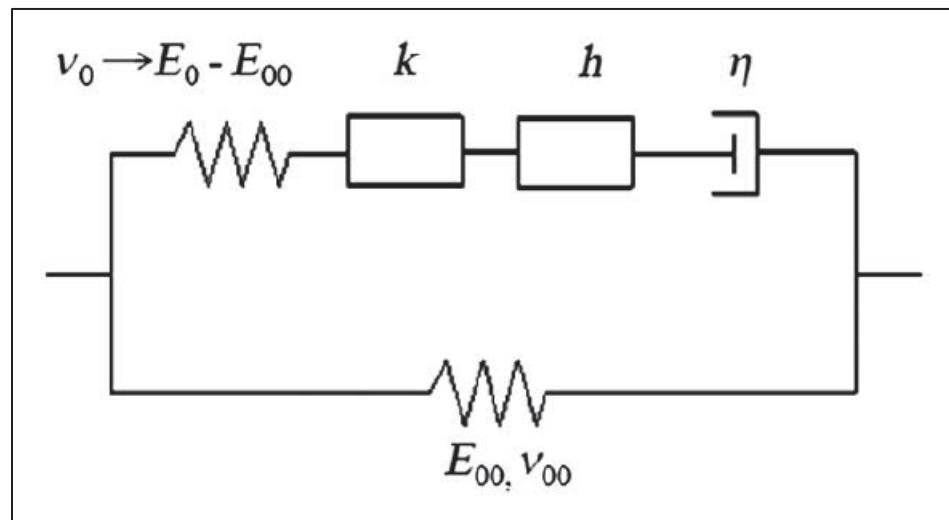


Figure 1.7 Illustration du modèle 2S2P1D
Adaptée de Nguyen et al. (2020, p. 181)

Le module complexe selon le modèle 2S2P1D, à une température fixe, est décrit par l'équation 1.4. Le coefficient de Poisson complexe peut également être modélisé, avec l'équation 1.5.

$$E_{2S2P1D}^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau_E)^{-k} + (j\omega\tau_E)^{-h} + (j\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (1.4)$$

$$\nu_{2S2P1D}^*(\omega) = \nu_{00} + \frac{\nu_0 - \nu_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau_v)^{-k} + (j\omega\tau_v)^{-h} + (j\omega\beta\tau_v)^{-1}} \quad (1.5)$$

Avec $\omega = 2\pi f$ la pulsation (rad.s^{-1}) où f est la fréquence (Hz), k et h des constantes et $0 < k < h < 1$, δ la constante de forme, E_{00} le module statique lorsque ω tend vers 0 (Pa), E_0 le module vitreux lorsque ω tend vers l'infini (Pa), $\eta = (E_0 - E_{00})\beta\tau_E$ la viscosité dynamique de l'amortisseur, β constante liée à η , et τ_E valeur de temps caractéristique. La valeur de temps caractéristique varie avec la température T , $\tau_E(T) = a_T(T) \times \tau_{0E}$ avec a_T le facteur de décalage et $\tau_{0E} = \tau_E(T_R)$ déterminé à la température de référence T_R .

Ainsi, pour modéliser le comportement linéaire viscoélastique d'un EB à une température fixe avec le 2S2P1D, il est nécessaire de connaître les sept constantes (E_0 , E_{00} , k , h , δ , β , τ_E). Si on prend en compte la température, la loi Williams, Landel et Ferry (WLF) avec deux constantes C_1 et C_2 peut être utilisée pour simuler l'évolution du paramètre a_T , et donc τ_E et τ_v , voir équation 1.6 (Pham et al., 2015; Di Benedetto et al., 2016; Mangiafico et al., 2018; Perraton et al., 2018; Nguyen et al., 2019; Nguyen et al., 2020)

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_R)}{C_2 + T - T_R} \quad (1.6)$$

1.3.4 Résistance à la déformation permanente

Au Québec, l'essai de déformation permanente vise à évaluer les déformations induites par le passage d'une roue sur une plaque d'enrobée, de dimension 180 mm * 500 mm et d'épaisseur 50 mm ou 100 mm, obtenue avec un compacteur de plaque LCPC suit la méthode d'essai LC 26-410. L'essai quantifie la déformation de la plaque d'EB à 1 000, 3 000, 5 000 et 30 000 cycles, avec une fréquence de passage de la roue de 1.0 Hz.

Des essais ont été réalisés sur des ERF en jeune âge et pendant la cure (0, 1, 4 et 6 heures; 1, 7 et 13 jours) par Carter et al. (2008) et Guatimosim et al. (2016) (1, 3 et 7 jours de cure). Il apparaît que l'ERF en très jeune âge (i.e. 0 et 1 heure de cure) présente une résistance à la déformation très faible, voire non existante.

1.3.5 Retour sur la notion d'essai en jeune âge

Dans la littérature, différents termes sont utilisés pour qualifier la période après le compactage des ERF et les premières phases de la cure.

Les termes *early-stage* (littéralement, stade préliminaire) et *early curing stage* (littéralement, stade préliminaire de cure) sont utilisés par Cardone et al. (2015), Graziani et al. (2017), Orosa et al. (2023) et Goli et al. (2023) sans définir les termes. Juntao et al. (2015) et Guatimosim et al. (2016) l'associent à leurs essais effectués de 24 h à 120 h après le compactage et à 1 jour après compactage, respectivement.

Le terme *early phase* (littéralement, phase préliminaire / phase initiale) est utilisé par Santagata et al. (2010) et semble désigner le 1^{er} jour de cure.

Le terme *short term* (littéralement, court terme) apparaissent chez Santagata et al. (2010), Orosa et al. (2022b), Orosa et al. (2023). Les premiers le définissent comme étant la cure jusqu'à 2,5 heures, et de 0 à 7 jours de cure pour les derniers.

Les notions de *intermediate curing* (littéralement, cure intermédiaire) et *long term curing* (littéralement, cure à long terme) apparaissent dans ces mêmes références et qualifient la cure après 7 jours.

Le terme *early-age* (littéralement, jeune âge / premier âge) est mentionné par Orosa et al. (2022b), sans être défini. Carter et al. (2008), Feisthauer et al. (2013) et Orosa et al. (2023) semblent associer ce terme aux premiers essais menés à savoir, dès 0 heure, dès 4 heures et dès

6 heures de cure, respectivement. Enfin, Goli et al. (2023) associent ce terme à la cure de 7 à 28 jours.

Ainsi, des termes similaires sont utilisés pour définir des temporalités différentes et des termes différents sont utilisés pour définir des temporalités similaires. Il apparaît également que le choix de la temporalité est lié aux essais réalisés et au temps minimal à observer avant de pouvoir réaliser ces essais. Il ressort cependant que la notion de jeune âge (*early age*) couvre les premières heures de cure, sans précision de la fin de cette période.

1.4 Importance de l'eau et de la cure dans les ERF

Un des aspects particuliers des ERF est leur forte teneur en eau lors de la confection et de la pose. En effet, dans un EBC, le bitume chaud joue le rôle de lubrifiant qui permet un bon malaxage et un bon compactage. Dans les cas des ERF, et bien que l'émulsion soit aqueuse, elle ne permet pas un bon enrobage des GBR par le bitume d'apport. L'eau d'ajout va permettre un meilleur enrobage et va réduire la quantité d'énergie nécessaire lors du compactage, du fait de la lubrification des granulats (Raschia et al., 2020).

Gao, Ni, Charmot, & Luo (2014) ont montré que, pour deux ERF en place avec des granulométries de GBR différentes, une teneur en eau optimale existe afin d'obtenir un meilleur compactage. Cox, Howard, & Battey (2015) abondent aussi dans ce sens et précisent que si l'optimum est dépassé, une partie de l'eau sera évacuée lors du compactage, et pourrait être préjudiciable pour le compactage. Ces essais ont été corroborés par des mesures *in situ* en chantier (Cox, Howard, & Campbell, 2016).

En raison de cette forte teneur en eau après le compactage, une cure est nécessaire afin que le matériau atteigne sa rigidité maximale. Le matériau passe d'un état granulaire, à un matériau plus « cohérent » et attendu d'un enrobé bitumineux. De nombreux travaux traitent de ce sujet, aussi bien dans les ERF en place de type 1 que pour les types 2 et utilisant des émulsions ou des mousses de bitume. Il ressort de la littérature que la disparition de l'eau dans le mélange

entraîne une évolution de la rigidité, et ce, aussi bien avec l'ITS (Godenzoni et al. 2016; Goli et al., 2023; Juntao et al., 2015; Graziani et al., 2017; Graziani et al., 2018; Raschia et al., 2020), le module résilient Mr (Goli et Al, 2023; Orosa et al., 2022b; Orosa et al., 2023) ou encore le module complexe (Cardone et al., 2015; Nguyen et al., 2023). Dans tous les travaux cités, l'évolution de la rigidité est rapide en début de cure puis ralentit avec le temps. En lien avec l'évolution de la rigidité, la résistance à la déformation permanente devient meilleure avec la cure du matériau (Carter et al., 2008; Guatimosim et al., 2016). Il apparaît également que les paramètres de la cure à savoir la température et l'humidité relative, et la présence de ciment vont influencer la montée en rigidité du matériau.

1.4.1 **Effet du ciment**

Le ciment va permettre en jeune âge d'augmenter la rigidité, la résistance à la déformation et de manière générale la cohésion. Cependant, les liens créés par le ciment sont fragiles, comparativement à ceux créés par le bitume qui sont ductiles (Fu et al., 2010). Plus la quantité de ciment est élevée, plus grande sera la rigidité et la résistance à la déformation (Fu et al., 2010; Godenzoni et al., 2016; Ferjani, Carter, Vaillancourt, Dardeau, & Gandi, 2019).

Il apparaît également que pour des quantités de ciment faibles, la montée en cohésion n'est liée qu'au départ de l'eau et à la rupture de l'émulsion, mais que pour des valeurs supérieures à 2 %, et des conditions de cure permettant l'hydratation du ciment, cette dernière est prépondérante dans la montée en cohésion de l'ERF (Godenzoni et al., 2016; Graziani et al., 2017).

L'hydratation du ciment est un phénomène exothermique et la prise des matériaux cimentaire peut être évaluée en analysant les changements de température (Soliman, Khayat, Karray, & Omran, 2015; Baranyi, Kopecskó, & Csetényi, 2024). Dans les ERF de type 1 traités à l'émulsion de bitume, la quantité de ciment est faible (entre 0,5 et 1,5 % de la masse de GBR) et le rapport global eau/ciment est élevé.

1.4.2 Effet de la température

Godenzoni et al. (2016) ont étudié des ERF de compositions similaires à des températures de cure de 25 et 40 °C avec une humidité de 70 %. Il apparaît que la condition de cure influence les valeurs de l'ITS lors des premiers jours de la cure, mais qu'après 30 jours, les 2 spécimens atteignent la même valeur de module. Goli et al. (2023) ont testé des ERF en place avec 1 % de ciment, avec trois températures de cures (25, 40 et 60 °C). Il apparaît que les valeurs de l'ITS pour la cure à 40 °C sont supérieures que celle à 25 °C après 7 jours de cure. Dans le même ordre d'idée, le module résilient, M_r , est plus élevé lorsque la température de cure augmente. Nguyen et al. (2023) ont évalué l'influence de trois températures de cure (25, 40 et 60 °C) sur les valeurs de module dynamique E^* d'ERF en place traités à l'émulsion de bitume avec 1,5 % de ciment. Il apparaît que les valeurs de $|E^*|$ augmentent avec la température de cure, notamment entre 25 °C et 40 °C. La différence n'est cependant pas significative entre la cure à 40 °C et celle à 60 °C.

Goli et al. (2023) avancent que les hautes températures permettraient une meilleure activation du bitume présente dans le GBR, et donc une meilleure rigidité. Jiang et al. (2023) ont évalué l'influence de la température de cure sur la migration de l'eau au sein d'ERF en place traités à l'émulsion de bitume et 2,2 % de ciment à l'aide de tomodensitométrie (CT-Scan). Les particules d'eau ont été définies par leur épaisseur plutôt que par leur diamètre, et celle-ci varie majoritairement de 0,2 à 0,4 mm. Il ressort de cette étude qu'une température de cure plus élevée permet une migration plus rapide de l'eau, mais qu'une température plus basse permettrait une accumulation de l'eau sur les côtés et donc plus d'évaporation par les côtés qu'à l'intérieur.

1.4.3 Effet de l'humidité

Dans leur étude, Goli et al. (2023) ont montré que pour une même température de cure, une humidité relative plus élevée entraîne une baisse des valeurs d'ITS et une teneur en eau résiduelle plus élevée. Cela corrobore les éléments avancés dans Godenzoni et al. (2016) qui

estime que la teneur en eau contrôle le niveau de cure et donc l'évolution des paramètres mécaniques.

Il apparaît donc que les paramètres de la cure sont des éléments cruciaux à surveiller, surtout lors de la pose d'ERF sur place en chantier.

1.4.4 Modèle Michaelis-Menten

La cure étant importante dans les ERF, il est intéressant de modéliser l'évolution des paramètres. Graziani et al. (2017, 2018) ont utilisé le modèle Michaelis-Menten (MM) dans leurs travaux sur des ERF. L'équation 1.7 présente le modèle, dans le cas où le paramètre étudié dépend du temps t .

$$Y(t) = \frac{B \cdot t}{C + t} \quad (1.7)$$

Avec B la valeur asymptotique atteinte par le paramètre Y (unité homogène à $Y(t)$) et C , la constante de Michaelis, qui est le temps pour lequel $Y(t) = \frac{B}{2}$.

Graziani et al. (2017, 2018) ont modélisé l'évolution de l'ITS et la disparition de l'eau avec le temps de cure dans leurs spécimens. Il apparaît que ce modèle est pertinent afin de modéliser ces deux paramètres. De plus, si deux paramètres dépendants de la même variable sont modélisables par le modèle MM, alors l'expression d'un des paramètres avec comme variable l'autre paramètre est également modélisable par le modèle MM. La dérivée seconde de l'équation ainsi obtenue permet d'obtenir la courbure, et donc de déterminer l'influence des paramètres.

Il apparaît cependant qu'avec le modèle MM tel que décrit plus haut, la prédiction commence forcément à 0 pour $t=0$. Dans le cas d'un paramètre mécanique, cela n'est pas forcément réaliste, même dans le cas de l'étude des ERF en très jeune âge.

1.5 Méthodes de caractérisation basées sur les ondes mécaniques

Cette section présente des généralités sur les ondes mécaniques ainsi que les méthodes d'essais faisant usage de celles-ci afin de caractériser les matériaux bitumeux.

1.5.1 Les ondes mécaniques

Une onde mécanique est le phénomène de propagation d'une perturbation locale dans un milieu matériel. Une onde est caractérisée par son amplitude A , sa période T et sa vitesse de propagation c . Les ondes peuvent se propager dans une ou plusieurs dimensions, on parle donc d'ondes linéaires, planes et sphériques (St-Amand, 2008). On distingue généralement les ondes de corps et les ondes de surface.

1.5.1.1 Onde de corps

Par définition, une onde de corps est une onde qui se propage au sein d'un même milieu. Il est possible de définir une onde en fonction de v , la vitesse de déplacement local de la matière du milieu étudié, et c , la vitesse de propagation de l'onde (Kramer, 1996; Ethier, 2009). Si c et v sont parallèles, l'onde observée est dite longitudinale ou de compression et on la note onde P . Le déplacement de matière s'effectue dans le même sens que celui de la propagation de l'onde.

Si c et v sont orthogonaux, l'onde observée est dite transversale ou de cisaillement et on la note onde S . Le déplacement de matière s'effectue dans une direction perpendiculaire à celle de la propagation de l'onde. La Figure 1.8 illustre le comportement de ces deux ondes.

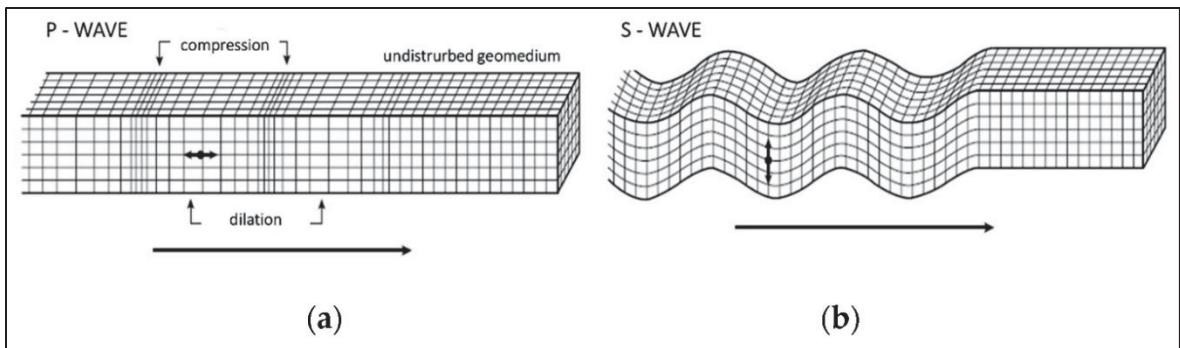


Figure 1.8 Comportement des ondes de compression (a) et de cisaillement (b)
Adaptée de Bačić, Librić, Kaćunić, & Kovačević (2020, p. 3)

Les ondes P se déplacent plus rapidement que les ondes S au sein d'un même milieu. Il est important de mentionner que les ondes S ne se propagent pas dans les milieux liquides (Kramer, 1996).

Les ondes de cisaillement peuvent être polarisées (Kramer, 1996). Cela signifie que la déformation du milieu peut ne se produire dans que dans une direction. Si le milieu est traversé par une onde S horizontale (S-H) ou une onde S verticale (S-V), il subira une déformation dans le plan horizontal ou vertical, respectivement. La Figure 1.8 B illustre une onde S-V.

Si certaines conditions sont rassemblées, principalement géométriques, une onde P peut devenir une onde S et vice versa. Ce phénomène s'appelle la conversion de mode. (Ethier, 2009; Kramer, 1996)

Les vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement sont généralement notées V_p et V_s , respectivement. Dans le domaine élastique linéaire, il est possible de lier V_p (m.s^{-1}) ainsi que V_s (m.s^{-1}) aux modules d'Young E (Pa) et au module de cisaillement G (Pa). Ces équations, 1.8 et 1.9, font intervenir la masse volumique ρ (kg.m^{-3}) et le coefficient de Poisson ν (Kramer, 1996; Ethier, 2009; Jiang, Ponniah, Cascante, & Haas, 2011).

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.8)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (1.9)$$

Les enrobés bitumineux présentant une composante visqueuse, l'utilisation du module complexe est nécessaire. La prise en compte du déphasage ϕ (rad) entre la contrainte appliquée et la déformation relevée est nécessaire (Mounier, Di Benedetto, & Sauzéat, 2012). On obtient :

$$V_s = \frac{1}{\cos \frac{\phi}{2}} \sqrt{\frac{|E^*|}{2\rho(1+\nu)}} \quad (1.10)$$

$$V_p = \frac{1}{\cos \frac{\phi}{2}} \sqrt{\frac{|E^*(1-\nu)|}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (1.11)$$

1.5.1.2 Onde de surface

Une onde de surface est une onde qui se propage à l'interface entre deux milieux (sol/air, par exemple). On distingue généralement deux types d'ondes de surface, les ondes de Rayleigh et les ondes de Love (Kramer, 1996). Les ondes de Rayleigh provoquent à la fois un déplacement longitudinal et transversal dans le milieu où elles se propagent (voir Figure 1.9). Ce mouvement peut être illustré par un déplacement des particules dans le sens antihoraire lorsque l'onde se déplace de gauche à droite. L'amplitude de la déformation diminue à mesure qu'on s'éloigne de la surface.

Les ondes de Love sont engendrées par l'interaction de multiples ondes S-H (Figure 1.9). Ce phénomène induit un mouvement des particules du milieu similaire à celui observé dans un milieu traversé par une onde S-H, avec une diminution de l'amplitude des déformations à mesure qu'on s'éloigne de la surface (Kramer, 1996; Ethier, 2009).

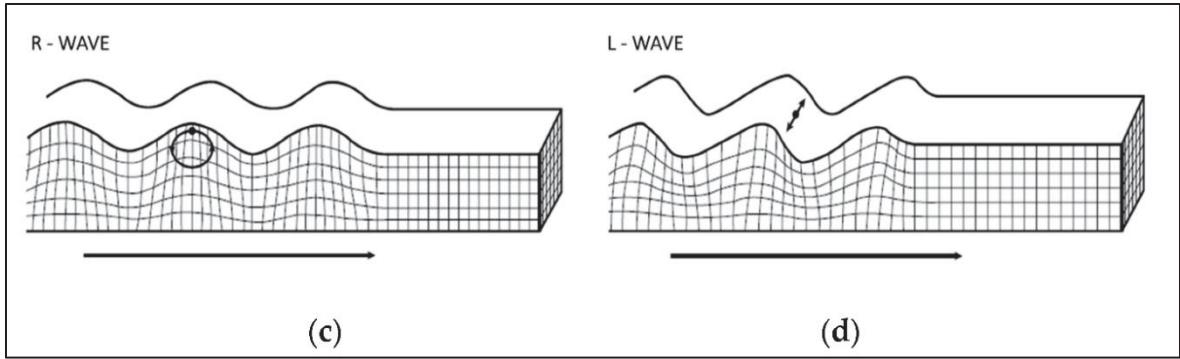


Figure 1.9 Comportement des ondes de Rayleigh (c) et de Love (d)
Adaptée de Bačić et al. (2020, p. 3)

1.5.1.3 Dispersion et vitesse des ondes

Le paramètre généralement associé aux ondes présentées aux sections précédentes est la vitesse de l'onde $V_{\text{type d'onde}}$. Les ondes se propagent dans un milieu, et celui-ci peut en influencer leurs vitesses. En effet, un milieu dispersif est un milieu dans lequel les ondes de fréquences différentes vont se déplacer à des vitesses différentes (Kramer, 1996). À l'inverse, dans un milieu non dispersif, la vitesse des ondes est indépendante de leur fréquence.

Une même onde peut posséder deux vitesses de propagation. La vitesse de phase correspond au déplacement en fonction du temps de points caractéristiques du signal tels qu'un pic ou un creux. Un groupe d'ondes peut également être généré et posséder la même fréquence. Ce groupe d'ondes est considéré comme un ensemble et se déplace selon sa vitesse, qu'on appelle de groupe (Kramer, 1996; Ethier, 2009). Il est possible de relier la vitesse de groupe à la vitesse de phase par l'équation 1.12 (Kramer, 1996) :

$$V_{gr} = V_{ph} + k \frac{dV_{ph}}{dk} \quad (1.12)$$

Où V_{gr} est la vitesse de groupe (m.s^{-1}), V_{ph} la vitesse de phase (m.s^{-1}), k le nombre d'onde défini par : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ avec λ (m) la longueur d'onde.

1.5.2 Méthode temporelle

L'une des méthodes la plus simple, et la plus intuitive dans le cas d'utilisation des ondes, est la détermination de la vitesse de l'onde, via le calcul du temps de vol. En plaçant un émetteur et un récepteur de part et d'autre d'un spécimen, il est possible d'émettre et de recevoir une onde. Selon le type d'émetteur, l'onde peut être de compression ou de cisaillement. Connaissant la longueur du spécimen et en mesurant le temps nécessaire à l'apparition de la première variation du signal dans le récepteur, on peut déterminer la célérité de l'onde. Des essais sur les EBC ont été réalisés avec des ondes P (Nazarian, Tandon, & Yuan, 2005; Di Benedetto et al., 2009; Mounier et al., 2012; Abd Elhafeez, Amer, Saad, El Kady, & Madi, 2014; Larcher, Takarli, Angelier, Petit, & Sebbah, 2015; Mounier, Di Benedetto, Sauzéat, & Bilodeau, 2016; Zargar, Banerjee, Bullen, & Ayers, 2019; Hou, Deng, Jin, Shi, & Luo, 2022) et des ondes S (Mounier et al., 2012; Larcher et al., 2013; Abd Elhafeez et al., 2014; Hou et al., 2022).

Mounier et al. (2012) ont observé des différences dans les valeurs de module obtenues par UPV comparativement au modèle 2S2P1D de 5 à 30 %, et de l'ordre de 12 % pour Larcher et al. (2013). Il apparaît que la difficulté de bien déterminer le temps d'arrivée de l'onde est en cause (Larcher et al., 2013).

Nazarian et al. (2005) ont mis en évidence une baisse du module calculé avec V_p lorsque la teneur en vide augmente. Zargar et al. (2019) ont utilisé l'UPV pour évaluer la répartition des vides au sein d'un spécimen d'EBC cylindrique. Les valeurs de V_p obtenues diminuent avec l'augmentation de la teneur en vide. Dans le même ordre d'idées, Hou et al. (2022) ont mis en relation V_p et V_s en fonction de la masse volumique et la teneur en vide des spécimens testés. Il apparaît que V_p et V_s augmentent lorsque la masse volumique augmente, et que la teneur en vide diminue.

D'autres approches existent pour déterminer le temps de vol de l'onde, comme la mesure pic à pic, ou l'utilisation de points caractéristiques de l'onde (Larcher et al. 2015). Il est cependant

difficile de pouvoir affirmer à quel pic de la réponse correspond à tel ou tel pic du signal émis (Arulnathan, Boulanger, & Riemer, 1998; Brandenberg, Kutter, & Wilson, 2008), ce qui génère de l'inexactitude dans la mesure. Dans le cas des ondes de cisaillements, des difficultés s'ajoutent, notamment dues aux effets de champ proche à basse fréquence et à l'apparition de bruit dans le signal pour de hautes fréquences (Karray, Ben Romdham, Hussien, & Ethier, 2015).

Les méthodes temporelles permettent donc de donner une première estimation de la vitesse de l'onde, dans le cas des ondes P (Hou et al., 2022). Dans l'étude des sols, l'usage de l'onde de cisaillement est préféré (Dyvik & Madshus, 1985; Kramer, 1996). En effet, du fait de la saturation des sols, l'usage des ondes de compression fournit peu d'information sur le matériau testé, celles-ci se propageant dans l'eau et donc V_p demeure aux alentours de 1500 m.s^{-1} et ne donne aucune information sur le matériau testé (Richart, Hall, & Woods, 1970; Blake & Gilbert, 1997). Ainsi, du fait de la présence importante d'eau dans les ERF en très jeune âge, les ondes S semblent plus adaptées.

1.5.3 Méthodes fréquentielles

Tout comme les méthodes temporelles, les méthodes fréquentielles se basent sur l'émission et la réception d'ondes. Cependant, les méthodes fréquentielles font appel à des décompositions de l'onde en harmoniques. De celle-ci peuvent être obtenues des données telles que l'amplitude, la fréquence de résonance, la phase du signal et donc le décalage de phase entre deux signaux (Ethier, 2009).

1.5.3.1 Méthode de résonance d'impact (Impact Resonance Method)

Par définition, la résonance est un phénomène selon lequel certains systèmes physiques sont sensibles à certaines fréquences. Un système qui résonne va accumuler de l'énergie si celle-ci est appliquée sous forme périodique et proche d'une fréquence dite de résonance notée f_r . Dans ce cas, le système va être le siège d'oscillations de plus en plus importantes pouvant amener la rupture du système (Pérez, 2001).

Initialement utilisée dans les bétons (Whimoyer & Kim, 1994; ASTM C215), la méthode de résonance d'impact (IR) consiste à induire une perturbation sur l'une des surfaces de l'échantillon, puis à mesurer le signal résultant de l'autre côté. Cette perturbation est provoquée par l'impact entre une bille rigide ou un marteau et l'échantillon, comme illustré dans la Figure 1.10. L'impact se produit sur l'une des bases du cylindre de façon perpendiculaire à la surface. Ce choc engendre une onde qui est captée par un transducteur piézoélectrique ou un accéléromètre. L'objectif est de déterminer la fréquence de résonance, f_r , de l'EB testé. Pour cela, on effectue une décomposition en séries de Fourier sur le signal obtenu. En utilisant cette fréquence de résonance, et en prenant en compte la longueur d'onde ainsi que les coefficients correcteurs préalablement calculés à partir du coefficient d'amortissement et d'un modèle de dispersion de l'onde en lien avec la géométrie de l'échantillon, il est possible de déterminer le module complexe de l'échantillon (Mounier et al., 2012; Gudmarsson et al., 2014; Tavassoti-Kheiry, Boz, Solaimanian, & Qiu, 2018).

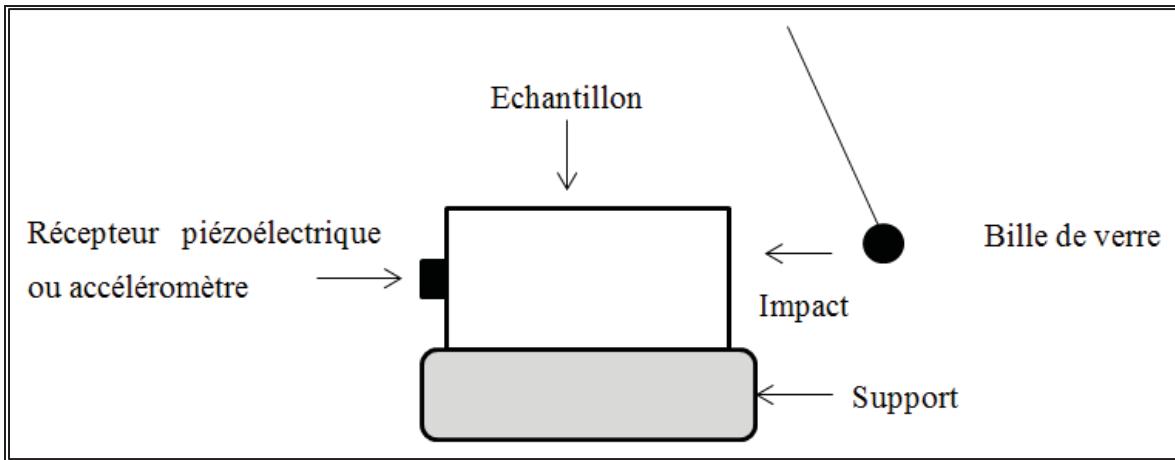


Figure 1.10 Schéma de principe de l'essai d'impact de résonance, dans le cas d'une excitation longitudinale

Différentes configurations de récepteur / lieu d'impact permettent d'exciter le spécimen dans différents modes et donnent accès à différents modules (E ou G). Le cas présenté dans la Figure 1.10 est une excitation longitudinale, il existe aussi les modes en flexion et en torsion. Les deux premiers donnent accès au module E, le troisième au module G (ASTM C215; Carret, Di Benedetto, & Sauzéat, 2018a). Les valeurs de modules obtenues par l'IR sont globalement

proches de celles obtenues avec l'essai de module complexe E*, avec une légère différence pour les hautes températures/basses fréquences, ou un écart apparaît (Mounier et al., 2012; Kim & Kim, 2017, Carret et al., 2018a).

Carret, Di Benedetto, & Sauzéat (2018a, 2018b, 2020) proposent une amélioration de cette méthode. En effet, en réalisant l'essai IR à des températures différentes et en modélisant numériquement la réponse fréquentielle de l'EBC testé, il est possible d'obtenir des résultats similaires à ceux obtenus avec l'essai de module complexe E*. De légères différences dans les valeurs apparaissent, mais elles sont certainement dues à la différence entre la déformation engendrée par les deux essais (Carret et al., 2018b; Carret et al., 2020). Les essais ont été réalisés en mode longitudinale, en flexion et en torsion. Il apparaît cependant que la seule variation de la température ne permet pas d'adéquatement couvrir toute la courbe maîtresse (Kim & Kim, 2017; Carret et al., 2018a). Globalement, les résultats obtenus sont cohérents quant au comportement des EB, à savoir une baisse de la valeur du module avec l'augmentation de la température de l'essai.

L'essai a été réalisé sur des ERF (Orosa et al. 2022a), avec des spécimens qui ont subi une cure à 50°C pendant 3 jours. Les ERF en très jeune âge sont assimilables à des matériaux granulaires (voir 1.2.3), ainsi il est possible que l'essai IR ne soit pas adapté pour caractériser les ERF en très jeune âge.

1.5.3.2 Colonne de résonance

La colonne de résonance (CR) est un test de laboratoire utilisé pour évaluer le module de cisaillement élastique ainsi que la propriété d'amortissement des sols (Tavassoti-Kheiry, Solaimanian, & Qiu, 2014). Dans cet essai, un échantillon cylindrique est fixé par ses deux extrémités. La partie supérieure est excitée en torsion ou en vibration longitudinale, tandis que celle inférieure mesure la réponse du spécimen testé. En augmentant progressivement la fréquence de vibration de la partie haute, on amène le spécimen à sa résonance. En connaissant la géométrie de l'échantillon, on peut déterminer la vitesse de propagation des ondes de

cisaillement, et donc le module de cisaillement. C'est un essai non destructif, qui suit la norme ASTM D4015. L'essai requiert un appareillage complexe et une certaine expérience afin d'analyser les résultats (Ethier, 2009).

Des essais de CR sur des EBC ont été réalisés par Tavassoti-Kheiry, Solaimanian, & Qiu (2014, 2016), Tavassoti-Kheiry et al. (2018) et Karcasu, Okur, & Er (2015). Il ressort de ces études que la colonne de résonance serait adaptée pour déterminer le module de cisaillement des EBC (Tavassoti-Kheiry et al., 2014 ; Karacasu et al., 2015), bien que des modifications doivent être apportées à l'appareil de CR afin de s'adapter à la rigidité supérieure des EBC vis-à-vis des sols. L'impact des composants du mélange sur la valeur du module peut être évalué (Tavassoti-Kheiry et al., 2016) et les résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus par l'essai de module complexe. Les résultats sont cohérents avec le comportement attendu d'un EBC, à savoir que le module diminue avec l'augmentation de la température (Tavassoti-Kheiry et al., 2016). De plus, il apparaît que la colonne de résonance est bien un essai non destructif, comme le prouve Tavassoti-Kheiry et al. (2018), en montrant que le module obtenu par IR est similaire avant et après l'essai à la colonne de résonance, et ce pour différents EBC.

1.5.3.3 Méthodes basées sur les ondes de surface

La méthode d'analyse spectrale d'ondes de surface, qui apparaît sous son nom anglais *Spectral Analysis of Surface Wave* (SASW) dans la littérature, se base sur le principe de dispersion d'ondes de Rayleigh dans un système multicouche (Karray & Lefebvre, 2009). Les ondes sont recueillies à l'aide de deux transducteurs. Une courbe dite de dispersion est obtenue par l'analyse fréquentielle (décomposition par série de Fourier) de ces ondes. En imposant des paramètres (hauteur, coefficient de Poisson, densité et vitesse de propagation des ondes de cisaillement) fixes aux couches, on peut obtenir par calcul une courbe théorique. Par itération, les paramètres des couches sont modifiés jusqu'à l'obtention d'un même résultat pour la théorie et la pratique. La méthode ne présente pas de solution unique et ne considère que le mode fondamental des ondes de Rayleigh (Karray & Lefebvre, 2009; Barnes & Trottier, 2010; Bačić et al., 2020).

Une évolution de cette méthode, l'analyse multicanal d'ondes de surface (MASW), existe. Cette méthode repose sur le même principe que le SASW, mais utilise plus de transducteurs et donc plus de signaux ce qui permet l'obtention d'une solution unique (Barnes et Trottier, 2010; Bačić et al., 2020). Les méthodes SASW et MASW donnent accès à la vitesse de l'onde cisaillement V_s , du milieu testé. Ces méthodes ont été utilisées pour caractériser des EBC (Nazarian et al., 2005; Barnes & Trottier, 2010).

Enfin, l'analyse modale des ondes de surface (MMASW), propose d'analyser un ou plusieurs modes supérieurs des ondes de Rayleigh. Il en résulte une meilleure optimisation de la solution du rétrocalcul et du profil de vitesse de l'onde de cisaillement (Karray & Lefebvre, 2009; Karray, Lefebvre, Ethier, & Bigras, 2010). Le MMASW est utilisé pour caractériser les sols ou les fondations sous des ouvrages.

1.5.3.4 Corrélation croisée

Bien utilisé en géotechnique, la méthode de corrélation croisée (*cross correlation* dans la littérature anglophone) permet de déterminer la vitesse de l'onde de cisaillement en comparant deux signaux émis à la même fréquence et en obtenant le déphasage entre ces deux signaux. La vitesse est obtenue grâce à l'équation 1.13 (Ethier, 2009; Karray et al., 2015) :

$$V_s = \frac{2\pi f d}{\Phi(f)} \quad (1.13)$$

Avec $\Phi(f)$ le décalage de phase entre les 2 signaux (rad), d la taille de l'échantillon et f la fréquence.

Généralement, des bilames piézoélectriques sont utilisés afin de générer et recevoir les ondes. Dans cette configuration, l'essai est intrusif. Une adaptation de cette méthode dans les EBC est utilisée par Larcher et al. (2015). Dans cette étude, on compare la différence entre les signaux parcourant deux échantillons d'EBC de longueurs différentes. La vitesse de phase de l'onde de compression est ainsi obtenue.

1.6 La technique d'actuateur d'anneaux piézoélectriques (P-RAT)

Cette section va présenter la méthode P-RAT ainsi que les motivations derrière le choix du matériau piézoélectrique qui compose les transducteurs. Finalement, les applications du P-RAT dans divers matériaux seront présentées.

1.6.1 Le matériau piézoélectrique

Un matériau piézoélectrique possède la propriété de se polariser électriquement lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique (APC International, 2002). Inversement, s'il est placé dans un champ électrique, il subira une contrainte qui mène à une déformation.

Lorsqu'un élément piézoélectrique reçoit une impulsion électrique et s'il est en contact avec un matériau, une onde mécanique (propagation d'une déformation dans un milieu) va se propager au sein du matériau. Si on place un autre élément piézoélectrique en contact avec ce matériau, il recevra l'onde mécanique qui induira une déformation et donc générera une tension électrique. Ainsi, les éléments piézoélectriques peuvent être utilisés par pairs afin de déterminer la vitesse de propagation des ondes au sein d'un matériau.

1.6.2 Utilisation d'éléments piézoélectriques

Dans le domaine géotechnique, les éléments piézoélectriques sont couramment utilisés afin d'éviter d'avoir à inciser les échantillons testés pour y insérer un transducteur (Dyvik & Madshus, 1985; Ethier, 2009). La mesure effectuée est donc moins intrusive.

La géométrie de l'élément piézoélectrique utilisé (plaques, cylindres, anneaux ...) et la manière dont il est utilisé vont conditionner le type d'onde générée. Les ondes P se déplaçant plus vite que les ondes S, il pourrait paraître aisément d'isoler les ondes S dans le cas où les deux types d'ondes seraient générés. Cependant, le phénomène de conversion d'ondes (section 1.5.1) risquerait de compliquer cette démarche. Utiliser, et donc concevoir, des transducteurs générant le type d'onde souhaité facilite grandement l'interprétation des résultats.

En raison du coefficient de Poisson, et même si on utilise un élément piézoélectrique censé ne générer que des ondes de cisaillement, une onde de compression sera certainement générée. Par exemple, si on comprime radialement un cylindre plein afin de générer une onde de cisaillement, il y aura aussi une élongation de sa hauteur. Ce déplacement de matière va entraîner la création d'une onde P, si le cylindre est en contact avec un quelconque matériau. Afin de générer une onde purement de cisaillement, il est nécessaire d'empêcher le contact direct entre l'élément piézoélectrique et le spécimen testé. L'utilisation d'anneaux piézoélectriques semble tout indiquée dans ce cas. En effet, il est facilement possible d'insérer un élément qui fera le lien entre l'élément piézoélectrique et le spécimen, ne transmettant que l'onde de cisaillement. La Figure 1.11 présente un schéma de principe de cela.

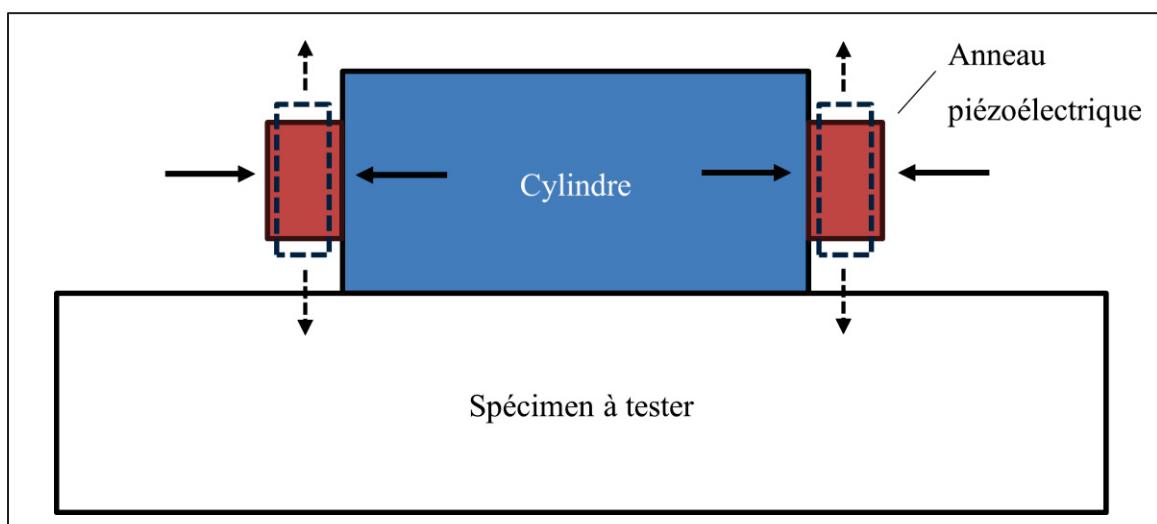


Figure 1.11 Schéma de principe de l'effet de Poisson dans le cas d'un anneau piézoélectrique

En insérant un cylindre dans l'anneau piézoélectrique, on arrive à ce résultat (Ethier, 2009; Karray et al., 2015). Cela permet également d'augmenter la distance entre les deux éléments piézoélectriques, réduisant encore plus l'influence des autres ondes.

1.6.3 Le P-RAT (Ethier, 2009; Karray et al., 2015)

Théoriquement, un matériau (sol, béton, matériau bitumineux, etc.) peut être considéré comme un système dynamique, c'est-à-dire que son état évolue avec le temps et pourrait être modélisé par des équations. On peut donc, associer une fonction de transfert à ce système.

Une fonction de transfert est une façon mathématique d'exprimer la réponse d'un système en fonction d'une excitation d'entrée. Soit Y la réponse et X l'excitation d'entrée, la fonction de transfert H correspond à : $H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$. Avec j l'unité imaginaire et ω la pulsation (rad.s^{-1}).

Deux paramètres sont associés à une fonction de transfert : son amplitude $A(\omega)$ et sa phase $\Phi(\omega)$.

On souhaite analyser la fonction de transfert de l'échantillon testé. Afin d'émettre et de recevoir le signal le traversant, il faut utiliser des transducteurs tels que ceux décrits dans la partie 1.6.2. On se retrouve donc avec deux fonctions de transfert distinctes. La première correspond à ce que les transducteurs reçoivent et envoient, c'est-à-dire le signal généré en amont et reçu par le transducteur émetteur et ce qui est envoyé par le transducteur récepteur. La seconde correspond à ce qui traverse l'échantillon, c'est-à-dire ce que le transducteur émetteur transmet dans l'échantillon et ce qui est reçu par le récepteur après avoir traversé l'échantillon.

En considérant que les interactions émetteur/échantillon et échantillon/récepteur n'induisent aucun décalage de phase, on peut obtenir la fonction de transfert de l'échantillon testé en analysant celle des deux transducteurs.

Dans le cas présent, l'ensemble [Cylindre, Anneau piézoélectrique et Époxy] est considéré comme un système de masse ressort amorti. C'est un système à un degré de liberté, sa fonction de transfert est du second ordre et l'expression de la phase du système est la suivante:

$$\Phi_t = - \arctan \frac{2 \cdot \zeta \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad (1.14)$$

Avec Φ_t la phase produite par le transducteur émetteur ou récepteur (rad), ζ est le coefficient d'amortissement du système, ω la pulsation (rad.s^{-1}) et ω_0 la pulsation propre du système (rad.s^{-1}).

Ainsi, si on se base sur la méthode de corrélation croisée, et pouvant calculer la différence de phase entre le transducteur émetteur et le récepteur, on peut déterminer la vitesse de l'onde de cisaillement qui traverse l'échantillon testé. La corrélation croisée donne cependant une vitesse de phase de l'onde. En effet, la vitesse de phase V_{ph} varie en fonction de la fréquence et donc diffère de la vitesse intrinsèque de l'onde de cisaillement traversant l'échantillon.

Pour un ensemble émetteur/récepteur parfait, il ne devrait pas avoir de déphasage et donc la vitesse de phase ne devrait pas varier avec la fréquence. On aurait donc $V_s = V_{ph}(f)$. Or, les transducteurs induisent leur propre décalage de phase. Toutefois, si on mesure ce décalage, il est possible d'apporter une correction à la vitesse de phase.

Comme indiqué précédemment, une analyse par la méthode de corrélation croisée donnerait une valeur de la vitesse qui correspondrait à la vitesse de phase. Il est possible de décomposer le décalage de phase mesuré en deux entités, à savoir un décalage de phase correspondant au matériau testé et un correspondant aux transducteurs. On a:

$$V_{ph} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{\Phi_{exp}(f)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{\Phi_{th}(f) + \Phi_{corr}(f)} \quad (1.15)$$

Et:

$$V_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{\Phi_{th}(f)} \quad (1.16)$$

Avec f la fréquence, d la taille de l'échantillon, $\Phi_{exp}(f)$ le décalage de phase obtenu par corrélation croisée entre les signaux émis et reçus, $\Phi_{th}(f)$ le décalage de phase corrigé et $\Phi_{corr}(f)$ le décalage de phase induit par les deux transducteurs.

En combinant les équations 1.15 et 1.16 on obtient :

$$\frac{2\pi d}{V_s} + \frac{\Phi_{corr}(f)}{f} = \frac{\Phi_{exp}(f)}{f} \quad (1.17)$$

Ainsi, pour toutes les fréquences f_1, f_2 , etc., on peut obtenir une équation. Si on considère que le rapport d/V_s est constant, en soustrayant deux de ces équations pour 2 f_i distincts, on obtient une nouvelle équation qui relie $\Phi_{corr}(f)$ et $\Phi_{exp}(f)$ en fonction de la fréquence :

$$\Phi_{corr}(f_2) = \Phi_{exp}(f_2) - \frac{f_2}{f_1} (\Phi_{exp}(f_2) - \Phi_{corr}(f_1)) \quad (1.18)$$

Ainsi la connaissance de $\Phi_{corr}(f_1)$ permet de déterminer $\Phi_{corr}(f_2)$. Par récurrence, on obtient pour toutes les fréquences :

$$\Phi_{corr}(f_{n+1}) = \Phi_{exp}(f_{n+1}) - \frac{f_{n+1}}{f_n} (\Phi_{exp}(f_n) - \Phi_{corr}(f_n)) \quad (1.19)$$

Il est donc possible d'accéder à $\Phi_{corr}(f)$ en ne connaissant qu'un seul point fiable de cette fonction. Connaissant Φ_{corr} et Φ_{exp} , il est possible de déterminer Φ_{th} et donc V_s .

Dans la pratique, c'est aux abords de la fréquence de résonance du signal qu'on obtient une vitesse de phase constante. C'est donc à ce moment qu'on a $V_s = V_{ph}(f)$ (Karray, 2015; Ethier, 2009). Cette méthode permet donc de tenir compte du décalage de phase inhérent à un système dynamique.

1.6.4 Usage du P-RAT et du paramètre V_s

Le P-RAT a été utilisé dans les sols (Ethier, 2009, Karray et al., 2015; Elbeggo, Hussien, Ethier, & Karray, 2019; Elbeggo, Ethier, Dubé, & Karray, 2022; ; Elbeggo, Ethier, Karray, & Dubé, 2023), dans les bétons (Soliman et al., 2015; Naji, Khayat, & Karray, 2017a; Naji, Karray, & Khayat, 2017b; Naji, Karray, & Khayat, 2018) et dans les ERF (Lecuru, 2015). Ces essais ont mis en avant l'utilisation pertinente de V_s comme paramètre physique intrinsèque. Il apparaît que la mesure de V_s via le P-RAT est robuste, car très peu impactée par le changement d'utilisateur, les transducteurs utilisés ainsi que les paramètres de l'onde (Elbeggo et al., 2019). De plus, les résultats de V_s obtenus avec le P-RAT en laboratoire sur des argiles ont permis de prédire avec succès le comportement sur le terrain de ces mêmes argiles testées avec le MMASW (Elbeggo et al., 2022).

Dans l'étude des mortiers et pâtes de ciment en jeune âge, Soliman et al. (2015) ont mis en avant l'impossibilité de mesurer V_s pendant les deux premières heures. Il a été avancé que l'absence d'un squelette granulaire continu empêchait la transmission de l'onde de cisaillement. Naji et al., (2017b) avancent que les ondes S sont grandement atténuées en traversant le mortier de ciment frais, et que le début de la phase de cimentation est nécessaire pour créer du lien entre les particules et permettre la transmission des ondes S. De plus, V_s a permis de déterminer les temps de prise du mortier de ciment. Dans d'autres études, V_s a servi pour évaluer la ségrégation des granulats dans le béton. Une bonne corrélation entre V_s obtenue avec le P-RAT et la ségrégation visuelle a été observée, et celle-ci donne de meilleurs résultats qu'avec V_p obtenue via l'UPV, du fait de la meilleure précision de mesure du P-RAT (Naji et al., 2017a). Il ressort également que le P-RAT est adapté à la mesure du module de cisaillement dans les matériaux cimentaires / béton (Soliman et al., 2015; Naji et al., 2017a; Naji et al., 2017b). De plus, Naji et al. (2018) ont mis en avant que la taille des granulats dans le béton peut impacter la mesure de V_s . En effet, un transducteur P-RAT de taille plus grande aura une fréquence plus faible, donc une longueur d'onde plus grande. De ce fait, les gros granulats vont être responsables de moins de réflexion d'ondes et donc les signaux seront meilleurs. La qualité du signal influence la facilité et la précision de l'analyse.

Enfin, dans le cas des ERF (Lecuru, 2015), le P-RAT a permis de caractériser le comportement en jeune âge (deux heures après compactage) et son évolution pendant la cure du matériau. Des transducteurs de taille différente ont été utilisés et il apparait que la qualité du contact entre les transducteurs et le spécimen testé influence grandement la transmission des ondes et donc l'interprétation des résultats.

1.7 Tomodensitométrie assistée par ordinateur

La tomodensitométrie assistée par ordinateur (CT-Scan) est une technique qui consiste à émettre des rayons X au travers d'un spécimen et à mesurer le rayonnement transmis à un récepteur (Hassan, Airey, Khan, & Collop, 2012; Huang et al., 2020). Un traitement informatique permet par la suite de reconstruire une radiographie du spécimen analysé. En émettant les rayons X dans différentes orientations (ou en faisant pivoter le spécimen) on obtient plusieurs radiographies qui, une fois combinées, permettent de reconstruire un modèle 3D du spécimen testé.

En analysant la reconstruction 3D ou des images 2D qui en découlent, il est possible d'extraire des données telles que la teneur en vide, l'orientation des particules ainsi que leur répartition. La grande difficulté résidant dans la segmentation des particules, c'est-à-dire la séparation en entités individuelles.

Hassan et al. (2012) ont étudié la distribution et l'orientation des granulats dans des spécimens d'EBC obtenus à la PCG et avec un compacteur de plaque. Une analyse 2D des images obtenues par CT-Scan par tranche de 1 mm (sur 100 mm) a mis en avant une légère ségrégation des particules grossière dans la partie basse des spécimens, une granulométrie similaire et une orientation aléatoire selon l'axe central. Huang et al. (2020) ont effectué des analyses d'image 2D afin d'évaluer la migration des granulats dans des EBC poreux compactés par vibration. Une orientation préférentielle des granulats perpendiculairement à la direction de compactage est observée et l'analyse permet de constater que le compactage n'est pas homogène dans les

parties hautes et basses. Comme vu à la section 1.4.2, Jiang et al. (2023) ont utilisé le CT-Scan pour évaluer la migration de l'eau dans des spécimens d'ERF.

L'étude de la répartition des vides en fonction du type de mélange et de la méthode de compactage est également permise grâce au CT-Scan. Goa, Ni, Luo, & Charmot (2015) ont mis en évidence que, pour des spécimens de teneur en vide similaire, la diminution de la taille du GBR utilisé diminue la taille moyenne des pores de vide, mais augmente le nombre des pores de vide. Des essais similaires ont été réalisés sur des EBC (Alvarez, Macias, & Fuentes, 2012; Alvarez-Lugo, Carjaval-Muñoz, & Walubita, 2014) et il apparaît que la taille des vides est liée aux propriétés des granulats et notamment à la granulométrie. La teneur en vide semble aussi avoir de l'influence dans le cas de certains mélanges.

Quinteros & Carraro (2021) ont réalisé des CT-Scan sur des spécimens de sables reconstitués selon différentes méthodes. L'orientation 3D inhérente des particules a été évaluée avec succès. L'utilisation de l'analyse d'image 3D obtenue par CT-Scan présente donc un fort intérêt pour l'étude des matériaux EBC et ERF, notamment pour explorer les éléments liés à l'anisotropie dans le matériau (voir section 1.2.3).

1.8 Sommaire

Comme montré au Chapitre 1, l'utilisation d'ERF permettrait d'augmenter la part de MR utilisé dans la réfection des chaussées et donc de réduire l'impact écologique de l'industrie routière.

Bien que les ERF présentent un comportement évolutif, soumis aux conditions de la cure, les chaussées réfectionnées avec des ERF sont réouvertes au trafic peu de temps après le compactage et recouvertes d'une couche d'EBC 1 à 2 semaines plus tard. Une meilleure connaissance sur les ERF en très jeune âge permettrait d'ajuster le temps d'ouverture au trafic afin de réduire l'endommagement prématué de la couche nouvellement posée.

De nombreux essais, usuellement réalisés sur les EBC, ont été utilisés avec succès pour caractériser les ERF ayant subi une cure. Cependant, la nature même des ERF en très jeune âge, à savoir un comportement proche d'un matériau granulaire, rend certain de ces essais inopérables. En effet, le manque de cohésion des ERF en très jeune âge rend l'ITS, le module complexe, la résistance à la déformation ainsi que l'impact de résonance impraticables. Il ressort de la littérature qu'une période de cure est nécessaire avant d'effectuer ces essais sur les ERF. Des essais de résistances à la déformation sur des ERF non ou très peu curés ont mis en avant l'absence de résistance aux déformations permanentes de ces matériaux en très jeune âge. Ainsi, les essais cités plus haut sont généralement effectués sur des ERF ayant subi une cure d'au moins un jour.

De son côté, l'essai triaxial, une méthode issue de la géotechnique et donc adaptée aux matériaux granulaires, est difficilement exploitable pour caractériser l'évolution des ERF en très jeune âge. En effet, en suivant les procédures, un essai triaxial peut durer jusqu'à 40 minutes et, du fait du comportement très évolutif des ERF en jeune âge, le matériau évoluerait au cours de l'essai.

La colonne de résonance, aussi adaptée aux matériaux granulaires, demande une expérience et équipement importants. Cependant, l'usage de méthodes basées sur les ondes est intéressant. Ces méthodes reposent, en grande majorité, sur l'émission et la réception d'ondes de compression ou de cisaillement. Les ondes de cisaillement sont d'intérêt dans l'étude des ERF en jeune âge, car celles-ci ne se propagent pas dans les liquides, contrairement aux ondes de compression. L'UPV permet, certes, une réalisation rapide des essais et à très jeune âge dans le cas d'utilisation d'ondes de cisaillement, mais manque de précision. Les techniques MASW et SASW, des techniques de chantiers, sont peu adaptées aux essais en laboratoire. Finalement, l'utilisation du P-RAT semble une bonne solution. Son utilisation dans les matériaux granulaires et des matériaux liés tels que le béton, la rapidité de la prise de mesure et la précision de la mesure en font une technique cohérente pour caractériser les ERF en très jeune âge et pendant la cure.

Enfin, l'analyse d'images 3D obtenues par CT-Scan est à envisager afin d'observer l'orientation des particules et la répartition des pores de vide et de discuter de son influence sur l'anisotropie.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS, ORGANISATION DE LA THÈSE ET APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Le présent chapitre présente les motivations derrière le projet de recherche et en exprime les objectifs. Ces objectifs sont regroupés dans trois parties distinctes desquelles découlent trois articles. Leur pertinence est justifiée et l’agencement des articles au sein de la thèse est présenté. Cette recherche s’appuie surtout sur un programme expérimental effectué en laboratoire. En conséquence, une présentation des matériaux et de la méthodologie employés dans chaque article est effectuée afin d’étayer cette justification et d’apporter des détails pour faciliter la lecture des articles. La méthodologie employée pendant la thèse a évolué suivant les résultats obtenus. Ainsi des informations et des analyses supplémentaires justifiant et expliquant ces améliorations seront présentées dans des chapitres faisant le lien entre les articles. Leur agencement est également présenté dans ce chapitre.

2.1 Motivations

Un manque de connaissance existe concernant le comportement des ERF en très jeune âge. Comme vu précédemment, l’aspect granulaire humide (voir section 1.2.3) du matériau en très jeune âge, c’est-à-dire les premières heures du jeune âge (voir section 1.3.5), rend les essais classiques sur les EBC inopérants ou extrêmement complexes. Malgré ces difficultés, les chaussées réhabilitées au moyen des ERF sont réouvertes au trafic bien avant la possibilité de caractériser mécaniquement le matériau. Ainsi, il est nécessaire de caractériser les ERF en très jeune âge afin de mieux comprendre leur comportement et leur évolution par la suite. L’utilisation d’une méthode non destructive permettrait la mesure en continu sur un même spécimen et donc une représentation fidèle de l’évolution des caractéristiques du matériau. La méthode P-RAT est issue de l’étude des sols et est donc adaptée aux matériaux granulaires ou non liés. De plus, la robustesse de la méthode et son utilisation dans l’étude des bétons en jeune âge et dans les argiles la rendent d’autant plus intéressante pour l’étude des ERF. La rapidité de la prise de mesure et sa facilité de mise en place présentent un avantage dans l’étude du caractère anisotrope des ERF. Cependant, la question des limites de l’utilisation du P-RAT

dans les ERF demeure, notamment en très jeune âge, juste après le compactage. Par exemple, dans le cas de l'étude des bétons en très jeune âge, le fort amortissement et la non-continuité du squelette granulaire compliquent le passage des ondes de cisaillement (voir section 1.6.4). Ainsi ce doctorat utilise principalement la technique P-RAT afin de caractériser des ERF au moyen de la vitesse de l'onde de cisaillement. L'accent est mis sur les très jeune âge et jeune âge, afin d'approfondir et de confirmer les éléments discutés dans la revue de la littérature, notamment la rapide montée en rigidité du matériau et son lien avec la présence d'eau.

Dans le présent doctorat, la notion de jeune âge (*early age / young age* dans les articles), sera utilisée pour décrire les premières heures de l'évolution de la cure du matériau à partir de deux heures de cure (voir section 2.6). La notion de très jeune âge (*very early age/ very young age* dans les articles) se concentrera sur les premières minutes de la cure du matériau (voir section 2.7) jusqu'au jeune âge.

2.2 Objectifs et pertinence des articles

Les enrobés recyclés à froid (ERF) sont des matériaux au comportement évolutif, passant d'un matériau granulaire à un matériau lié. Le P-RAT s'est montré efficace pour caractériser les argiles, des matériaux granulaires ainsi que des bétons en jeune âge. Le P-RAT semble donc tout indiqué pour caractériser les ERF en jeune âge. Il convient donc d'en explorer les limites et de déterminer les paramètres pertinents. L'objectif principal de ce travail de recherche est de démontrer la pertinence du paramètre V_s en très jeune âge et pendant la cure afin de caractériser les ERF et ainsi permettre son usage dans des applications futures.

Le travail a été séparé selon les objectifs spécifiques qui sont présentés par la suite et qui font l'objet des trois articles présentés aux Chapitres 3, 5 et 7. Les objectifs de la première partie qui a mené au premier article intitulé *Characterization of Cold In-Place Recycled Materials at Young Age Using Shear Wave Velocity* qui est présenté au Chapitre 3, sont les suivants :

- Vérifier la faisabilité de la caractérisation d'un ERF au moyen du P-RAT et du paramètre V_s ;
- Explorer les limites du P-RAT, notamment en jeune âge;

- Établir des relations entre les paramètres étudiés, V_s , la perte d'eau, l'amplitude des signaux.

Il ressort de l'article présenté au Chapitre 3 que le paramètre V_s est efficace pour caractériser les ERF en jeune âge. Il apparaît également que des essais débutés encore plus tôt, c'est-à-dire quelques minutes après la fin du compactage, permettraient un meilleur lien entre les paramètres étudiés. Les ordres de grandeur de V_s obtenues avec le P-RAT sur différents matériaux (argile, béton, ERF) sont différents et permettent de distinguer ceux-ci. Il est important de vérifier si le P-RAT permet de discerner des différences au sein des ERF. Il ressort de la littérature que les paramètres de cure des ERF influencent la montée en cohésion du matériau et la rigidité finale de l'ERF. Ainsi, les objectifs de la deuxième partie sont les suivants :

- Évaluer le comportement des ERF en très jeune âge au moyen de V_s ;
- Lier la température de surface des spécimens testés à l'évolution des propriétés mécaniques;
- Évaluer l'influence de la teneur en vide des spécimens sur V_s ;
- Comparer les valeurs de V_s obtenues avec le P-RAT aux résultats d'essais mécaniques de la littérature.

Cette deuxième partie a mené à la rédaction de l'article intitulé *Early-age stiffening of cold recycled bituminous materials using shear wave velocity* et est présentée au Chapitre 5.

Il apparaît dans la littérature que le EBC et les ERF sont généralement considérés comme des matériaux isotropes. Certains auteurs ont montré que les EBC présentent un comportement anisotrope (voir section 1.2.3). L'anisotropie dans les EBC et les ERF a donc une influence sur la conduite des essais en laboratoire, notamment sur la manière dont sont prélevés ou fabriqués les spécimens. Les techniques non destructives présentent de l'intérêt dans l'évaluation de l'anisotropie, car elles permettent d'évaluer le comportement mécanique d'un même spécimen dans différentes orientations. L'orientation des granulats au sein du matériau pourrait également entraîner un potentiel comportement anisotrope. Les objectifs de la troisième partie sont les suivants :

- Évaluer le comportement anisotrope d'un ERF au moyen du P-RAT et de l'UPV
- Évaluer le comportement anisotrope d'un ERF au moyen de la tomodensitométrie
- Lier les résultats de V_s et V_p aux résultats de modules complexe E^*

Cette troisième partie a mené à l'article intitulé *Assessment of anisotropy in Cold In-place Recycled materials using shear wave velocity and computed tomography analysis* et est présentée au Chapitre 7.

Plusieurs matériaux et procédures ou essais sont communs à chacune des parties de l'étude. Les éléments communs sont présentés ici et les spécificités de chaque partie sont présentées dans les articles.

2.3 Agencement de la thèse

En lien avec la revue de la littérature, les objectifs des travaux constituant cette thèse ont été présentés. Le projet de recherche couvre trois grandes parties, chacune présentée dans un article. Des informations nécessaires afin de faire le lien entre chaque article sont également présentées. La thèse est organisée comme suit :

Le Chapitre 3 présente l'article intitulé *Characterization of Cold In-Place Recycled Materials at Young Age Using Shear Wave Velocity*. Les résultats de V_s obtenus dans les plaques d'ERF sont présentés et le lien entre V_s et la perte d'eau lors de la cure est exploré.

Le Chapitre 4 fait état d'une analyse supplémentaire et notamment de l'application du modèle Michaelis-Menten (MM) sur des données de l'article 1 présenté au Chapitre 3. De plus, une explication est donnée quant au changement du format des spécimens testés et des ajustements apportés à la procédure expérimentale. Le Chapitre 4 fait le lien entre les Chapitres 3 et 5.

Le Chapitre 5 présente l'article intitulé *Early-age stiffening of cold recycled bituminous materials using shear wave velocity*. Les améliorations discutées au Chapitre 4 sont appliquées, ce qui permet d'obtenir les premières mesures de V_s 10 minutes après la fin de la compaction.

Le modèle MM est appliqué avec et le lien entre les valeurs de V_s , de la perte d'eau et de la température de surface est discuté. L'influence de la teneur en vide sur les valeurs de V_s est présentée et est cohérente avec la littérature.

Le Chapitre 6 présente des résultats supplémentaires à ceux de l'article présenté au Chapitre 7 et qui n'y figurent pas. Il s'agit d'essais sur le mastic bitumineux utilisé comme interface au Chapitre 7.

Le Chapitre 7 présente l'article intitulé *Assessment of anisotropy in Cold In-place Recycled materials using shear wave velocity and computed tomography analysis*. L'anisotropie dans les spécimens d'ERF est évaluée. Les valeurs de V_s obtenues dans trois directions sont systématiquement différentes, prouvant la présence d'anisotropie. De plus, l'analyse de l'orientation des granulats dans les spécimens testés, via la tomodensitométrie, met en évidence la présence d'anisotropie inhérente.

Le Chapitre 8 fournit une analyse globale des travaux présentés.

Finalement, une conclusion suit. Des recommandations y sont formulées.

2.4 Matériaux

Les matériaux utilisés au cours de cette étude sont tous des ERF, MR-7 traités à l'émulsion, correspondant à un retraitement de type 1 (voir section 1.1.3). Dépendamment du projet, les ERF étudiés sont de compositions et formats différents. Les composants choisis (GBR et émulsion de bitume) sont des matériaux utilisés au Québec et disponibles dans les laboratoires de l'ETS. De plus, les échantillons de mastic bitumeux utilisés avec les transducteurs sont également présentés. Sauf indications contraires, les valeurs de teneur en vide présentées correspondent à la valeur finale de vide. Après compactage, une partie de ces vides est occupée par de l'eau, qui va disparaître avec la cure du matériau.

2.4.1 Partie 1 – Article 1

Cet article est présenté au Chapitre 3.

Dans le cadre de cette étude, le mélange testé est composé de 100 % de GBR, 1,5 % de bitume d'apport (émulsion CSS-1 67 % de bitume, McAsphalt), 6 % d'eau d'ajout et 1 % de ciment (GU 10, Ciment Québec). Les pourcentages sont calculés relativement à la masse de GBR. Le GBR n'a pas été séché à l'étuve. La granulométrie du GBR est présentée à la Figure 2.1.

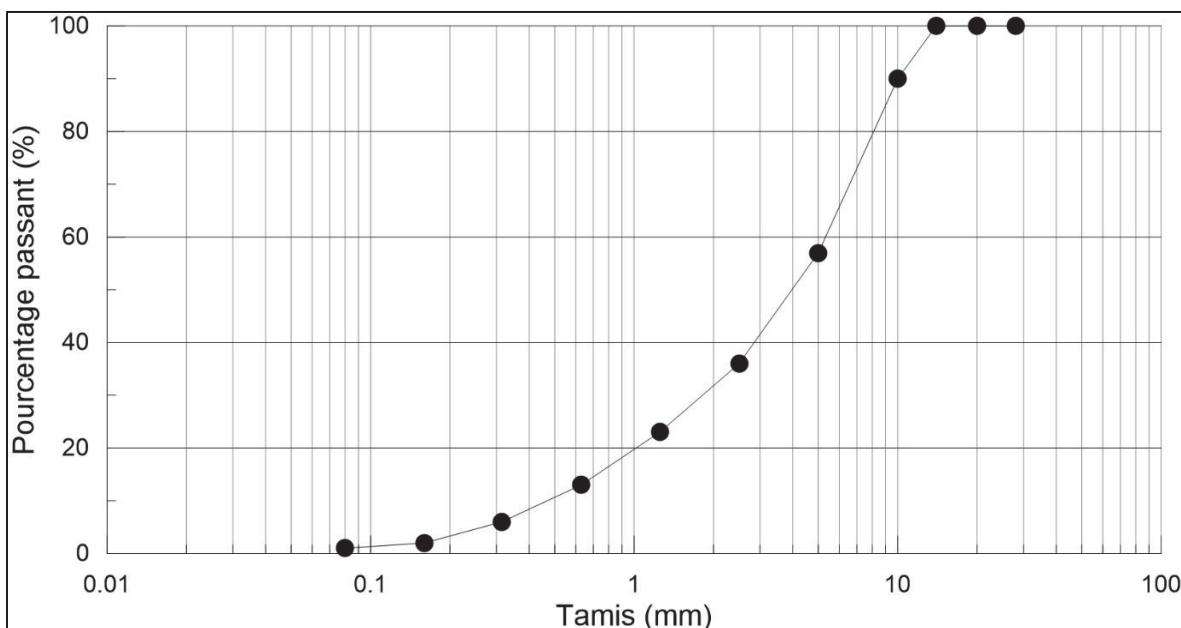


Figure 2.1 Courbe granulométrique du GBR 0-10 mm utilisé dans l'article 1

La teneur en bitume du GBR mesurée au four à ignition est de 5,02 % selon la méthode d'essai LC 26-006 (MTMD, 2023) et sa densité maximale (d_{mm}) est de 2,549 selon la méthode d'essai LC 26-045 (MTMD, 2023).

Des spécimens cylindriques ont été confectionnés à des fins d'essais préliminaires. Ils sont composés de deux cylindres compactés à la presse Marshall (LC 26-020, MTMD), de dimension 63 et 73 mm de hauteur pour un diamètre de 101 mm, et d'un cylindre compacté à la PCG (Figure 2.2) de hauteur 107 mm pour 100 mm de diamètre (LC 26-003, MTMD). Les

spécimens Marshall ont été conservés un jour dans leurs moules avant de les extraire. Le spécimen compacté à la PCG a été démoulé directement après le compactage, mais gardé en place trois heures avant d'effectuer le premier test.



Figure 2.2 Presse à cisaillement giratoire vide avec un moule de 100 mm de diamètre

Deux plaques d'ERF de dimensions 500 mm * 180 mm * 50 mm ont été compactées à l'aide du compacteur de plaque Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC) (Figure 2.3). La géométrie d'une plaque permet de disposer plusieurs transducteurs piézoélectriques (voir section 2.5.1) sur un même spécimen et permet de réduire les effets de bord.



Figure 2.3 Compacteur de plaque LPC

Le mélange est malaxé à la main. Dans un premier temps, le ciment et le GBR sont mélangés pendant 1 minute. Par la suite, l'eau et l'émulsion de bitume sont ajoutées simultanément et le tout est malaxé pendant deux minutes. Enfin, le mélange est introduit dans le moule concerné, puis compacté. La cure des spécimens est effectuée à température ambiante (20-22°C) à une humidité relative de 30-50 %.

2.4.2 Partie 2 – Article 2

Cet article est présenté au Chapitre 5.

Dans le cadre de cette étude, le mélange testé est composé de 100 % de GBR, 2 % bitume d'apport (émulsion CSS-1 67 % de bitume, McAsphalt), 2 % d'eau d'ajout et 1 % de ciment (GU 10, Ciment Québec). Afin de permettre une bonne hydratation du ciment, une masse d'eau supplémentaire équivalente à $\frac{1}{4}$ de la masse du ciment est ajoutée. Les pourcentages sont calculés relativement à la masse de GBR. Le GBR n'a pas été séché à l'étuve. Le GBR utilisé est de calibre 0-20 mm. La granulométrie du matériau est présentée à la Figure 2.4.

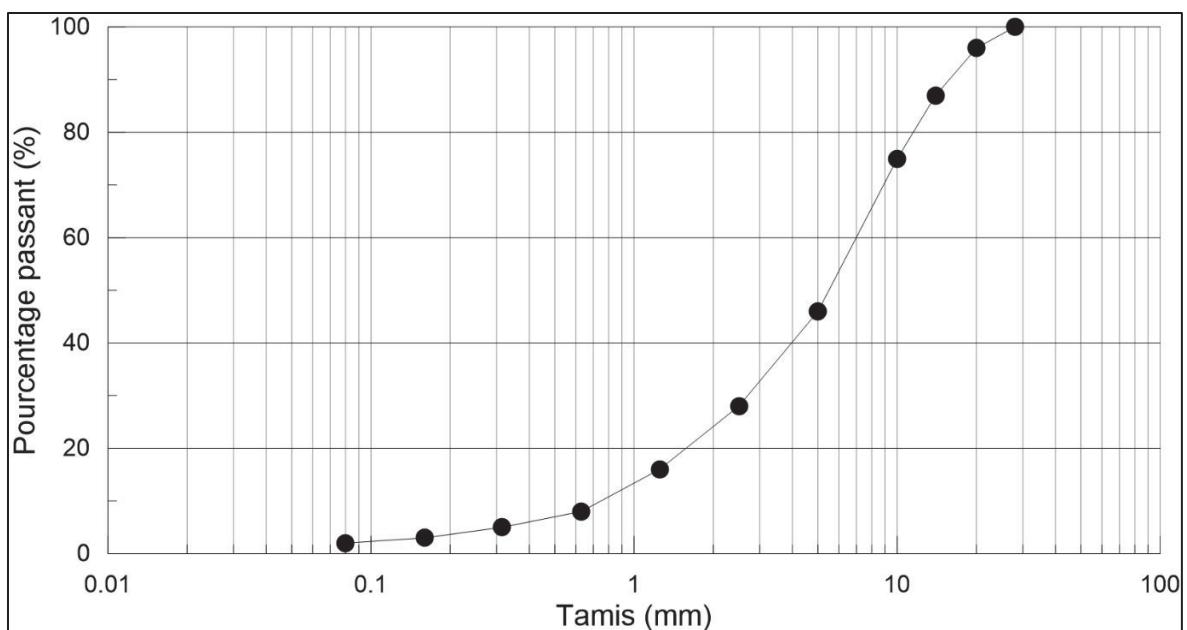


Figure 2.4 Courbe granulométrique du GBR 0-20 mm

La teneur en bitume du GBR est de 5,01 % et sa densité maximale est de 2,599 (Oroza et al., 2022).

Le mélange est malaxé manuellement. Le GBR et l'eau d'ajout sont malaxés pendant une minute, puis l'émulsion de bitume est insérée et un malaxage d'une minute est effectué. Le ciment est ajouté en dernier et est suivi d'un malaxage d'une minute. Le mélange est par la suite introduit dans le moule. Les spécimens sont compactés à la PCG dans un moule de 100 mm de diamètre. Le compactage est effectué à une pression constante de 600 kPa, une rotation de 30 rpm et un angle de 1,16°. Le choix de faire des spécimens cylindriques est motivé par la rapidité de démoulage après le compactage et le plus grand contrôle sur la compacité du spécimen.

Dix spécimens répartis en deux catégories ont été réalisés et couvrent 2 volets. Le premier volet (évolution) concerne ceux dont les propriétés sont contrôlées tout au long de la cure. Le second volet (contrôle) concerne ceux qui servent à la reproductibilité de la mesure de V_s et qui subissent une cure accélérée, dans un souci de gain de temps. Certains spécimens du volet

contrôle ont également servi pour des essais préliminaires. La reproductibilité est vérifiée en comparant les valeurs de V_s en fin de cure des spécimens des volets évolution et contrôle. Les informations relatives aux spécimens utilisés lors du premier volet de cette étude sont regroupées dans le Tableau 2.1. Les informations relatives aux spécimens de contrôle sont regroupées dans le Tableau 2.2. La densité maximale du mélange est de 2,517.

Tableau 2.1 Informations relatives aux spécimens cylindriques du volet évolution

Spécimen	C-12	C-15	C-17
Hauteur (mm)	75,0	74,5	75,0
Teneur en vide (%)	12,1	15,1	17,5
Nombre de girations	195	72	51
Heure de début compactage	19 : 01	18 : 47	19 : 02
Heure de fin compactage	19 : 09	18 : 51	19 : 06
Heure de sortie du moule	19 : 13	18 : 55	19 : 09
Masse d'eau perdue pendant le compactage (g)	8,3	3,0	1,5

Tableau 2.2 Informations relatives aux spécimens cylindriques du volet contrôle

Spécimen	Teneur en vide (%)	Hauteur (mm)	Temps et condition de cure
Contrôle-10_1	10,6	98,2	4 jours* dans l'étuve à 50°C et 50 % d'humidité relative + 1 jour à température ambiante
Contrôle-10_2	10,4	97,9	
Contrôle-10_3	10,6	98,0	
Contrôle-12**	12,4	100,0	
Contrôle-17_1**	17,1	99,3	7 jours* dans l'étuve à 50°C et 50 % d'humidité relative
Contrôle-17_2**	17,5	99,7	
Contrôle-17_3**	17,2	99,4	

*la durée a été modifiée à la suite des essais réalisés sur les spécimens Contrôle-17

** spécimens utilisés pour les essais préliminaires

2.4.3 Partie 3 – Article 3

Cet article est présenté au Chapitre 7.

Dans le cadre de cette étude, deux mélanges sont testés. Le premier est composé de 100 % GBR (0-10 mm), 2 % de bitume d'apport (émulsion CSS-1, 67 % de bitume, McAsphalt), 6 % d'eau d'ajout et 1 % de ciment (GU 10, Ciment Québec). Le second mélange est composé de 100 % GBR (0-20 mm similaire à la section 2.4.2), 2 % de bitume d'apport (émulsion CSS-1 67 % de bitume, McAsphalt) et 2 % d'eau d'ajout. La granulométrie des deux GBR est présentée à la Figure 2.5.

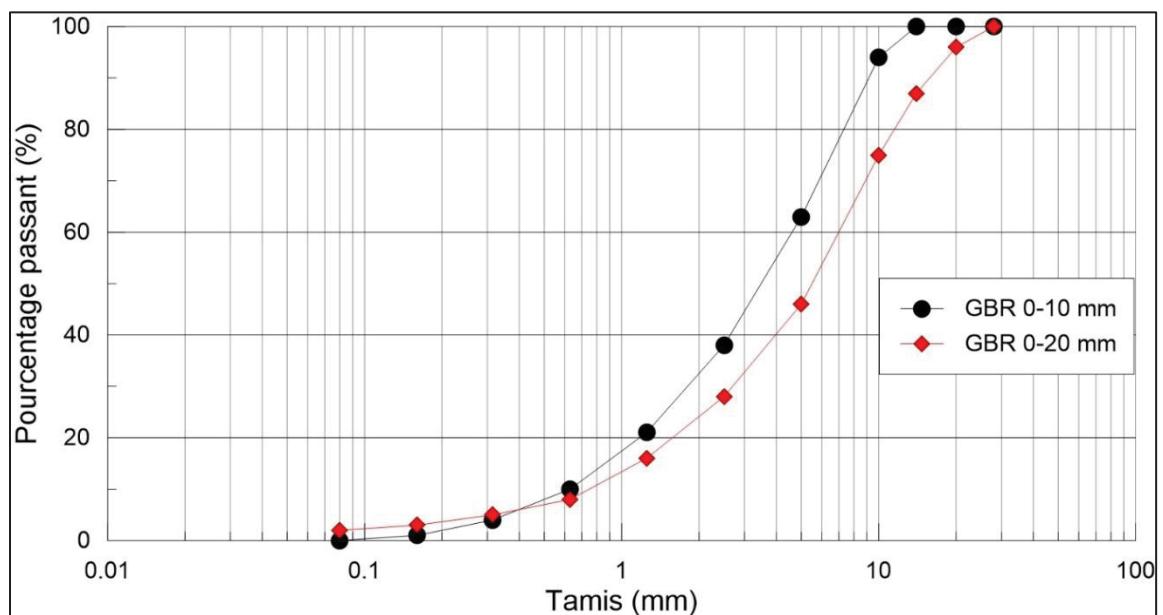


Figure 2.5 Granulométrie des GBR 0-10 mm et 0-20 mm utilisés dans l'article 3

Le malaxage est réalisé au malaxeur thermorégulé et il est réalisé comme suit. Le GBR est introduit suivi de l'eau d'ajout puis le tout est malaxé durant une minute. Par la suite, l'émulsion est ajoutée et un malaxage d'une minute et 30 secondes est effectué. Le ciment, le cas échéant, est ajouté en dernier, suivi d'un malaxage d'une minute. Le mélange est ensuite inséré dans le moule du compacteur de plaque LPC, aux dimensions indiquées dans le Tableau 2.3. Par la suite les plaques ont subi une cure et ont été découpées comme indiqué au Tableau

2.3. La Figure 2.6 présente une schématisation de la découpe. Le choix des plaques est motivé par leur géométrie, bien adaptée aux essais réalisés.

Tableau 2.3 Informations relatives aux plaques d'ERF

	Plaque 1 (GBR 0-10 mm)	Plaque 2 (GBR 0-20 mm)
Dimension	600 mm * 400 mm * 130 mm	500 mm * 180 mm * 110 mm
Cure	25 jours dans une étuve à 40°C	10 jours dans une étuve à 40°C
Découpe	15 sections	4 sections

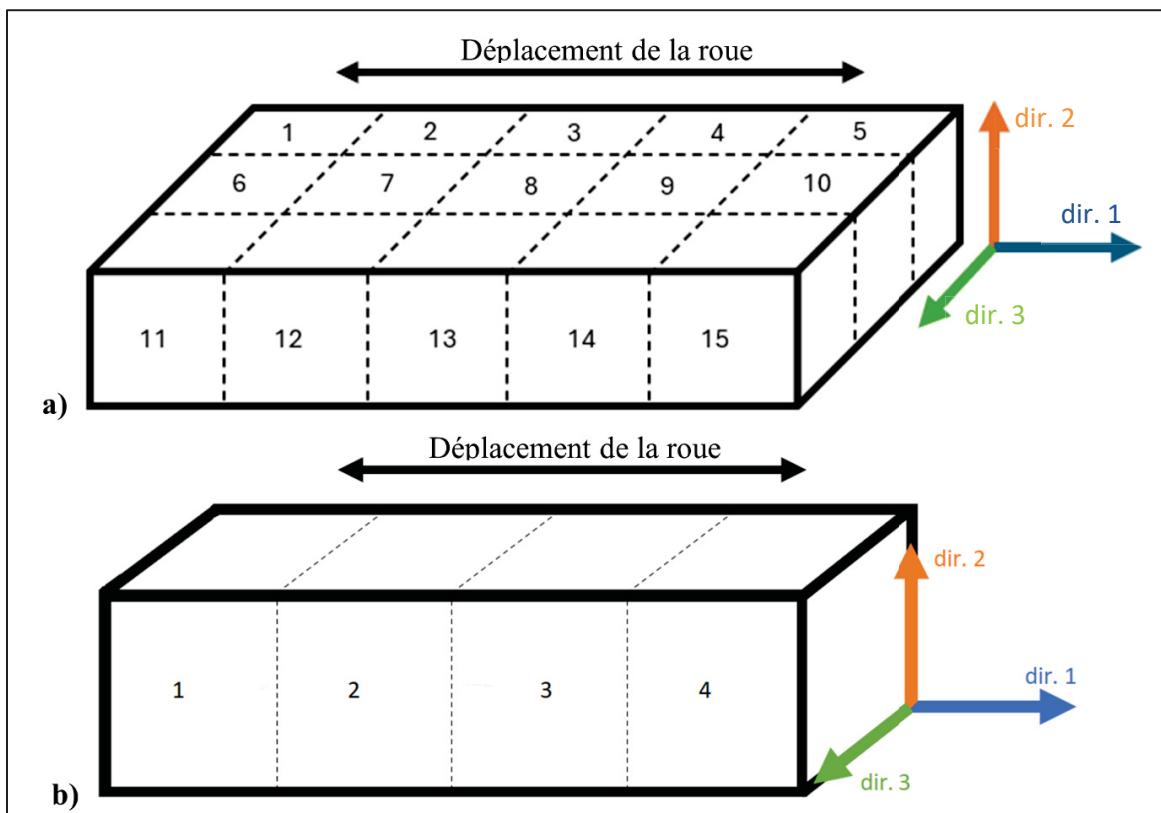


Figure 2.6 Représentation schématique de la découpe des sections dans les plaques 1 a), et 2 b); le système d'axe présenté est utilisé dans la suite de l'étude

Les sections sont nommées en fonction de la plaque d'origine et du numéro de section, tel que présenté à la Figure 2.6. La section issue de la plaque 2 et située à l'emplacement 3 est nommée

Slab2_3. Les termes anglais sont utilisés par concordance avec l'article présenté au Chapitre 7.

Par la suite, dans le cas des sections issues de la plaque 2, des cylindres sont extraits dans la direction 3. Les spécimens cylindriques sont appelés spécimen Slab2_1C à Slab2_4C. La plaque 1 est compactée à une teneur en vide de 20 %. Les sections 2, 3 et 4 de la plaque 2 ont des teneurs en vide de 17,2 %, 16,5 % et 17,1 % respectivement. Les teneurs en vide ont été mesurées avec la tomodensitométrie assistée par ordinateur (CT-Scan). La méthode volumétrique (LC 26-040) surévalue les teneurs en vide dans le cas présent.

2.4.4 Mastic bitumineux

Un mastic bitumineux composé de 75 % de sable et de 25 % (les proportions sont massiques) de bitume PG 58S-28 a été utilisé pour assurer la liaison entre les transducteurs et les échantillons de matériaux bitumineux. Le bitume et le sable sont amenés à une température de 140°C dans une étuve puis malaxés. Le mélange est par la suite remis dans l'étuve à 140°C puis malaxé à nouveau en attendant son utilisation. Afin de pouvoir contrôler la hauteur des spécimens de mastic bitumineux, des moules réalisés par impression 3D sont utilisés. Les moules sont des cylindres de diamètre intérieur 70 mm et de hauteur 30 mm et 15 mm. La Figure 2.7 présente les moules utilisés.

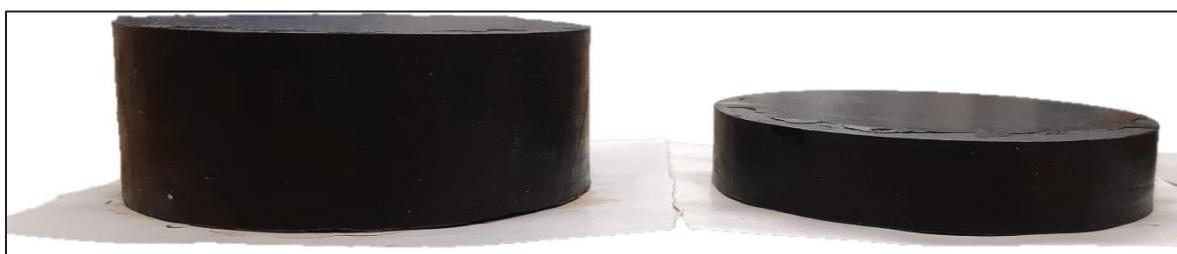


Figure 2.7 Moules en impression 3D remplis de mastic bitumineux. À gauche 30 mm et à droite 15 mm de hauteur

Le mastic bitumineux est chauffé à 140°C puis versé dans les moules. Les surfaces sont arrasées et les cylindres sont conservés à plat. Afin d'empêcher que le mastic ne colle aux

transducteurs utilisés pour les essais P-RAT, une fine couche de poussière d'argile broyée est disposée sur les surfaces des cylindres de mastic (voir Figure 2.8). La formulation du mastic est basée sur l'expérience au LCMB et les seuls critères de formulations qui ont été utilisés visent l'obtention d'un matériau à la fois rigide (pour éviter l'écoulement du mastic bitumeux) et néanmoins déformable pour que le contact avec le transducteur soit bon.



Figure 2.8 Moule de 15 mm avec mastic bitumineux recouvert d'une fine couche d'argile broyée

2.5 Éléments généraux et procédures communes concernant le P-RAT

Les processus de génération, d'acquisition et de traitement des signaux avec le P-RAT sont communs à tous les essais. Ils seront présentés dans cette section. Les essais sont conduits sur des spécimens de tailles et de formats différents, ce qui implique des montages différents. Chacun sera présenté dans une partie dédiée, en relation avec l'article correspondant.

2.5.1 Transducteurs piézoélectriques

Les transducteurs piézoélectriques servent à l'émission et à la réception de l'onde de cisaillement. Ils sont disposés de part et d'autre du spécimen à tester. Cette section présente la conception des transducteurs et les améliorations apportées à ceux-ci. Enfin, les caractéristiques des transducteurs utilisés dans le doctorat sont présentées.

2.5.1.1 Conception des transducteurs

Les transducteurs piézoélectriques utilisés dans cette étude sont conçus selon les principes évoqués à la section 1.6 et sont une adaptation des travaux de Ethier (2009). Ils sont composés d'un anneau piézoélectrique fixé à l'aide d'une résine d'époxy à un cylindre métallique en son centre. Dans le contexte d'un usage pour la géotechnique, le cylindre était en bronze fritté. Ainsi, en premier lieu (essais présentés au Chapitre 3), le cylindre était en acier inoxydable fritté et percé d'une croix en son milieu, dans le cadre des ERF. Le matériau fritté était utilisé en raison des surpressions locales dues à l'eau dans les essais sur les argiles. La porosité du matériau central avait donc pour but de dissiper ces surpressions. Il a été considéré, du fait de la présence importante d'eau dans les ERF en jeune âge, qu'un cylindre poreux serait bénéfique. La croix permet d'obtenir une meilleure déformation du cylindre et donc une meilleure propagation de l'onde de cisaillement, suivant des modélisations numériques. La taille de celle-ci dépend des dimensions des transducteurs; 1 mm d'ouverture pour les transducteurs 38-34 mm et 51-45 mm; 0,75 mm pour les transducteurs 22-16 mm. Comme détaillé plus tard, les nombres correspondent aux diamètres extérieurs et intérieurs de l'anneau piézoélectrique. La Figure 2.9 présente ce type de transducteur.

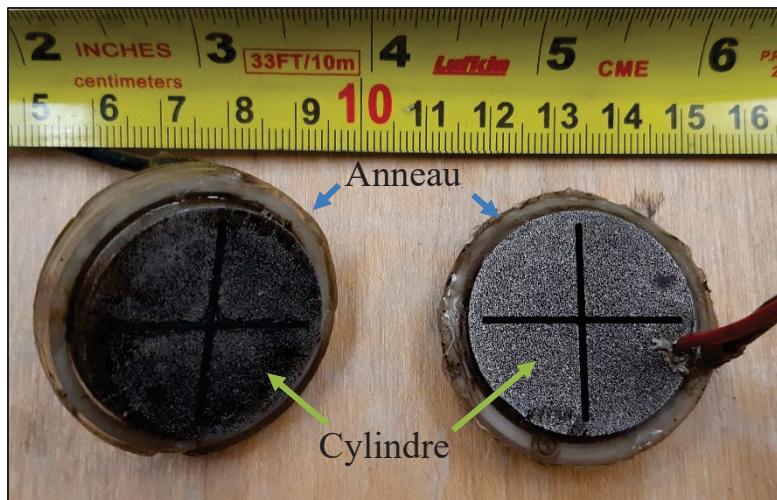


Figure 2.9 Transducteurs 38-34 mm avec pierre poreuse en acier fritté et croix de 1 mm

Il est apparu que l'utilisation de cylindres percés d'une croix ne générât pas que des ondes de cisaillement, mais également une légère torsion. Ainsi, une amélioration des transducteurs a été envisagée en remplaçant le cylindre plein par une combinaison de quatre quarts de cylindre. Un rainurage en surface des quarts de cylindre a remplacé la nécessité de microporosité du matériau, et de l'aluminium a été choisi. La déformation du transducteur s'en trouve améliorée, et le contact entre le transducteur et le matériau testé est assuré par des rainures ou un damier en relief. Les quatre quarts de cylindre sont espacés afin de former une croix de 1 mm d'épaisseur. La Figure 2.10 présente ce type de transducteur. Dans un cas comme dans l'autre, la croix est comblée avec du silicone souple afin que le matériau testé ne pénètre pas le transducteur. Cela a été fait en collaboration avec l'Université de Sherbrooke, et des simulations numériques ont été effectuées afin de valider les éléments cités plus haut (Mhenni et al., 2015).

Du fait des améliorations apportées aux transducteurs, les éléments de la méthodologie ont évolué en parallèle avec les essais réalisés pendant la thèse. De meilleures pratiques ont pu être adoptées à mesure qu'elles étaient démontrées afin de faciliter l'interprétation des signaux expérimentaux. Ces éléments sont détaillés dans les sections suivantes.

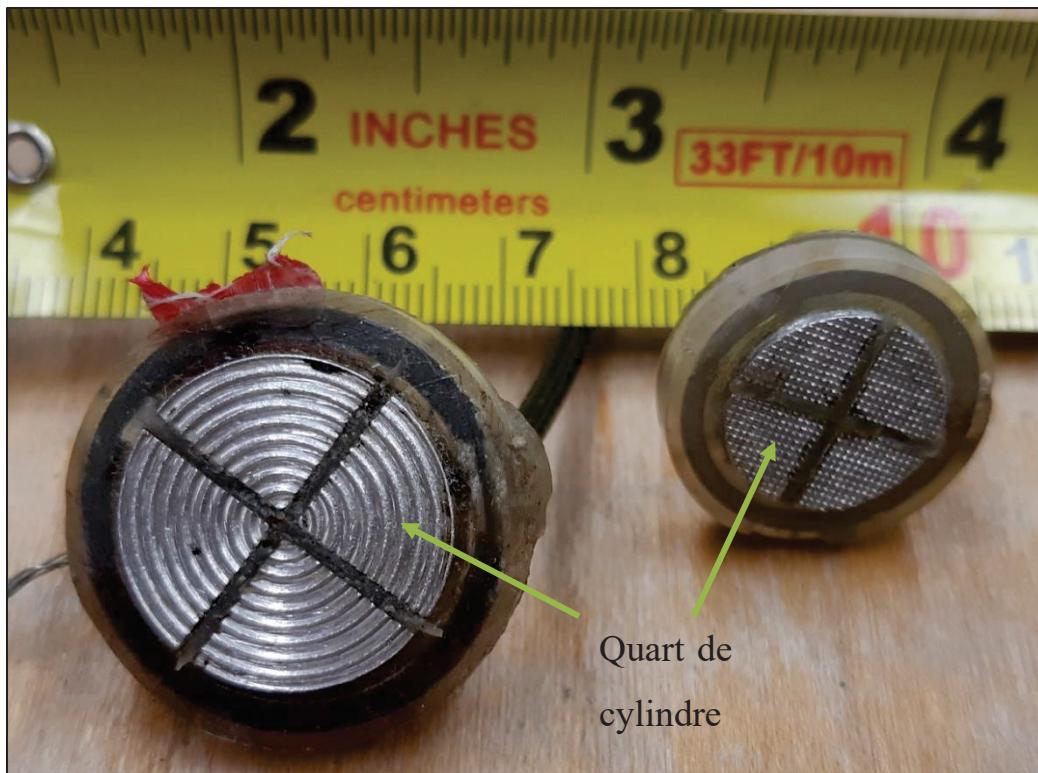


Figure 2.10 Transducteur 26-22 mm à gauche et 19-16 mm à droite;
Pierre centrale en 4 morceaux avec rainure à gauche et damier en relief à droite

La transmission du signal électrique à l'élément piézoélectrique est réalisée par un câble coaxial soudé directement sur l'anneau piézoélectrique. L'époxy enrobant l'anneau permet l'étanchéité de la soudure (voir les Figure-A I-1 à Figure-A I-3). Plusieurs types d'anneaux piézoélectriques ont été utilisés et leurs dimensions ont été sélectionnées en fonction des disponibilités auprès des fournisseurs. Le détail peut être consulté au Tableau-A I-1. Ainsi, les quarts de cylindre ou les pierres poreuses sont dimensionnés pour permettre un enrobage d'époxy de 0,5 mm à 1 mm d'épaisseur, dépendamment du transducteur.

Préalablement à l'assemblage des transducteurs, le fil coaxial est soudé à l'anneau piézoélectrique. Par la suite, l'anneau piézoélectrique et les quarts de cylindre sont disposés dans des moules en silicium. Ceux-ci permettent un placement précis des différents éléments et un démoulage facilité après le durcissement de l'époxy. Les Figures 2.11 présentent des exemples de moules utilisés, pour les transducteurs avec le cylindre central percé d'une croix

(a) et pour les transducteurs avec les quatre quarts de cylindre (b). La présence de la croix en silicone dans les moules présentés à la Figure 2.11 B permet de maintenir les quarts de cylindre en place.

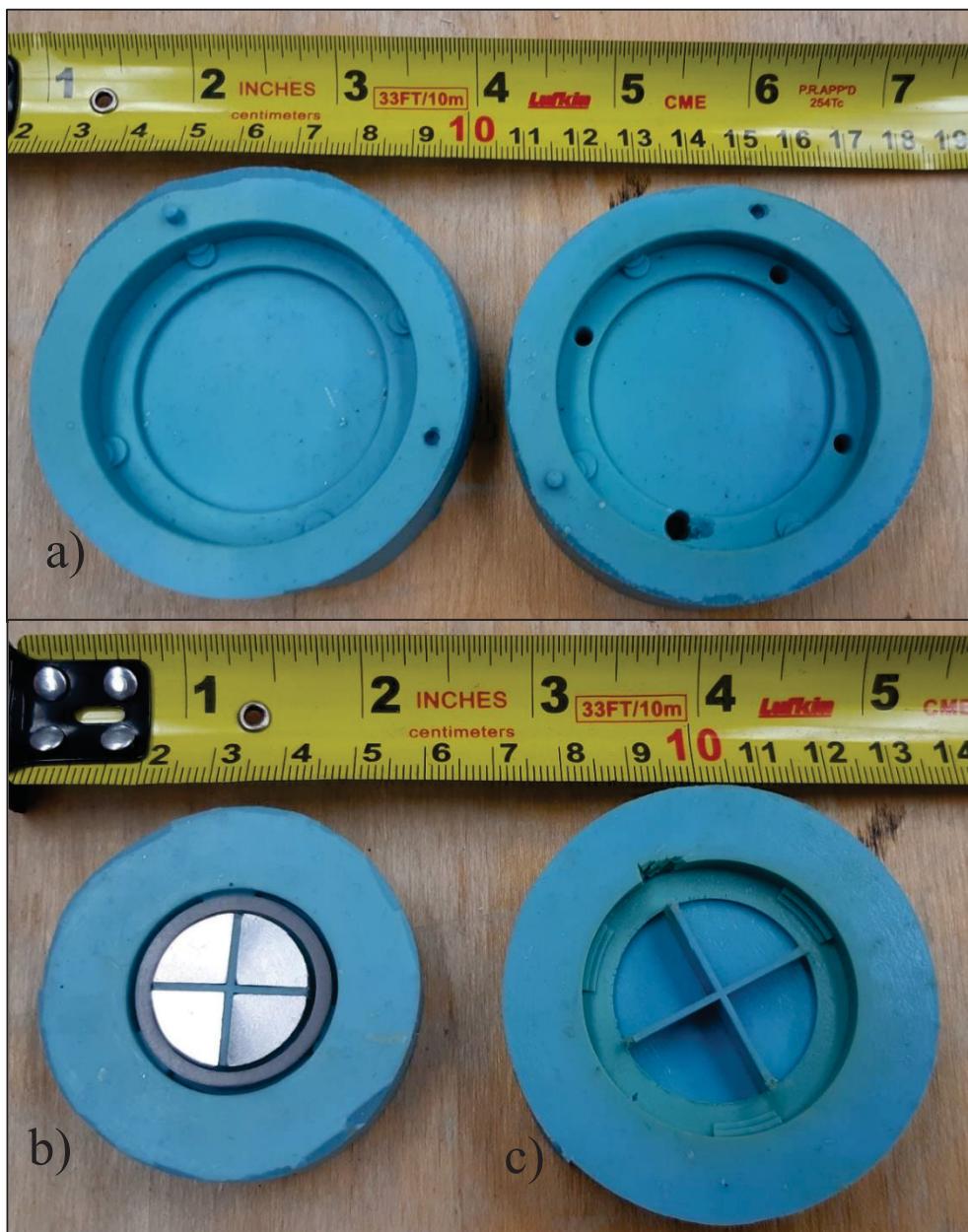


Figure 2.11 Moules en silicone pour les transducteurs 51-45 mm (a), pour les transducteurs 26-22 mm avec 4 quarts de disque et anneau piézoélectrique (b) et 36-31 mm (c). La croix en silicone permet le placement des 4 quarts de disque

2.5.1.2 Transducteurs utilisés

Le Tableau 2.4 présente les informations relatives aux dimensions des anneaux piézoélectriques et des cylindres métalliques qui y sont insérés, pour les transducteurs utilisés (Figures 2.9 et 2.10). L'utilisation des transducteurs dans les articles y est présentée, en lien avec les améliorations expliquées à la section 2.5.1.1.

Tableau 2.4 Dimensions des transducteurs

Anneaux	22-16	38-34	51-45	19-16	26-22	36-31
Dext/ Dint (mm)	22/16	38/34	51/45	19/16	26/22	36/31
Hauteur (mm)	3,5	3,5	14,0	3,0	3,0	4,0
Cylindre / quart de cylindre						
Diamètre (mm)	14,0	32,0	42,0	14,0	20,0	29,0
Hauteur (mm)	11,9	11,9	21,1	6,3	6,5	7,5
Nature du cylindre	Cylindre en acier fritté			4 quarts de cylindre en aluminium		
Utilisation						
Article 1 (Chapitre 3)	Oui	Oui	Oui			
Article 2 (Chapitre 5)				Oui	Oui	Oui
Article 3 (Chapitre 7)			Oui	Oui	Oui	Oui

Dans la suite du projet, les transducteurs seront identifiés par leurs tailles d'anneaux piézoélectriques. Ainsi, le couple de transducteurs 26-22 mm correspondent aux transducteurs utilisant des anneaux piézoélectriques de diamètre extérieur 26 mm et intérieur 22 mm. Les tailles des anneaux piézoélectriques influencent leurs paramètres physiques. Ainsi les transducteurs de tailles différentes auront des caractéristiques différentes. De plus, on peut supposer qu'un petit transducteur peut se retrouver totalement sur un granulat tandis qu'un transducteur plus grand serait positionné sur une section de matériaux plus représentatifs de l'ensemble. Enfin, comme présentée à la section 1.6.4, une diffraction d'onde peut apparaître si le diamètre du transducteur est inférieur à celui des granulats dans le spécimen testé. Pour

ces raisons, plusieurs tailles de transducteurs sont utilisées, et le choix des dimensions fera l'objet d'une analyse, à la vue des résultats obtenus.

Enfin, certains transducteurs sont encastrés dans des capsules obtenues par impression 3D, ce qui permet au transducteur d'être en contact avec le matériau testé, sans pour autant pénétrer celui-ci. De plus, dans le cas où une pression est appliquée afin de maintenir un contact suffisant à la bonne transmission des signaux, la présence de la capsule réduit la contrainte subie par le transducteur, ce qui pourrait affecter son fonctionnement. Le transducteur est maintenu en place dans la capsule à l'aide de silicone. Un exemple de capsule est présenté à la Figure 2.12.

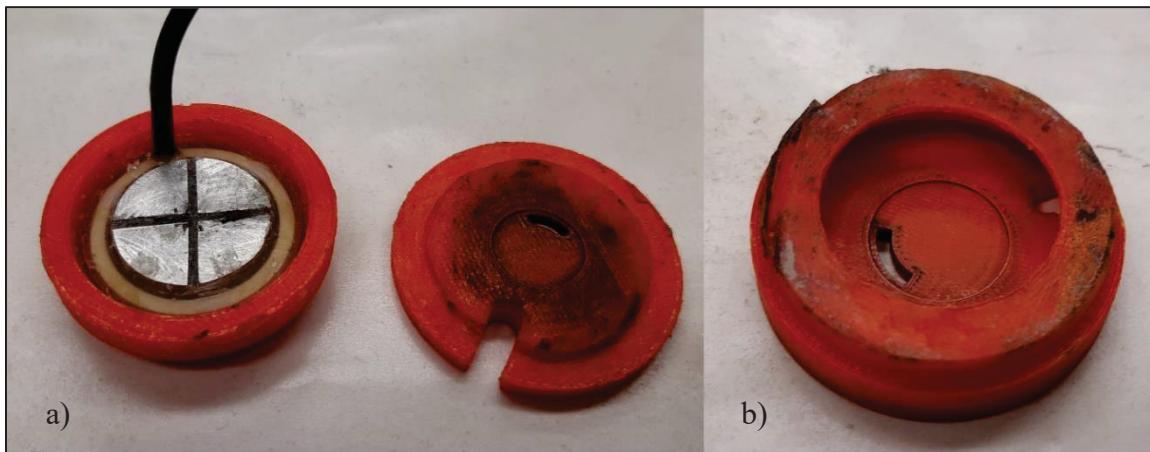


Figure 2.12 Capsule pour transducteur 26-22 mm A avec et sans transducteur

2.5.2 Génération et acquisition des signaux P-RAT

Les transducteurs piézoélectriques présentés à la section précédente servent d'émetteur et de récepteur des signaux. La génération des signaux est effectuée par un oscilloscope ainsi qu'un générateur de signaux Handyscope HS3 100MHz de chez Tie Pie Engineering. Un amplificateur de signal 7602M de chez Krohn-Hite est utilisé. Le programme Tie Pie Multi Channel est utilisé pour contrôler la génération des signaux et acquérir les signaux temporels de l'émission et de la réception. La Figure 2.13 présente un schéma du dispositif d'acquisition

des signaux. Les canaux CH1 et CH2 de l'oscilloscope sont, respectivement, le signal émis et le signal reçu.

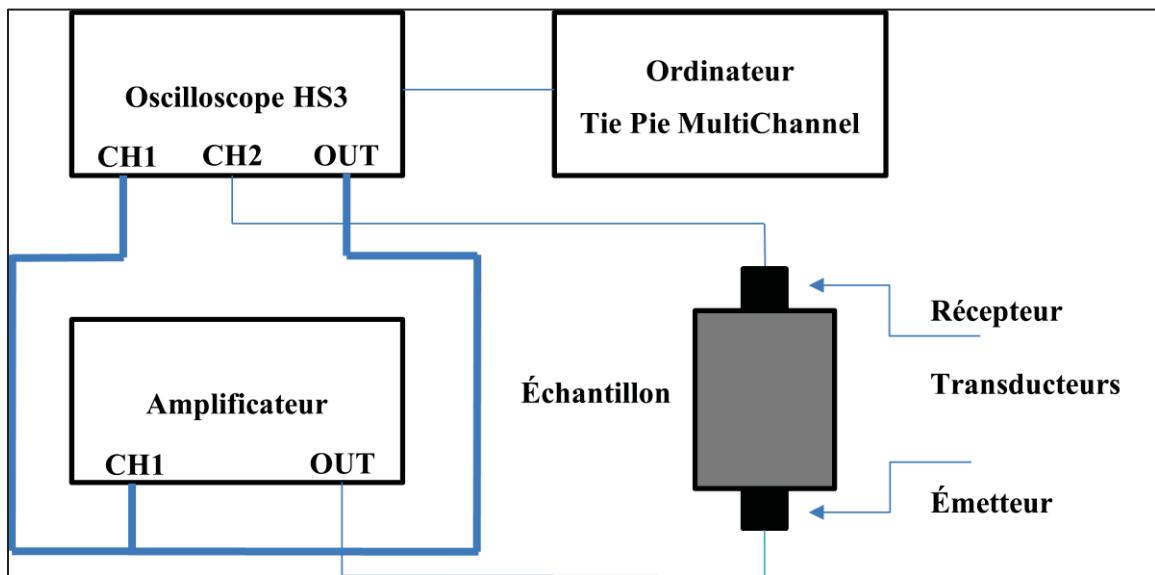


Figure 2.13 Schéma du dispositif d'émission et d'acquisition des signaux

Il est possible, lors de la génération d'onde, de choisir le type de signal, la fréquence d'émission, l'amplitude et le gain apporté au signal émis. La Figure 2.14 présente les formes de signaux utilisés.

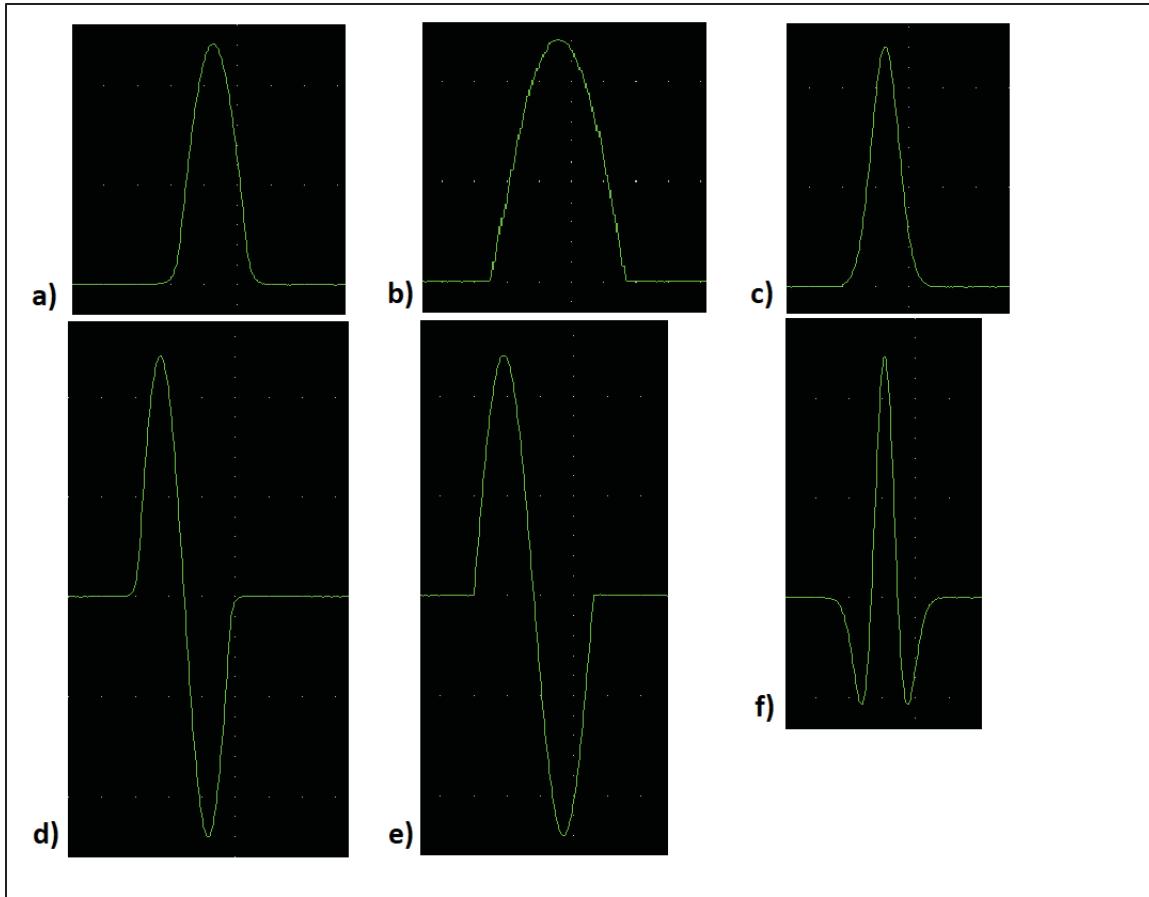


Figure 2.14 Forme de signaux utilisés pour l'émission. a) Demi-Sinus Arrondi; b) Demi-Sinus; c) Gaussienne; d) Sinus Arrondi; e) Sinus; f) Ondelette

La différence entre, par exemple, un Demi-Sinus Arrondi et un Demi-Sinus est l'absence de discontinuité dans le signal (voir la Figure 2.14). Cette discontinuité peut provoquer la génération d'une onde de compression. En effet, dans le cas où il y a une discontinuité, l'anneau piézoélectrique va subir une contrainte dont le taux de variation est en théorie infini (évolution de la pente de façon brusque). Ainsi, ce pic de contrainte va générer une faible onde de compression. Dans le cas d'un signal arrondi, la continuité de la courbe permet une évolution sans à coup de la contrainte.

Par souci de concision, on abrège Ondelette par O; Demi-Sinus Arrondi par DSA; Sinus arrondi par SA; Gaussienne par GAU; Demi-Sinus par DS; Sinus par S. Par la suite, on appellera un signal de la façon suivante : Forme de l'onde, fréquence d'émission (kHz),

amplitude (V) et gain (dB). Par exemple, un signal O-5kHz-12V-14dB correspond à un signal de forme Ondelette, de fréquence 5kHz, d'amplitude 12V et d'un gain associé de 14dB. L'annexe A-II présente la variation des paramètres utilisés. Un exemple de signaux acquis lors d'un essai y est également présenté. Les fréquences d'émission utilisées sont comprises entre 3 kHz et 25 kHz et le gain est choisi parmi trois valeurs 14, 28 et 42 dB. Un ensemble de 10 à 15 signaux est généralement acquis, cette valeur est dépendante des contraintes de temps lors de l'essai.

Lors de la génération de signaux, 8 acquisitions (émission puis réception) d'un même signal sont réalisées. Les 8 acquisitions successives sont empilées et la moyenne des 8 signaux est obtenue. Cela permet de réduire le bruit potentiel. Le nouveau signal ainsi obtenu est ensuite analysé.

2.5.3 Traitement des signaux P-RAT / Analyse fréquentielle des signaux

Le traitement des signaux par le P-RAT est effectué avec une interface dédiée réalisée sous LabView (National Instruments) avec les concepts évoqués à la partie 1.6.3. L'interface utilisée lors de l'analyse fréquentielle est présentée à la Figure 2.15. Cette interface se décompose en 5 parties. Des encadrés de couleurs ont été placés sur la Figure 2.15 afin de faciliter la description :

- L'encadré vert présente les paramètres à modifier pour effectuer l'analyse;
- L'encadré bleu présente le signal émis (courbe verte pleine), le signal reçu expérimental (courbe bleue), le signal reçu corrigé (courbe rouge) et le signal théorique (courbe noire). La zone grisée correspond au filtre sur le signal temporel. L'utilisation de ce filtre permet de faciliter l'analyse, le cas échéant;
- L'encadré pourpre présente les spectres fréquentiels du signal émis (courbe verte pleine) et du signal reçu (courbe rouge). Cet encadré informe sur la plage de fréquence où mener l'analyse à l'aide des encadrés suivants.

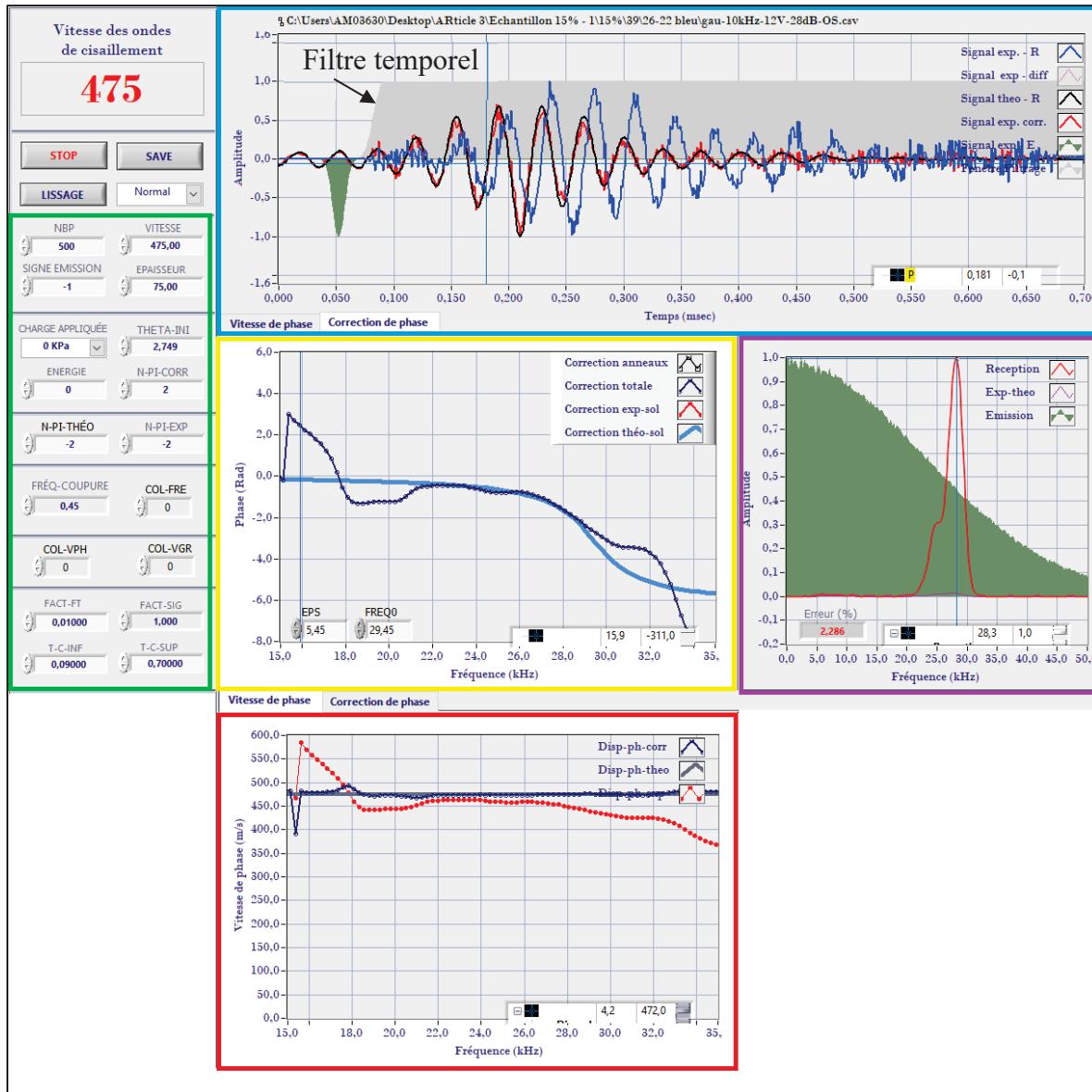


Figure 2.15 Interface du programme d'analyse fréquentielle P-RAT sous LabView
Transducteur 26-22 mm A, Gau-10kHz-12V-28dB, Spécimen C-15, Mesure 39

- Le cadre jaune concerne la correction de phase. La courbe bleue pleine est le diagramme de Bode en phase théorique des couples de transducteurs. Cette courbe présente deux asymptotes, une à 0 radian aux basses fréquences et une qui tend vers -2π radians (-6,28 rad) aux hautes fréquences de part et d'autre de la fréquence de résonance. En effet, les transducteurs étant considérés comme des systèmes à un degré de liberté, leur fonction de transfert est connue et le déphasage à haute fréquence tend vers -1π rad (-3,14 rad). Il y a

deux transducteurs, donc le déphasage maximal tend vers -2π rad en haute fréquence. La courbe en points bleus correspond à la correction de phase expérimentale. L'analyse fréquentielle consiste, en partie, à faire coller au mieux la courbe bleue pleine et la courbe en points bleus.

- Le cadre rouge présente les vitesses de phases. La courbe rouge correspond à la vitesse de phase expérimentale, la bleue à la vitesse de phase corrigée et la grise à la valeur de V_s obtenue après correction. Comme indiqué à la section 1.6.3, la vitesse de phase ne dépend plus de la fréquence et est constante aux abords de la fréquence de résonance du couple de transducteurs. Ainsi, en connaissant la fréquence de résonance, on peut déterminer la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement.

Ainsi, à l'aide des courbes de spectre fréquentiel (encadré pourpre) il est possible de déterminer les fréquences pour effectuer l'analyse. À l'aide des encadrés rouge et jaune, on ajuste les paramètres (encadré vert) afin d'obtenir une analyse la plus fine possible. Ces deux encadrés sont liés par des paramètres communs, la modification de l'un influe sur l'autre. Il s'agit donc de constamment passer de l'un à l'autre pendant l'analyse jusqu'à ce que les courbes de correction de phase expérimentale (encadré jaune) et de correction de phase théorique (encadré rouge), d'une part, et les courbes de vitesse de phase corrigée (encadré rouge) et de vitesse de phase expérimentale (encadré rouge), d'autre part, convergent.

Dans l'exemple de la Figure 2.15, on peut voir que le spectre fréquentiel de la réception (courbe rouge de l'encadré pourpre) est étendu entre 20 kHz et 30 kHz, et que le pic est à 28,3 kHz. Ainsi, on s'attend à trouver une partie asymptotique dans la courbe de vitesse de phase expérimentale (courbe rouge, encadré rouge) entre 20 et 30 kHz. En faisant en sorte que la courbe de correction de phase expérimentale (courbe en points bleus de l'encadré jaune) coïncide à la courbe de phase théorique (courbe bleue pleine de l'encadré jaune), la courbe de vitesse de phase corrigée (courbe bleue de l'encadré rouge) se rapproche de la courbe de vitesse de phase expérimentale (courbe rouge de l'encadré rouge), et vice-versa. En ajustant avec les paramètres, on arrive à la situation présentée dans la Figure 2.15. La vitesse de l'onde de cisaillement est ainsi obtenue, en l'occurrence 475 m.s^{-1} dans l'exemple présenté à la figure

2.15, pour une hauteur de spécimen de 75 mm. Des exemples supplémentaires sont présentés en Annexe III.

2.5.4 Test des transducteurs à vide

Le test des transducteurs dits « à vide » consiste à placer les pierres poreuses / cylindres centraux des transducteurs d'un même couple en contact et d'effectuer des mesures, comme expliqué à la section 2.5.2. Une légère pression est nécessaire pour maintenir en contact les deux transducteurs, la pression des doigts suffit. Cet essai permet de vérifier le bon fonctionnement des transducteurs et de déterminer les caractéristiques propres à ceux-ci. En effet, bien que les transducteurs soient réalisés avec des moules en silicone qui permettent un placement optimal de tous les composants, des défauts peuvent être présents. La Figure 2.16 présente un exemple d'essai à vide avec le couple de transducteurs 19-16 mm.

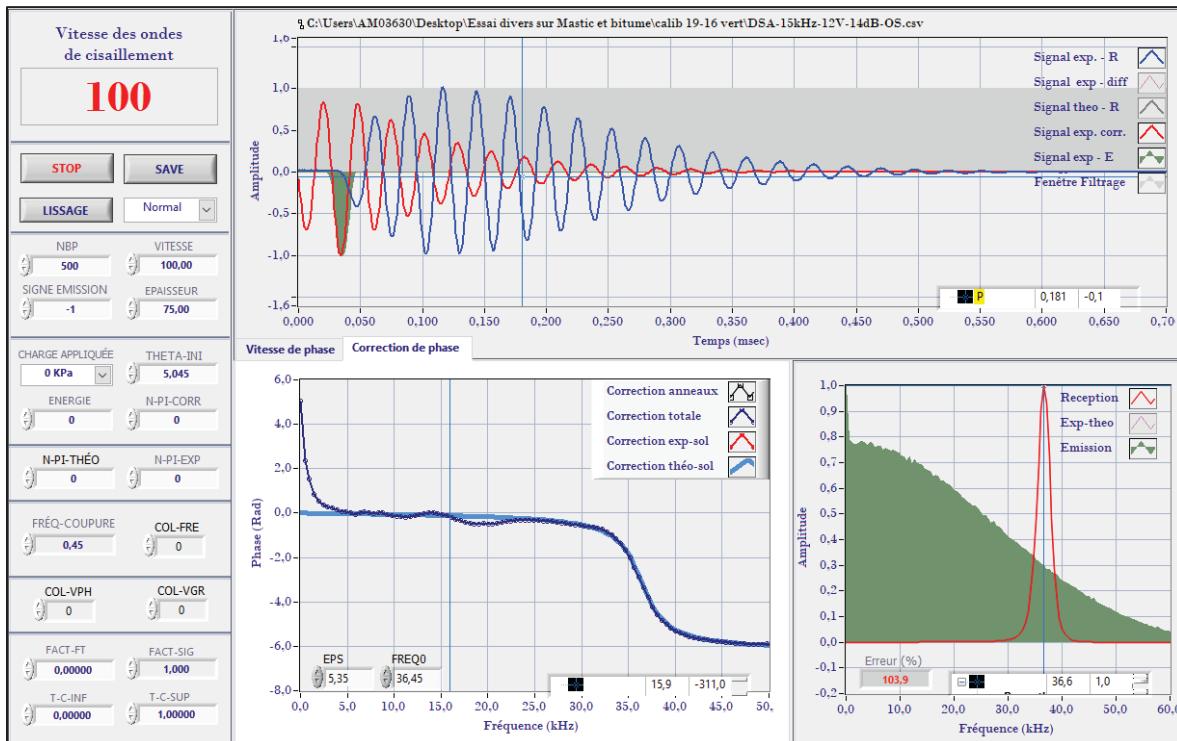


Figure 2.16 Essai à vide, transducteur 19-16 mm DSA-15kHz-12V-14dB

L'analyse fréquentielle est réalisée comme décrit à la partie 2.5.3. En ajustant les paramètres jusqu'à ce que coïncide la courbe de déphasage expérimentale à celle théorique, on obtient la fréquence de résonance propre au couple de transducteurs ainsi que son amortissement. Dans l'exemple présenté à la Figure 2.16, on obtient pour le couple de transducteurs 19-16 mm, une fréquence de résonance de 36,45 kHz et un amortissement de 5,35. Le Tableau 2.5 regroupe les valeurs de fréquence de résonance et d'amortissement des couples de transducteurs utilisés.

Tableau 2.5 Fréquences de résonance et amortissement propres aux couples de transducteurs

Couple de transducteurs	Fréquence de résonance (kHz)	Amortissement
22-16 mm	35,15	2,5
38-34 mm	16,25	1,2
51-45 mm	12,35	0,6-0,7
19-16 mm	36,45	5,3
26-22 mm A	27,65	5,4
26-22 mm B	25,55	5,4
36-31 mm	20,05	3,9
Avec capsule		
26-22 mm B	25,30	5,8
36-31 mm	19,75	3,8
38-34 mm	15,65	3,5
51-45 mm	13,60	2,5

Ces données seront utilisées dans les analyses fréquentielles avec le P-RAT par la suite. Ainsi, chaque couple de transducteurs présente des caractéristiques différentes. L'utilisation de transducteurs de taille différente (voir section 2.5.1.2) permet donc une meilleure reproductibilité de la mesure.

2.6 Méthodologie Partie 1 – Article 1

Cet article est présenté au Chapitre 3.

Les objectifs de cette étude sont d'évaluer la faisabilité de la caractérisation d'un ERF au moyen du P-RAT et du paramètre V_s . Il convient d'explorer les limites placées par le P-RAT. Enfin, des liens entre les paramètres étudiés, V_s , la perte d'eau dans les spécimens et l'amplitude des signaux recueillis sont effectués. Pour ce faire, des plaques d'ERF sont réalisées et V_s est mesurée pendant la cure.

2.6.1 Montage expérimental

2.6.1.1 Spécimens cylindriques

Les spécimens cylindriques sont déposés sur un support en mousse. Un couple de transducteurs est utilisé à la fois. Les transducteurs sont placés sur le spécimen et maintenus en place par un serre-joint. La Figure 3.2 A présente cette configuration. Les transducteurs utilisés dans cette phase sont les couples 51-45 mm, 38-34 mm et 22-16 mm avec pierre centrale en acier fritté. Finalement, les éléments présentés à la section 2.5.2 sont utilisés pour la génération et l'acquisition des signaux.

2.6.1.2 Plaques d'ERF

Lors de la réalisation d'une plaque d'ERF au compacteur de plaque LPC, une plaque support est nécessaire afin de transporter le spécimen, du fait de sa fragilité. Une plaque support en PVC a été fabriquée. Celle-ci sert à la fois au transport et à l'instrumentation de la plaque d'ERF. La plaque support est percée de trois orifices. Ces orifices accueillent des porte-transducteurs conçus pour permettre une mise en place rapide des transducteurs inférieurs, ainsi qu'un bon alignement de ceux-ci. Il est également possible d'échanger simplement les couples de transducteurs.

Pour ne pas endommager les transducteurs lors du compactage de la plaque d'ERF, des bouchons en acier remplacent les porte-traducteurs (voir Figures 2.17 et 2.18) lors du compactage. Lors de la confection de la plaque d'ERF, la plaque support est placée dans le fond du moule et le spécimen est compacté par-dessus. Après le compactage, les transducteurs supérieurs sont alignés avec leurs pendants inférieurs à l'aide d'un gabarit.



Figure 2.17 Plaque support avec bouchon à gauche et porte transducteur 38-34 mm à droite



Figure 2.18 Bouchon en acier à gauche et porte transducteur 38-34 mm à droite

En parallèle des essais de P-RAT, une balance est utilisée afin de mesurer la masse de la plaque support et de la plaque d'ERF. La masse d'eau perdue dans le spécimen est déterminée par la suite. Des thermocouples branchés à un multimètre sont posés en surface de la plaque d'ERF pour mesurer la température en surface.

Finalement, les éléments présentés à la section 2.5.2 sont utilisés pour la génération et l'acquisition des signaux. Les transducteurs utilisés dans cette étude sont les suivants : 22-16 mm, 38-34 mm et 51-45 mm avec pierres en acier fritté.

2.6.2 Procédure expérimentale

2.6.2.1 Spécimens cylindriques

Les cylindres réalisés avec la presse Marshall ont été conservés dans leur moule un jour avant d'être démoulés. Les premiers essais ont été réalisés avec les moules présents. Le spécimen réalisé à la PCG a été testé trois heures après le compactage.

Un premier couple de transducteurs est installé pour émettre et recueillir les signaux. Ensuite, un second couple de transducteurs est mis en place, et la même procédure est répétée. Enfin, un mastic bitumineux est appliqué à l'interface entre les spécimens et les transducteurs. Le mastic bitumineux est composé de sable et de bitume PG 58S-28. Les signaux sont analysés conformément à la section 2.5.3.

2.6.2.2 Plaques d'ERF

Après le compactage de la plaque d'ERF, les bouchons sont retirés et les porte-transducteurs sont mis à leur place. Suite aux résultats des essais préliminaires, un mastic est appliqué à l'interface entre les transducteurs et la plaque d'ERF afin de permettre un bon contact. Les transducteurs supérieurs sont alignés à ceux inférieurs. Les trois couples de transducteurs sont laissés en place sur la plaque d'ERF pendant toute la durée de l'essai. La Figure 3.2 B présente cette configuration.

Par la suite, une mesure est un point spécifique dans le temps après le compactage. Une mesure s'effectue comme suit :

- Étape 1 : Un couple de transducteurs est branché au montage de génération et d'acquisition de signaux;
- Étape 2 : Différents signaux, de formes et de fréquences variées, sont émis et reçus, selon la procédure de la section 2.5.2. Une fois qu'un nombre suffisant de signaux est recueilli (entre 10 et 15), le couple de transducteurs est retiré. Ce nombre permet d'obtenir suffisamment de signaux exploitables. De plus cela permet de rendre l'analyse plus robuste et objective, si des signaux différents donnent des résultats identiques;
- Étape 3 : Répéter les étapes 1 et 2 avec un autre couple de transducteurs;
- Étape 4 : Lorsque tous les signaux ont été collectés, les transducteurs sont débranchés et la plaque support, la plaque d'ERF et les transducteurs sont placés sur la balance et la masse est mesurée;
- Étape 5 : La température de surface est mesurée.

Le Tableau 2.6 compile les informations relatives à la prise de mesure des signaux pour les deux plaques testées.

Tableau 2.6 Informations relatives à la prise de mesure pour les deux plaques d'ERF

Spécimen	Plaque 1	Plaque 2
Délai entre la fin du compactage et la première mesure de masse (min)	75	60
Délai entre la fin du compactage et la première mesure de V_s (min)	90	90
Nombre de couples de transducteurs utilisés	3	3
Nombre de mesures (Étapes 1 à 5)	31	33
Nombre de signaux collectés	1206	967
Temps de cure (jours)	16	37

À la fin de la campagne expérimentale, les transducteurs sont retirés. La plaque est mise dans une étuve pendant 1 journée à 110°C et la masse sèche est mesurée. Les signaux sont analysés comme indiqué à la section 2.5.3.

2.6.3 Modification apportée au modèle Michaelis-Menten

La section 1.4.4 présente le modèle Michaelis-Menten (MM). Il apparaît que dans sa forme classique, le modèle MM débute forcément à 0 pour t=0. Ceci n'étant pas toujours réaliste, une modification est apportée sous la forme d'une constante A. L'équation 2.1 présente le modèle MM modifié qui est utilisé dans le présent document.

$$Y(t) = A + \frac{B \cdot t}{C + t} \quad (2.1)$$

Avec A qui est la valeur à l'origine et A+B qui représente la valeur asymptotique du paramètre Y et C qui est le temps de demi-vie pour lequel Y(t) = A + B/2.

2.7 Méthodologie Partie 2 – Article 2

Cet article est présenté au Chapitre 5.

Le but ici est d'évaluer l'évolution de V_s au cours du temps, et surtout en très jeune âge directement après le compactage. De plus, l'influence du comportement thermique des spécimens testés sur l'évolution des propriétés mécaniques est explorée. Enfin, l'influence de la teneur en vide sur les valeurs de V_s est étudiée.

Pour ce faire, le paramètre V_s est obtenu au moyen du P-RAT. La teneur en eau dans le mélange, la température de surface du spécimen et la température ambiante sont également mesurées.

2.7.1 Montage expérimental

Le montage expérimental se compose des éléments présentés à la section 2.5.2 ainsi que d'une plaque de bois recouverte d'une couche de mousse. La cure des spécimens ayant à peine débuté lors des premières mesures, la mousse permet de ne pas endommager les spécimens et de les maintenir en place. La plaque est disposée sur une balance. La Figure 2.19 présente le montage, avec un spécimen équipé de transducteurs piézoélectriques.



Figure 2.19 Montage expérimental. Le spécimen reposant sur la mousse est instrumenté avec le couple de transducteurs 26-22 mm A

Les transducteurs piézoélectriques sont maintenus sur le spécimen à l'aide d'élastiques. Le placement des transducteurs est effectué à l'aide d'un gabarit. Les transducteurs piézoélectriques utilisés pendant cette étude sont le 19-16 mm, le 26-22 mm A, le 26-22 mm B et le 36-31 mm.

Mesure de la température

La température ambiante est mesurée à l'aide d'un thermomètre numérique. La température en surface des spécimens est mesurée à l'aide d'une caméra thermique E-64501 de chez FLIR. Des photographies thermiques sont prises et analysées par la suite avec le programme dédié Flir Thermal Studio. La Figure 2.20 présente une image thermique en cours d'analyse.

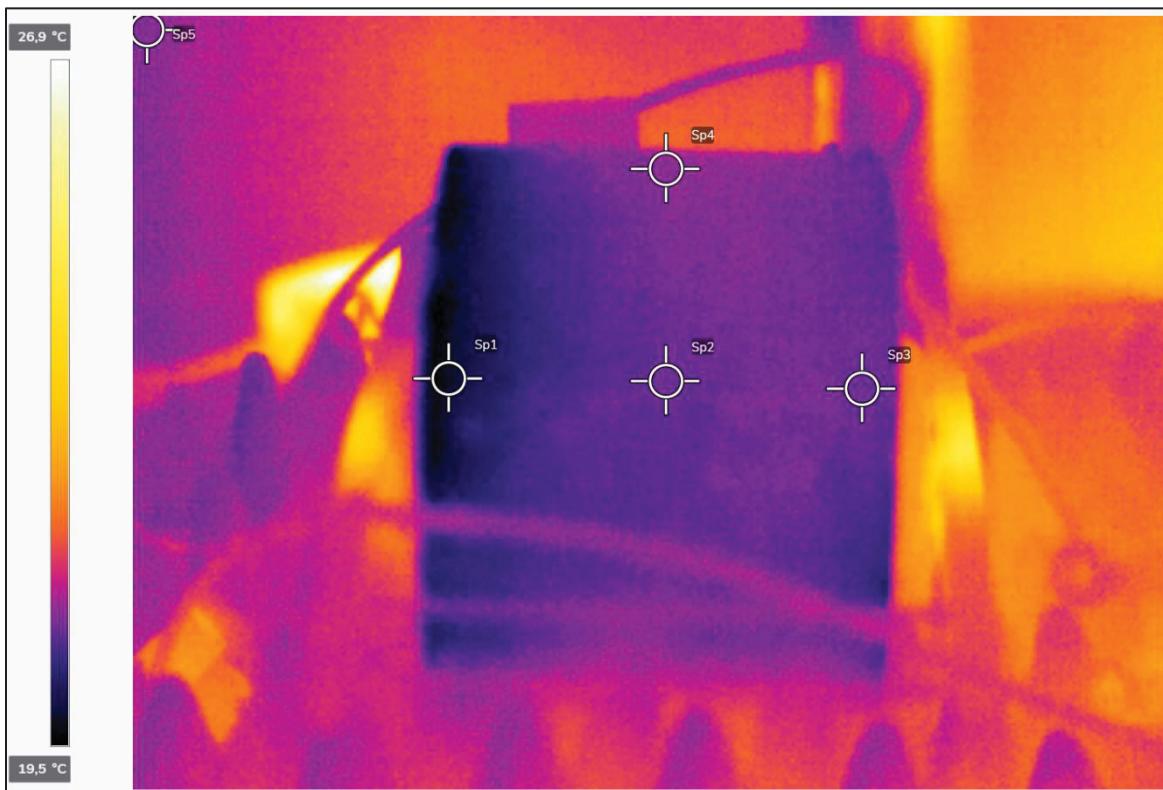


Figure 2.20 Image thermique traitée avec le programme Flir Thermal Studio

Cinq points de mesures sont utilisés. Les valeurs de Sp1, Sp2 et Sp3 sont utilisées pour déterminer la température en surface. Le point Sp4 sert de contrôle. Enfin, le point Sp5 est utilisé comme référence pour la température ambiante. En comparant la valeur de Sp5 à la température ambiante mesurée, une correction est apportée à la moyenne des points Sp1 à Sp3. Il est considéré que la température de surface et la température au cœur du spécimen sont différentes.

2.7.2 Procédure expérimentale

2.7.2.1 Volet Évolution

Les spécimens testés dans ce volet sont les spécimens C-12, C-15 et C-17, présentés à la section 2.4.2.

Dans cette étude, on appelle mesure un point spécifique dans le temps après le compactage. Dans l'article présenté au Chapitre 5, on utilise le terme anglais *measurement*. Une mesure s'articule comme suit :

- Étape 1 : Un couple de transducteurs est installé de part et d'autre du spécimen, de façon à ce que les deux transducteurs soient bien alignés (utilisation d'un gabarit). Afin de limiter les effets de bord, les transducteurs sont placés au centre de la surface de contact. Si cette zone n'offre pas un bon contact, les transducteurs sont décalés de quelques millimètres. Les transducteurs sont maintenus en contact avec l'échantillon à l'aide d'élastiques.
- Étape 2 : Différents signaux, de formes et de fréquences variées, sont émis et reçus, selon la procédure de la section 2.5.2. Le nombre de signaux oscille entre 8 en très jeune âge, et 15 par après, afin d'obtenir suffisamment de signaux exploitables. De plus, cela permet de rendre l'analyse plus robuste et objective, si des signaux différents donnent des résultats identiques. Par la suite, le couple de transducteurs est retiré;
- Étape 3 : Répéter les étapes 1 et 2 avec un autre couple de transducteurs
- Étape 4 : Lorsque tous les signaux ont été collectés, la masse du spécimen est mesurée.
- Étape 5 : Une image thermique est prise avec la caméra thermique, et la température ambiante est relevée.

L'écart temporel, entre chaque mesure, est défini en avance par une planification. Les Figures 2.21, 2.22 et 2.23 représentent la planification des mesures pour les spécimens C-17, C15 et C-12 respectivement. Le détail des mesures peut être consulté aux Tableau-A IV-1 à IV-3, pour les spécimens C-17, C-15 et C-12, respectivement. Afin de bien identifier la répartition des mesures pendant toute la durée de l'essai, quatre classes sont présentées dans les Figures

2.21, 2.22 et 2.23. Celles-ci sont de un jour, huit heures, quatre heures et une heure. Il apparaît, par exemple dans le cas du spécimen C-12 (Figure 2.23), que 28 mesures sont prévues lors du premier jour de cure (classe un jour), dont 23 pendant les huit premières heures (classe huit heures) parmi lesquelles neuf seront réalisées durant la première heure de cure (classe une heure). Dans les Figures 2.21 à 2.23, les classes 8 heures n'apparaissent plus après un jour, pour ne pas surcharger les figures.

Le spécimen C-17 ayant été testé en premier, des modifications ont été apportées aux planifications des spécimens C-15 et C-12. L'objectif principal étant d'évaluer le comportement en très jeune âge, la première mesure est effectuée rapidement après la fin du compactage et la répartition des mesures sur 30 jours est présentée dans les Figures 2.21, 2.22 et 2.23. Le délai entre les premières mesures étant faible, seul un couple de transducteurs est utilisé lors des premières mesures, pour des raisons pratiques. Le Tableau 2.7 rassemble les informations relatives à la prise de mesure des signaux pour les trois spécimens testés dans le volet évolution.

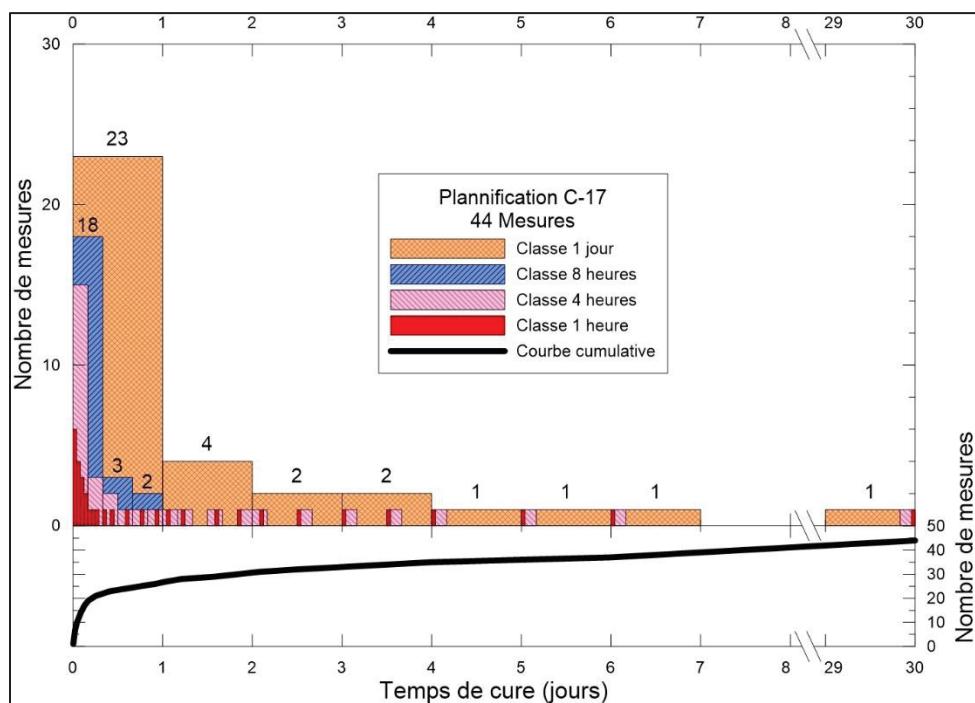


Figure 2.21 Planification des mesures pour le spécimen C-17

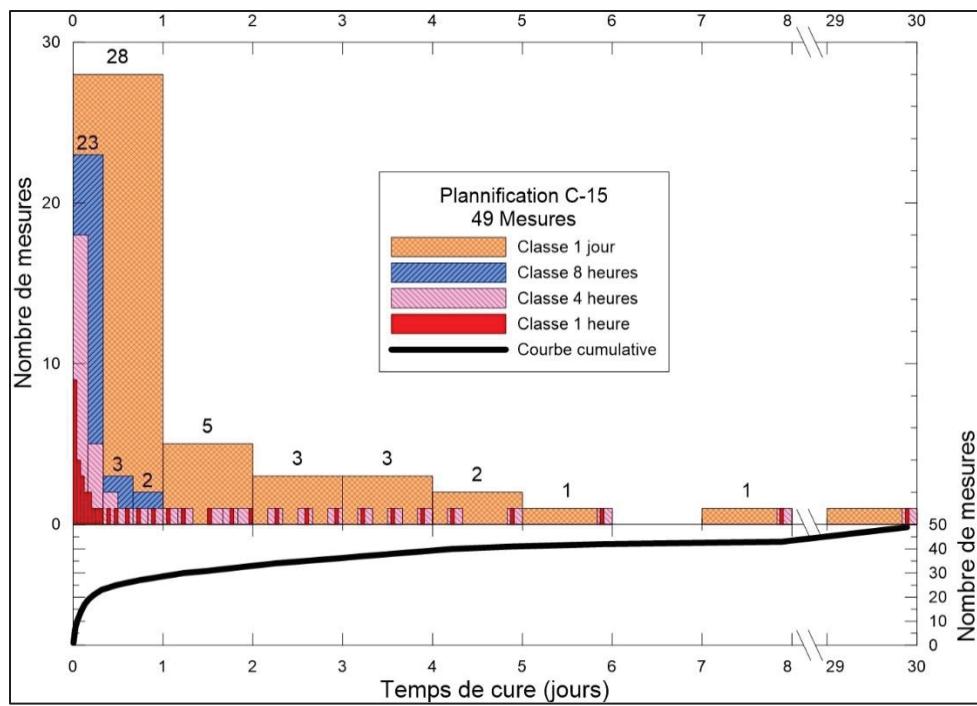


Figure 2.22 Planification des mesures pour le spécimen C-15

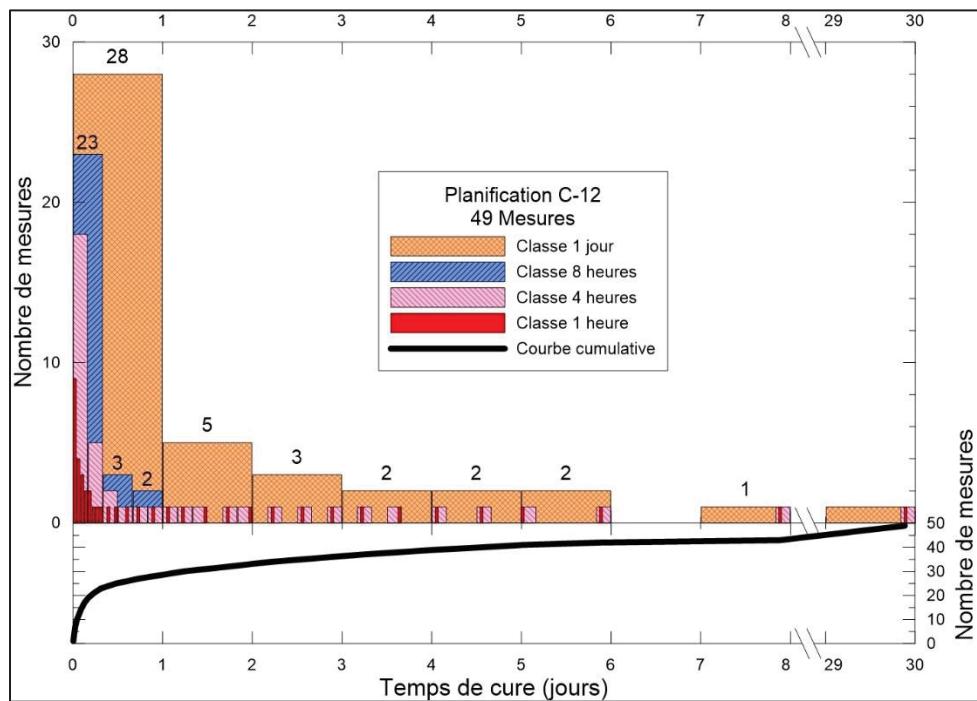


Figure 2.23 Planification des mesures pour le spécimen C-12

Tableau 2.7 Informations relatives à la prise de mesure pour les spécimens C-17, C-15 et C-12

Spécimen	C-17	C-15	C-12
Délai entre la fin du compactage et la première mesure (min)	10	12	10
Mesures planifiées	44	49	49
Mesures effectuées (dont avec un seul couple de transducteurs)	39(9)	49(7)	47(7)
Nombre de couples de transducteurs utilisés	3	4	4
Nombre de signaux collectés	1165	1981	1606
Durée de la cure (jour)	30	30	30

Les signaux enregistrés sont par la suite analysés comme indiqué à la section 2.5.3

2.7.2.2 Volet Contrôle

Les spécimens testés dans ce volet sont les spécimens Contrôle-17_1 à 3, Contrôle-12 et Contrôle-10_1 à 3, présentés à la section 2.4.2. Comme indiqué à la section 2.4.2, les spécimens du volet contrôle ont subi une cure accélérée à l'étuve. L'évolution de la teneur en eau dans les spécimens Contrôle-17_1 à 3 est mesurée pendant les 7 jours de cure. Pour cela, les spécimens sont sortis de l'étuve et pesés sur une balance. Les spécimens sont immédiatement remis dans l'étuve. Un délai de quelques heures entre chaque prise de mesure est observé. De plus, des mesures de V_s au moyen du P-RAT sont effectuées sur le spécimen Contrôle-17_3 au cours de la cure.

Les mesures de V_s sont effectuées de façon similaire à la méthode présentée à la section 2.7.2.1 avec les modifications suivantes :

- Avant de procéder à l'étape 1 de la méthode de la section 2.7.2.1, le spécimen est laissé une heure à température ambiante pour refroidir à la sortie de l'étuve.
- La température de surface n'est pas mesurée (étape 5)
- Le spécimen est remis à l'étuve par la suite

Onze mesures ont été effectuées pendant les 7 jours de cure. Par la suite, le spécimen a été laissé à l'air libre et deux mesures supplémentaires ont été réalisées à 36 et 49 jours de cure.

Concernant les spécimens Contrôle-12 et Contrôle-10_1 à 3, la mesure de V_s est effectuée comme décrit plus haut, après que la cure de 4 jours à l'étuve et 1 jour à température ambiante soit terminée. Les signaux enregistrés sont par la suite analysés comme indiqué à la section 2.5.3.

2.8 Méthodologie Partie 3 - Article 3

Cet article est présenté au Chapitre 7.

Le but est d'évaluer le comportement anisotropique d'un ERF au moyen de V_s . Le P-RAT est utilisé pour mesurer V_s dans trois directions différentes. Des mesures d'UPV sont également réalisées à titre de comparaison. Les mesures de vitesse d'onde sont mises en relation avec des essais de module complexe. Enfin, une analyse 3D permet d'évaluer l'orientation des granulats dans le mélange testé.

2.8.1 Montage expérimental de la mesure de V_s

Le montage expérimental se compose des éléments présentés à la section 2.5.2. La section de plaque est instrumentée avec un couple de transducteurs dans la direction 1, 2 ou 3, comme présenté à la Figure 2.6. Les transducteurs sont placés aux centres des faces concernées et sont maintenus en place à l'aide d'élastiques. Différents signaux, de formes et de fréquences variées, sont émis et reçus, selon la procédure de la section 2.5.2. Une quinzaine de signaux est recueillie, puis le couple de transducteurs est retiré. On procède de même avec un autre couple de transducteurs.

Les transducteurs piézoélectriques utilisés pendant cette étude sont le 19-16 mm, le 26-22 mm A (avec et sans capsule), le 26-22 mm B (avec et sans capsule), le 36-31 mm (avec et sans capsule) et 51-45 mm avec capsule.

2.8.2 Essai UPV

Les essais d'UPV sont réalisés avec le système Pundit 200 (Proceq, Screen Eagle). Des capteurs de compression et de cisaillement sont utilisés. Les fréquences naturelles des capteurs sont 54 kHz et 250 kHz, pour les ondes P et S, respectivement, selon le fabricant.

Conformément aux instructions du fabricant, un gel de couplage est utilisé à l'interface entre les capteurs et le spécimen, afin de permettre une bonne transmission des ondes. Les capteurs sont alignés l'un avec l'autre.

Les signaux collectés sont par la suite analysés dans le logiciel PL-Link. Comme expliqué à la section 1.5.2, le temps de vol de l'onde est déterminé et, connaissant la taille du spécimen testé, la vitesse de l'onde est calculée. De plus, afin d'analyser l'onde de cisaillement, il est nécessaire d'obtenir préalablement le signal de l'onde de compression. Une comparaison des deux signaux est censée permettre de distinguer la composante de compression dans le signal de l'onde de cisaillement.

2.8.3 Essai de traction-compression dynamique

Les spécimens Slab2_1C, Slab2_3C et Slab2_4C ont été testés dans la presse MTS. Le spécimen 1 s'est brisé en cours d'essai. Les spécimens ont été collés sur des supports en acier à l'aide d'une résine époxy. La Figure 2.24 présente le spécimen 3 instrumenté dans la chambre thermique de la presse MTS.



Figure 2.24 Spécimen 3 installé dans la chambre thermique de la presse MTS et instrumenté, avant essai

Les spécimens sont équipés de 3 extensomètres de 50 micromètres dans la direction axiale ainsi que des sondes de températures. Une chaînette est utilisée pour évaluer le déplacement radial, dans l'optique de calculer le coefficient de Poisson.

Les spécimens sont testés à des fréquences de 1, 0,3, 0,1, 0,03 et 0,01 Hz. Les températures d'essai pour le spécimen Slab2_3C sont 40, 30, 20, 10, 0, -10 et -20°C. Pour les spécimens Slab2_3C avec chaînette et Slab2_4C avec chaînette, les températures d'essai sont 25, 15, 5, -

5, -15, -25 et -35°C. Du fait de la fragilité des spécimens, une température plus basse a été choisie pour les spécimens Slab2_3C et Slab2_4C avec chainette. Les microdéformations visées sont de 50 µm/m.

Les données sont analysées en suivant une procédure dédiée et modélisées à l'aide du modèle 2S2P1D présenté à la section 1.3.3.

2.8.4 Essai de tomodensitométrie assistée par ordinateur (CT-Scan)

Les spécimens cylindriques sont balayés avec un XTH-255 de chez Nikon et un FF35 de chez Yxlon (groupe Comet). Les reconstructions 3D sont analysées avec le logiciel Dragonfly de Object Research System (groupe Comet).

Le choix des paramètres d'émission de la source de rayons X a été effectué par l'opérateur. Les paramètres doivent permettre une bonne transmission des ondes, sans pour autant émettre trop d'énergie qui pourrait altérer la qualité et le contraste des images obtenues. Pour le XTH-255, les paramètres de l'émission sont une tension de 210 kV et une intensité de 210 µA. Concernant le FF35, la tension choisie est de 209 kV et l'intensité est de 108 µA.

Une fois les acquisitions au tomodensitomètre effectuées et les images 3D reconstruites, la première étape consiste à filtrer les images afin de faciliter la segmentation. La Figure 2.25 présente une illustration de l'application d'un filtre gaussien. On observe une perte de netteté de l'image, mais il y a réduction du bruit dans l'image.

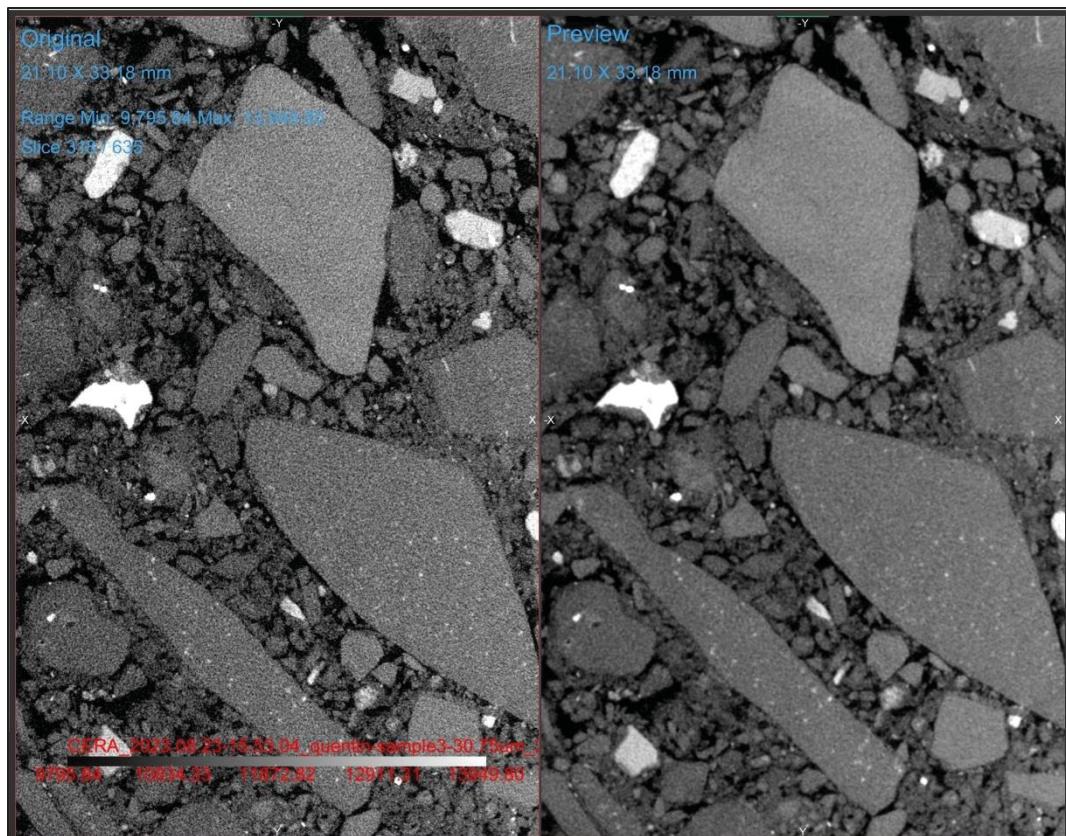


Figure 2.25 Illustration de l’application d’un filtre gaussien 3D de taille 5 voxels; à gauche image d’origine; à droite image filtrée; spécimen Slab2_3C

Lors de la reconstruction de l’image 3D, un phénomène de *beam hardening* peut apparaître. Cela entraîne en une hétérogénéité des valeurs de l’intensité dans l’image, comme présenté dans la Figure 2.26. En effet, la périphérie du cylindre présente une intensité plus grande que le centre, et ce pour un matériau similaire qui devrait donc avoir la même intensité. Un filtre RBF (*radial basis function*) peut être appliqué afin de corriger ce défaut. La Figure 2.27 illustre le procédé.

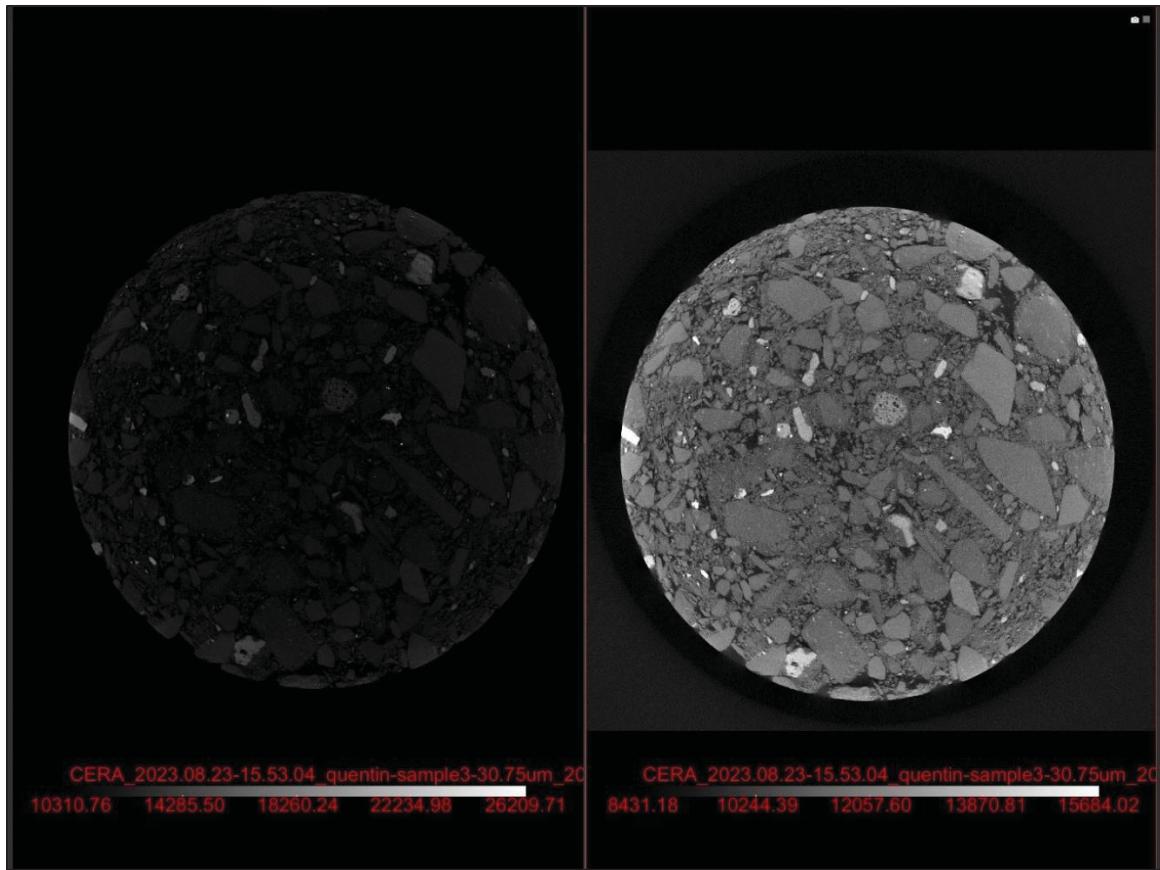


Figure 2.26 Illustration de l'hétérogénéité des intensités, à gauche avec un fort contraste, à droite contraste régulier

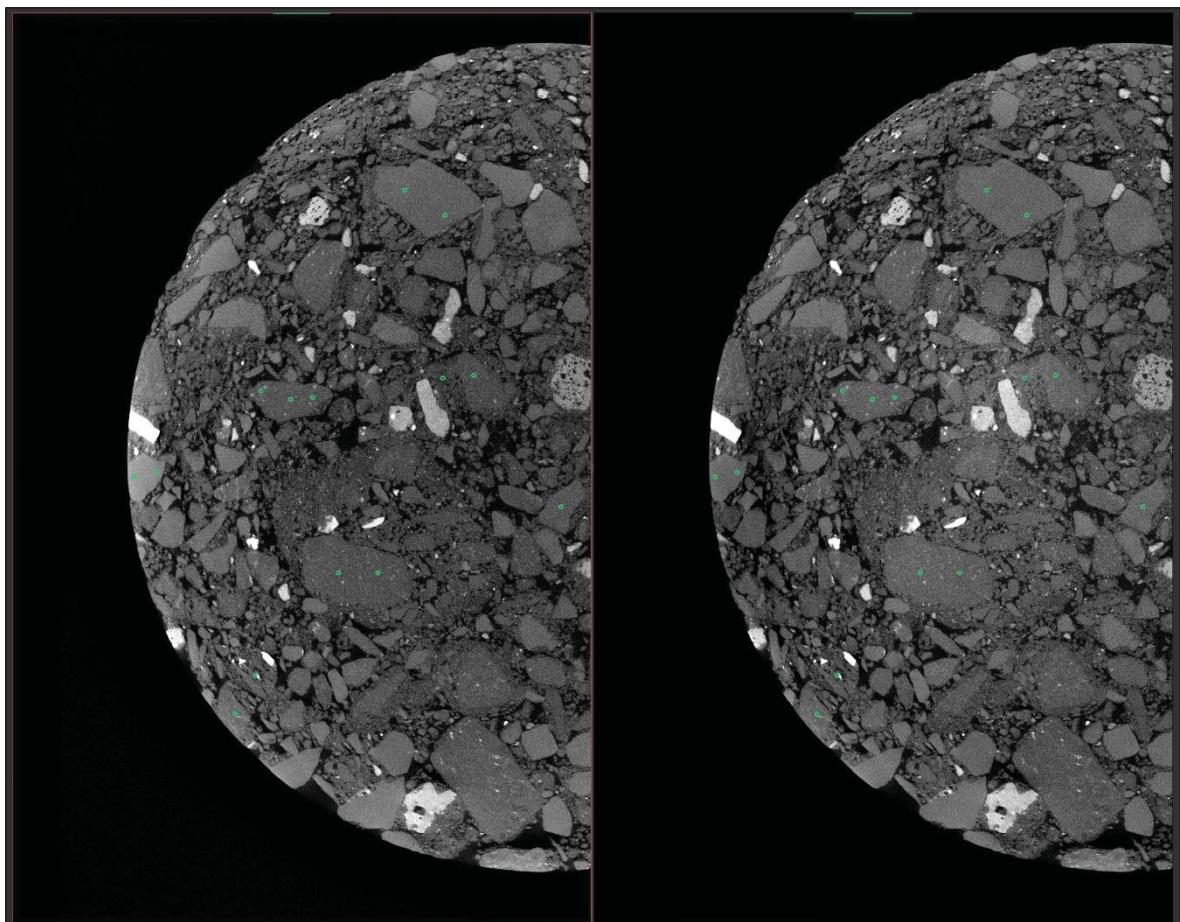


Figure 2.27 Illustration du filtre Manual RBF; à gauche l'image d'origine ; à droite l'image filtrée; le contraste est similaire pour les 2 images, les points verts sont disposés manuellement comme référence pour le filtre

Les granulats sont ensuite segmentés afin de pouvoir identifier (*labelized*) un à un les granulats. Deux techniques de segmentation sont utilisées. Pour le spécimen 3, une segmentation par seuil de niveau de gris a d'abord été utilisée afin de séparer les granulats du reste de l'échantillon. Par la suite, des opérations morphologiques ont été appliquées. Ces opérations consistent à ajouter ou retirer un nombre défini de voxels à la périphérie d'un ensemble. La Figure 2.28 présente un exemple général d'opération morphologique d'érosion. La Figure 2.29 illustre l'application de cette opération dans la segmentation d'un spécimen d'ERF. Il y a une perte de matière sur les granulats, mais la forme et l'orientation restent les mêmes.

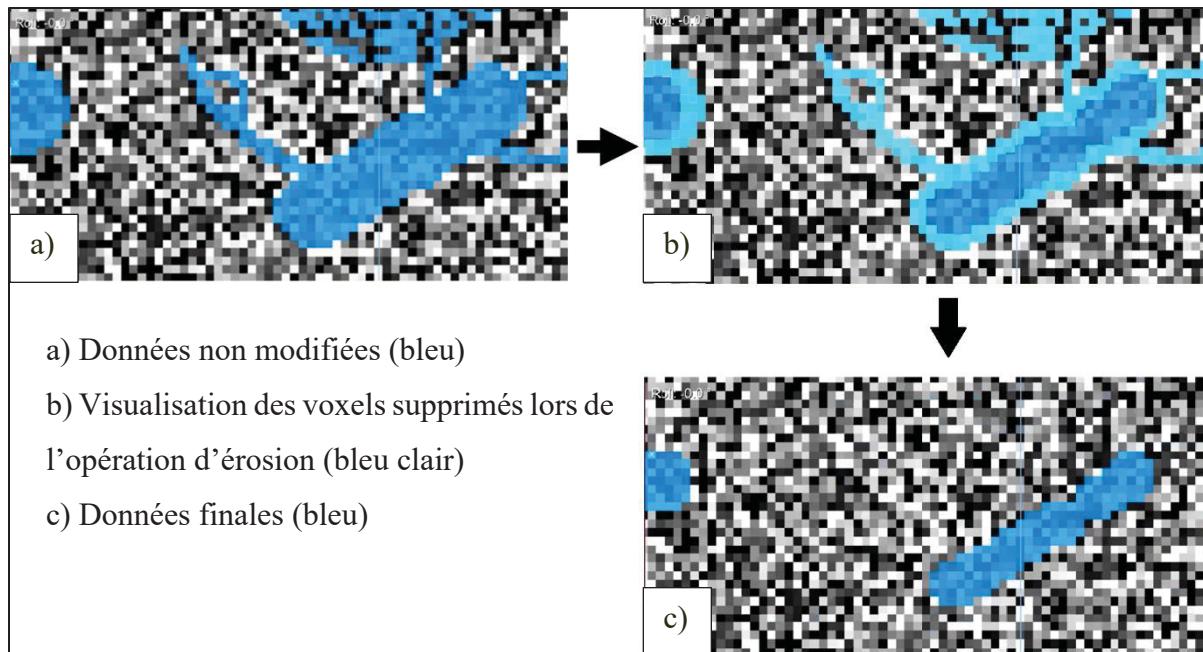


Figure 2.28 Exemple de l'opération morphologique d'érosion de taille 3 voxels

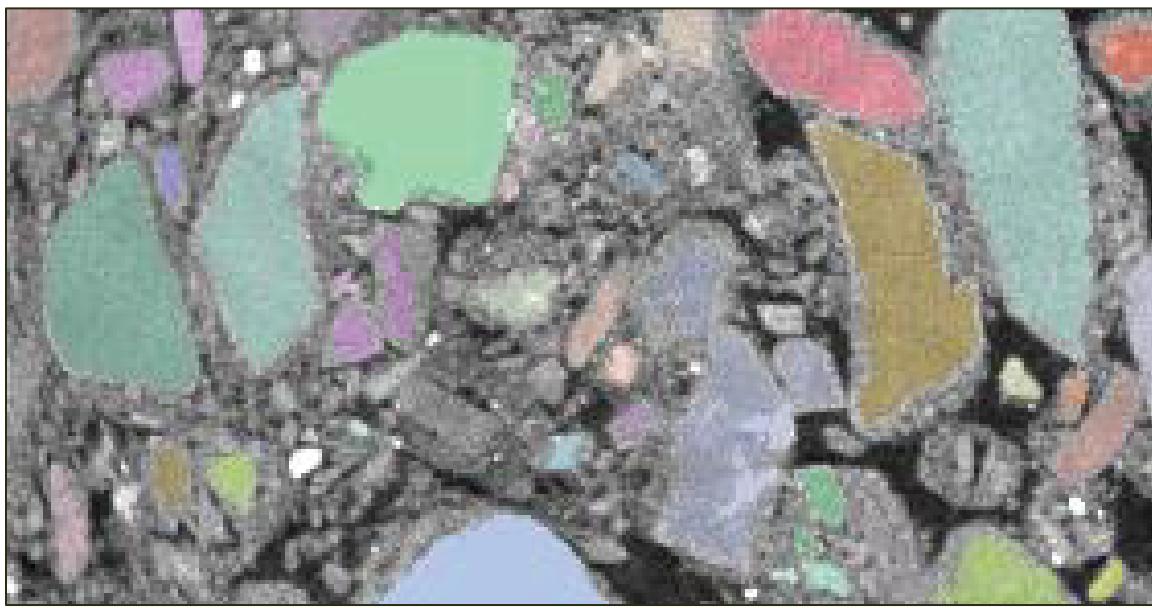


Figure 2.29 Segmentation des granulats dans le spécimen Slab2_3C. L'opération morphologique d'érosion a été appliquée

Pour les spécimens 2 et 4, une méthode d'apprentissage automatique (machine learning) via l'outil *Segmentation Wizard* de Dragonfly a été utilisée. Avec cette technique, on fournit un

exemple grossier de segmentation réalisée à la main au programme, qui va générer un modèle de segmentation. L'utilisateur applique des corrections à ce modèle en rectifiant manuellement la segmentation proposée et le programme affine son modèle. Lorsque suffisamment de données sont disponibles, le programme va s'entraîner de lui-même et proposer un modèle de segmentation plus robuste et plus fiable, statistiquement. Une fois ce modèle appliqué à l'image 3D, quelques opérations morphologiques ont tout de même été appliquées afin de séparer certains granulats. La Figure 2.30 résume le procédé de segmentation.

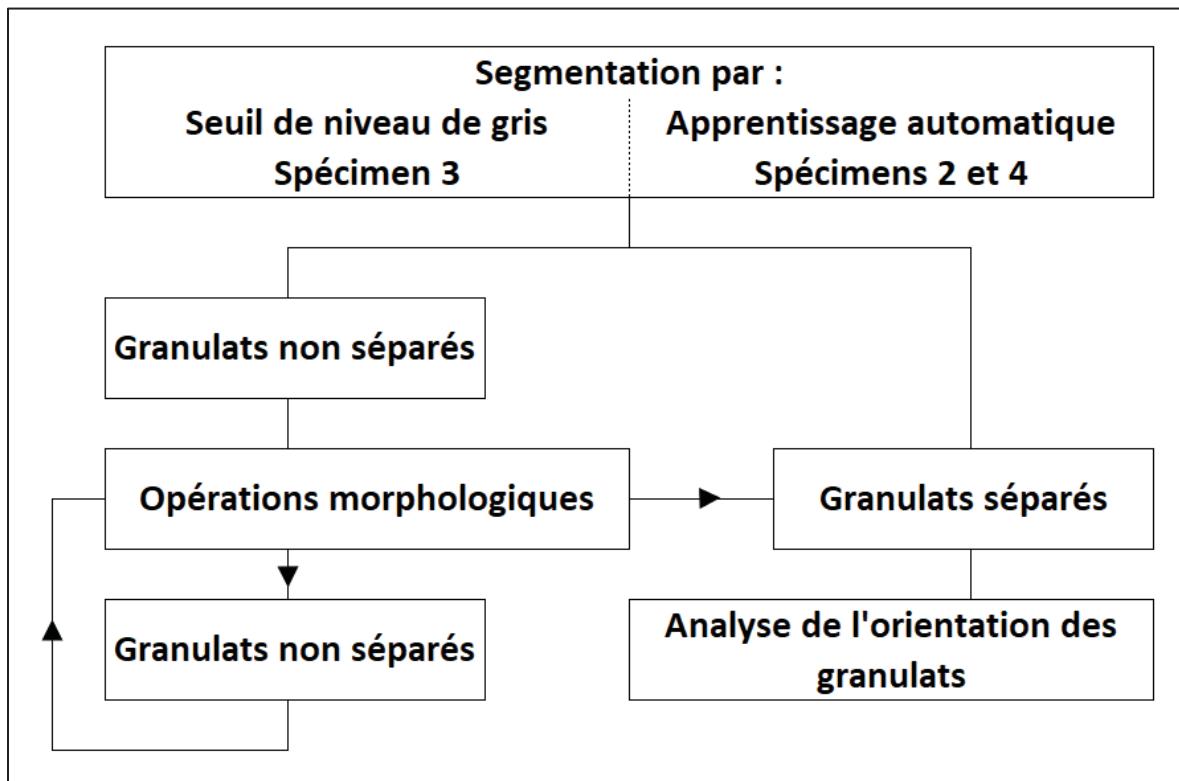


Figure 2.30 Représentation schématique du processus de segmentation

Une fois la segmentation terminée, le volume des granulats ainsi que les paramètres d'orientation dans l'espace sont obtenus. Dans Dragonfly, l'orientation d'un élément discret est déterminée selon l'orientation de son axe le plus long (valeur propre la plus faible du tenseur d'inertie). La Figure 2.31 présente les paramètres décrivant l'orientation selon le logiciel. Thêta (θ) est l'angle entre l'axe X et la projection de l'axe le plus long de l'objet dans le plan XY,

phi (Φ) est l'angle entre l'axe Z et l'axe le plus long de l'objet. Si la particule est parfaitement sphérique ou cubique, une valeur arbitraire de 0 ou 90 ° est attribuée.

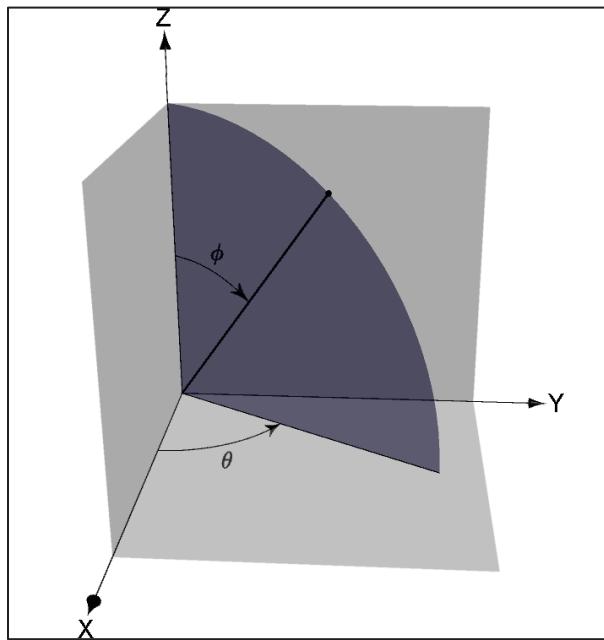


Figure 2.31 Orientation des particules dans le logiciel Dragonfly

La segmentation permet également d'obtenir la teneur en vide du spécimen testé. Si les filtres cités précédemment permettent un bon contraste de l'image, une simple segmentation par seuil de niveau de gris est effectuée. Dans le cas contraire, un filtre CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*) ou égalisation d'histogramme adaptatif limité par contraste en français, est utilisé. Ce filtre permet d'égaliser le contraste dans l'image, comme présenté dans la Figure 2.32, où la plage d'intensité des valeurs de gris passe de 6 000 - 15 000 à 20 000 – 65 000. Il apparaît cependant que le filtre CLAHE s'effectue sur une image et agit localement. Cela peut aboutir à une hétérogénéité des intensités au sein des différentes tranches de l'image 3D, comme illustré à la Figure 2.33. Il y apparaît que les tranches composant l'image n'ont pas la même intensité (différentes teintes de gris). Cela provoquera des erreurs lors de la segmentation par seuil de niveau de gris des granulats. En effet, dans la Figure 2.33 on remarque qu'un même granulat qui devrait avoir la même intensité de gris, du fait de sa

composition minérale homogène, peut être strié de plusieurs teintes de gris. Donc au sein d'un même ensemble, plusieurs intensités de niveau de gris sont présentes.

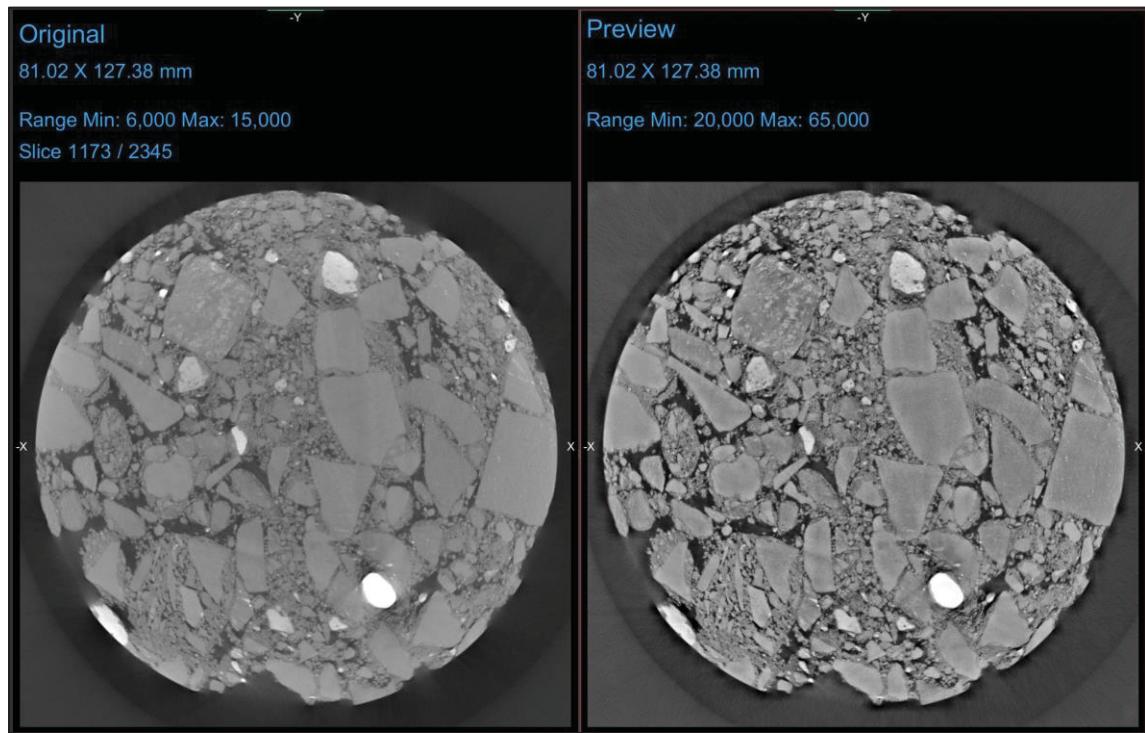


Figure 2.32 Illustration du filtre CLAHE. À gauche, l'image d'origine; à droite, l'image filtrée qui présente un plus fort contraste

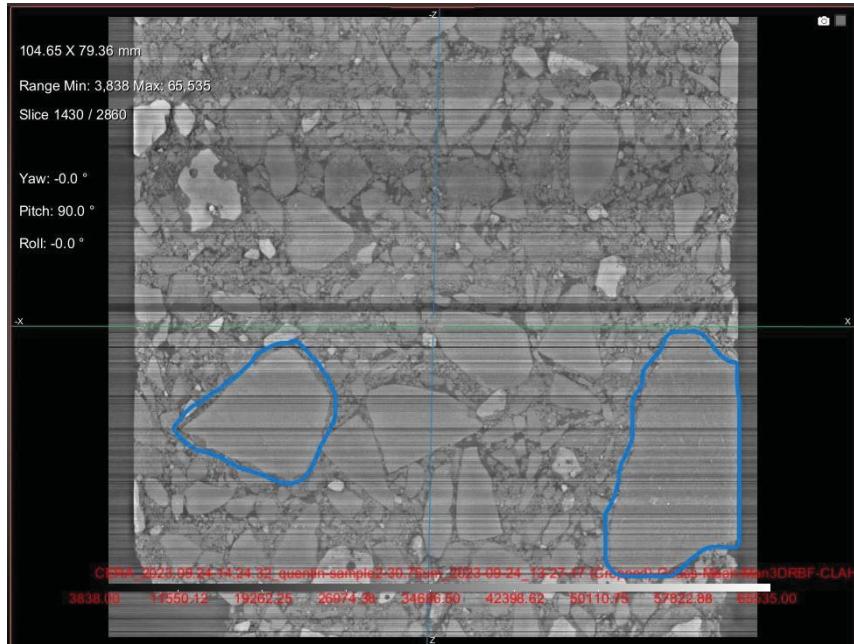


Figure 2.33 Illustration de l'hétérogénéité possible au sein de l'image 3D à la suite de l'application d'un filtre CLAHE sur le spécimen Slab2_2C

2.8.5 Procédure expérimentale

2.8.5.1 Essais sur les sections de plaque

Les mesures de V_s au moyen du P-RAT sont effectuées comme suit :

- Étape 1 : Un couple de transducteurs est placé sur la section de plaque testée dans la direction 1 (voir Figure 2.34). Les transducteurs sont alignés l'un avec l'autre. Idéalement, les transducteurs sont placés au centre de la surface concernée. Si un défaut local ne permet pas un bon contact entre le transducteur et le matériau, les transducteurs sont décalés de quelques mm;
- Étape 2 : Différents signaux de formes et de fréquences variées sont émis et reçus, selon la procédure de la section 2.5.2;
- Étape 3 : Répéter les étapes 1 et 2 avec un autre couple de transducteurs;
- Étape 4 : Lorsque tous les signaux sont collectés pour une direction, on répète les étapes 1 à 3 dans les directions 2 et 3;
- Étape 5 : Répéter les étapes 1 à 4 pour les autres sections de la plaque.

Par la suite, les dimensions des spécimens sont mesurées. Les signaux sont analysés comme indiqué à la section 2.5.3.

Enfin, des mesures de V_p et de V_s sont réalisées avec l'UPV dans les trois directions pour les sections de la plaque 2, selon les éléments décrits à la section 2.8.2. Les essais sont tout d'abord réalisés avec les capteurs d'ondes de compression du système PUNDIT, puis les capteurs sont échangés avec ceux de cisaillement du système PUNDIT.

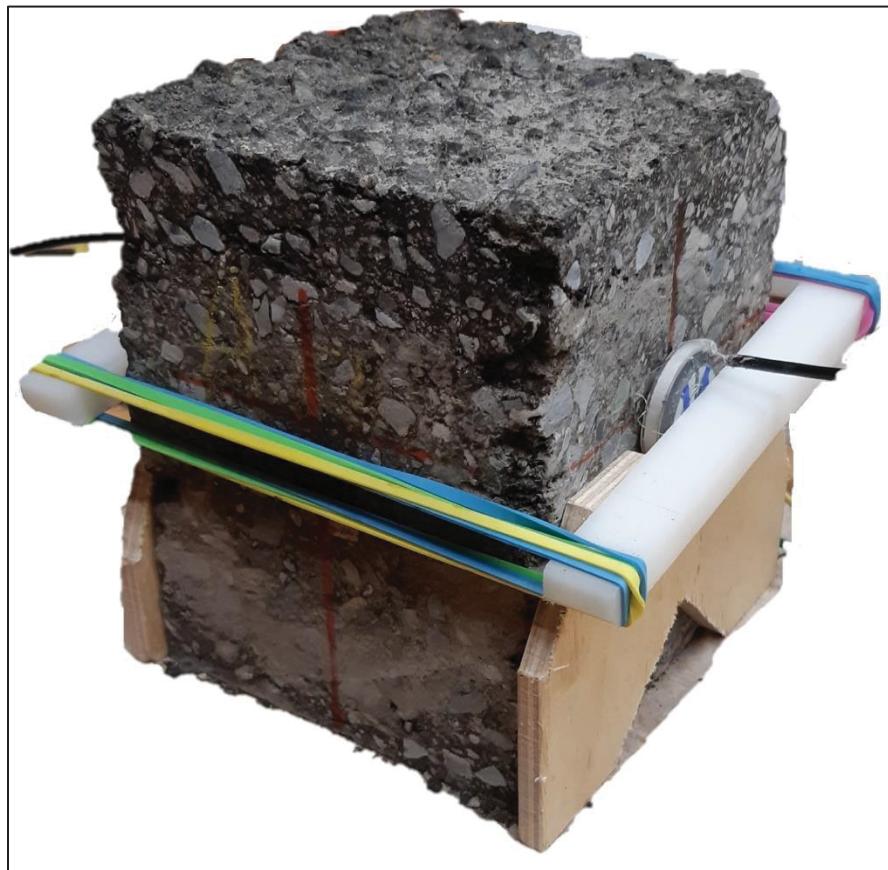


Figure 2.34 Spécimen Slab1_7 équipé du couple de transducteur
26-22 mm A dans la direction 1

2.8.5.2 Essais sur les spécimens cylindriques

Les carottes cylindriques sont ensuite testées en tension-compression afin de déterminer le module complexe relativement à la section 2.8.3. Par la suite, les cylindres sont balayés par tomodensitométrie, conformément à la section 2.8.4.

2.9 Essais sur le mastic bitumineux

Le but est de caractériser le mastic bitumineux utilisé comme interface entre les transducteurs et les spécimens testés.

2.9.1 Montage expérimental

Le montage expérimental se compose des éléments présentés à la section 2.5.2. Afin d'éviter l'écoulement du mastic qui modifierait la géométrie du spécimen testé, les transducteurs utilisés sont enchâssés dans des capsules réalisées par impression 3D, comme présenté à la section 2.5.1.

Dans le cas où les transducteurs ne sont pas insérés dans une capsule, une entretoise est utilisée afin d'éviter l'écoulement du mastic. Pendant l'essai, les transducteurs et les capsules sont alignés les uns aux autres à l'aide de gabarits. La distance entre les transducteurs est mesurée fréquemment afin de prendre en compte un potentiel enfouissement des transducteurs / capsules dans le mastic testé. Les Figures 2.35 et 2.36 présentent le montage utilisé, avec et sans spécimen de mastic bitumineux.

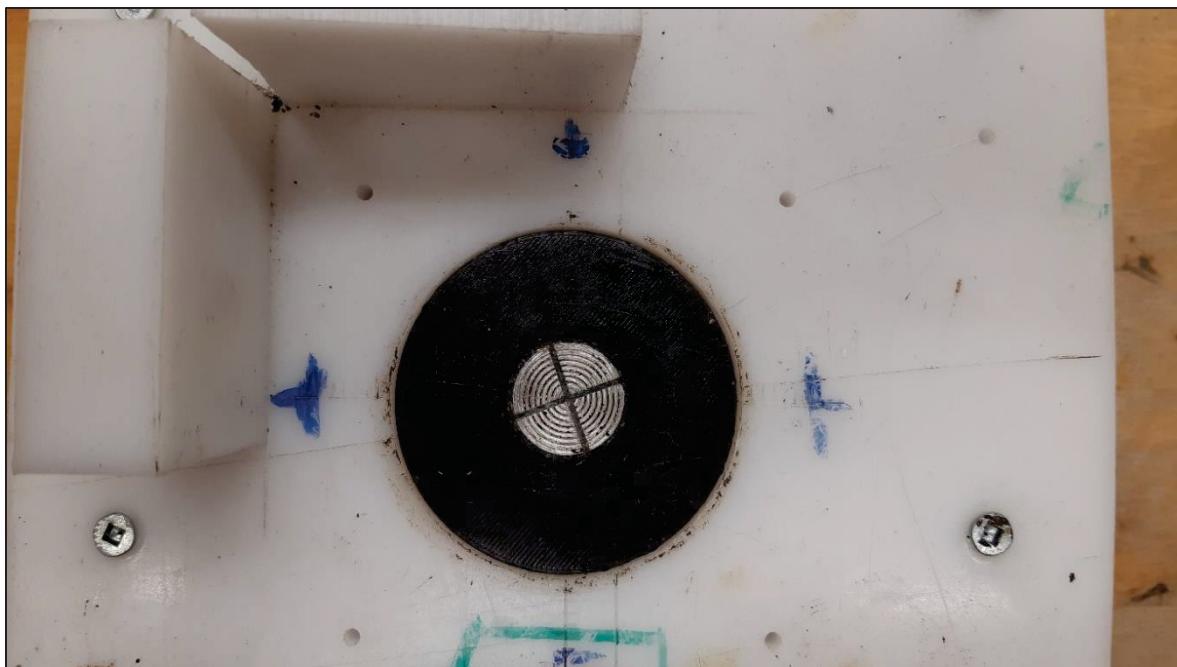


Figure 2.35 Montage expérimental avec capsule inférieure 26-22 mm installée

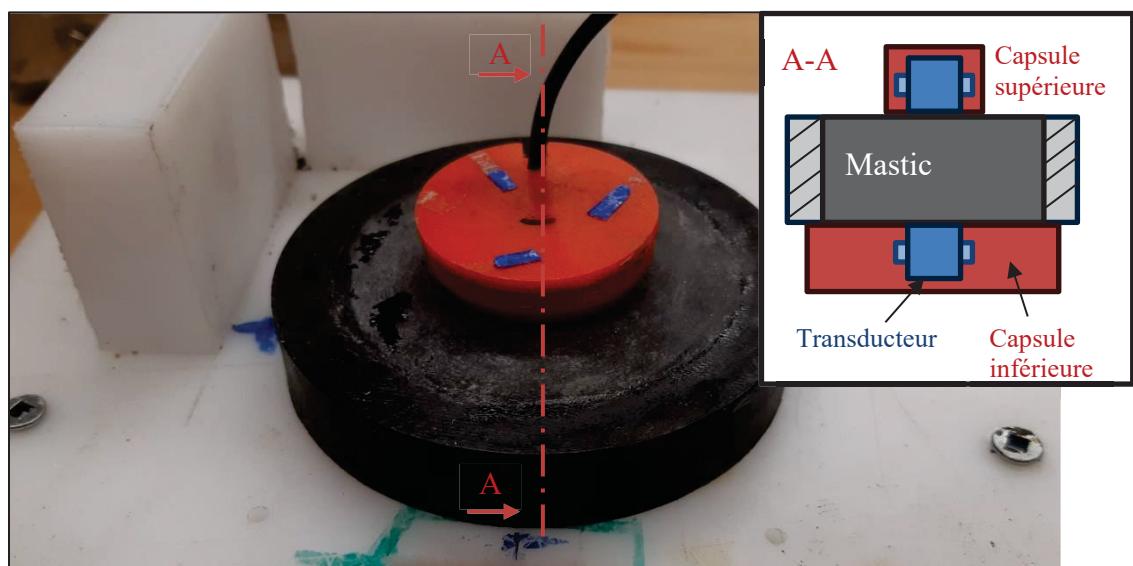


Figure 2.36 Montage expérimental avec capsule supérieure et spécimen de mastic

2.9.2 Procédure expérimentale

Un couple de transducteurs est utilisé à la fois. Plusieurs signaux de forme et de fréquences différentes sont émis, comme décrit à la section 2.5.2. Une fois les signaux collectés, un autre couple de transducteurs est mis en place et la même procédure est effectuée. Les transducteurs utilisés sont les suivants : 19-16 mm; 20-17 avec capsule; 26-22 avec capsule; 36-31 avec capsule. Les essais de P-RAT sont effectués selon les éléments présentés à la section 2.5.2 et l'analyse des signaux est effectuée conformément à la section 2.5.3.

CHAPITRE 3

CHARACTERIZATION OF COLD IN-PLACE RECYCLED MATERIALS AT YOUNG AGE USING SHEAR WAVE VELOCITY

Quentin Lecuru^a, Yannic Ethier^b, Alan Carter^c, Mourad Karray^d

^{a,b,c} Department of Construction Engineering, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

^d Department of Civil Engineering, Université de Sherbrooke,
2500 Boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1

Article publié dans « Advances in Civil Engineering Materials », janvier 2019

ABSTRACT

The characterization of cold recycled pavement materials at an early stage of their life, right after compaction, is difficult especially if classical tests are used. Indeed, these materials at very young age behave like granular materials, which affect the feasibility of the usual tests done on bituminous materials. Non-destructive techniques using wave propagation can be used to overcome this difficulty. The aim of this study is to evaluate if a method based on the spectral analysis of mechanical shear wave generated by piezoelectric rings (P-RAT method) can be used to characterize a Cold In-Place Recycled (CIR) material treated with an asphalt emulsion at young age. Shear waves are used here due to the water content of such materials at early age. Such material can contain 10 % of water by volume before compaction. Shear wave allows characterizing the skeleton of aggregates and bituminous binder (i.e. the asphalt concrete) with no interference from the pore water, thanks to the zero shearing resistance of the water. The tests show a strong link between water disappearance inside the specimen during the cure and the evolution of shear wave propagation velocity in the specimen. Moreover, water disappearance can be easily related to the evolution of $|E^*|$ in the specimen, allowing to characterize this material using the evolution of the shear wave propagation velocity.

Keywords: shear wave velocity, cold recycled asphalt mixture, early age, frequency analysis, piezoelectric elements

3.1 Introduction

For many years, recycling asphalt pavement has been considered as an environmentally friendly and economical way to rehabilitate damaged flexible pavement. Cold-In-Place Recycling (CIR) techniques and Full-Depth-Reclamation (FDR) are often used, depending of which layers need to be renewed. However, these techniques, although recognized to be efficient, still have a misunderstood behavior, mostly because their mechanical properties change with time. Indeed, CIR materials are made of 100 % reclaimed asphalt pavement (RAP), and FDR are made with a part of RAP and a part of granular materials (usually the granular base beneath the asphalt layer) and, to have sufficient mechanical resistance, binder in the form of asphalt emulsion or foamed asphalt are used in the mix (Diffiné, 2012; Gandi, BenSalem, Bressi, Carter, & Bueche, 2016). Considering natural humidity and added water during mixing, CIR mixtures contain around 10 % of water in normal cold recycled mixes in Quebec (Bitume Québec, 2007). Water content in the mixture decreases with time, which is accompanied with an increase in the stiffness of the material. The method proposed herein aims at characterizing this curing process without disturbing the material.

3.2 Objective

The objective of this research program is to evaluate the feasibility of using a new shear wave propagation setup to characterize the rheological properties of cold recycled asphalt mixes treated with asphalt emulsion at young age. The article investigates the suitability of the shear wave velocity (V_s), which is an intrinsic mechanical parameter, to monitor the evolution of the stiffness of CIR material during the curing process. An effort is also made to relate V_s to the complex modulus $|E^*|$.

3.3 Background

3.3.1 Standard testing method on cold recycled asphalt

As mentioned, cold recycled asphalts contain a high amount of water at young age, i.e., right after compaction. Because of this water, classic ways of testing, such as Marshall stability (ASTM D6927-15, 2015), complex modulus (E^*) (AASHTO T 378-17, 2017) by a tension-compression test, or indirect tensile strength tests (ASTM D7369-11, 2011), are not well suited to characterize those materials at young age (Wen, 2001; Carter & Perraton, 2002; Carter, Bueche, & Perraton, 2013).

Triaxial tests may be a better option because they can be performed on granular materials. A study presented by Gandi et al. (2015) has shown the usefulness of triaxial tests to characterize cold recycled materials at a young age. However, the test takes time and specialized equipment. Another study has shown that compaction of the specimen takes place while tension-compression is applied on a specimen during a triaxial test (Santaga et al., 2011).

The water content and the fresh state of the emulsion lead the mix to have a really weak cohesion, leading to quick collapse of any test specimen needed for usual mechanical—destructive or not—tests. For example, the Marshall stability test, for hot mix asphalt, requires the specimen to be cured according to ASTM D6927-15, *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures* (ASTM, 2015), and some studies have tried to reduce the curing time to evaluate CIR or FDR materials as soon as possible, but the curing time was 24 h in the mold and 29 h at room temperature (Feisthauer, Lacroix, Carter, & Perraton, 2013). Moreover, to respect the standards associated with those tests, the specimens have to be cured for at least one day. These difficulties, mostly linked to the lack of cohesion, make the standard tests not fit for the characterization of such materials at young age.

3.3.2 Wave-based methods

Wave-based methods are nondestructive and, for most of them, nonintrusive. They determine the wave velocity and attenuation of the signals (Éthier, 2009; Jiang et al., 2011; Karray et al.,

2015; Larcher et al., 2015; Al-Mufti & Fried, 2016). Jiang et al. (2011) studied not only the evolution of the wave velocity but also other parameters of the signals, such as the peak-to-peak amplitude, the maximal frequency spectrum amplitude, the resonant frequency, and the spectral area (area under the frequency spectrum). Applications include detecting inner cracks (Al-Mufti & Fried, 2016), characterization of multilayered structures (Kramer, 1996; Barnes & Trottier, 2010; Lin, Ashlock, & Williams, 2016), and monitoring the evolution of mechanical properties with respect to time or other relevant parameter (Jiang et al., 2011; Karray et al., 2015; Lecuru, 2015; Al-Mufti & Fried, 2016; Mounier et al., 2016). These methods have been used to characterize various construction materials, such as concrete (Al-Mufti & Fried, 2016), soils (Karray et al., 2015), or bituminous materials (Barnes & Trottier, 2010; Jiang et al., 2011; Abd Elhafeez et al., 2014; Mounier et al., 2016).

For hot mix asphalt, some studies have focused on linking the wave velocity in a specimen to other parameters of the material, such as the Young's modulus E, the complex modulus E* (Jiang et al., 2015), and Poisson's ratio (Mounier et al., 2012). Considering the specimen to be isotropic and that microstrains are imposed, the following equations can be used (Mounier et al., 2012; Jiang et al., 2015):

$$V_s = \frac{1}{\cos \frac{\varphi}{2}} \sqrt{\frac{|E^*|}{2\rho(1+\nu)}} \quad (3.1)$$

$$V_p = \frac{1}{\cos \frac{\varphi}{2}} \sqrt{\frac{|E^*|(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3.2)$$

where:

V_s = shear wave velocity, m.s⁻¹

V_p = compression wave velocity, m.s⁻¹

E^* = complex modulus, MPa

ρ = bulk density, kg.m⁻³

ν = Poisson ratio, no unit

φ = phase angle between strain and stress, rad

As equations 3.1 and 3.2 show, in order to calculate $|E^*|$ from V_p or V_s , the phase angle ϕ is needed. The phase angle ϕ can be obtained by performing a complex modulus test or by using a rheological model. However, such tests can't be practically realized at very young ages (Mounier et al., 2012; Larcher et al., 2015).

Wave-based methods use either compression or shear waves. The ultrasonic pulse velocity (UPV) method is widely spread (e.g., Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester [Pundit]) and available using mostly compression or sometimes shear waves. The typical setup includes sensors coupled on opposite faces of a specimen. The sensors send and receive signals that are propagated through the specimen. Velocity is obtained by knowing the travel distance and the time of flight (Nazarian et al., 2005; Larcher et al., 2015; Al-Mufti & Fried, 2016; Mounier et al., 2016). This is a temporal domain method.

Wave-based methods require signal treatment. Therefore, temporal domain methods, such as UPV, are more appealing because of their apparent simplicity. However, when characterizing materials and monitoring evolution of mechanical parameters, the level of accuracy needed may justify the use of more complex methods, such as frequency domain methods.

Whereas time domain methods focus on studying the temporal signals, the frequency domain methods imply the decomposition of the signal in various harmonics by using discrete Fourier transform in order to get information such as the frequency spectrum, the resonant frequency, or even the phase shift. These methods involve more calculations, but the signal treatment is objective and provides ways for verification (Éthier, 2009; Jiang et al., 2011; Karray et al., 2015).

3.3.3 The piezoelectric ring actuator method

The piezoelectric ring actuator (P-RAT) method has been developed at Sherbrooke University initially for geotechnical purposes (Éthier, 2009; Karray et al., 2015). This method uses the cross-correlation method, which gives the shear wave velocity by comparing two signals,

emission, and reception at different frequencies (Karray et al., 2015). The P-RAT method uses spectral analysis of shear waves propagated in a specimen. Back calculations provide the shear wave velocity V_s instead of the phase velocity V_{ph} , which is obtained from the cross-correlation method. The phase velocity of a wave is frequency dependent, whereas the shear wave velocity is an intrinsic parameter of a material and should not vary with frequency.

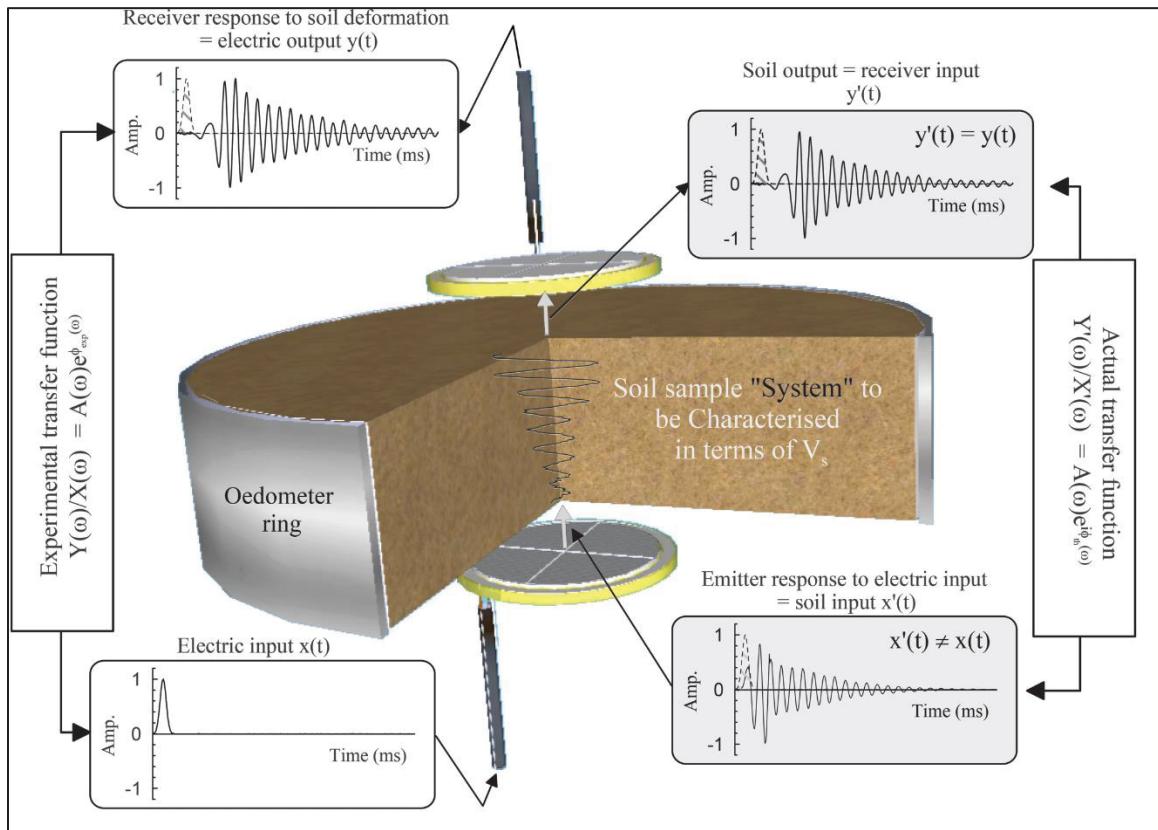


Figure 3.1 Schematic of experimental and actual transfer function
Adaptée de Karray et al. (2015, p. 5)

Figure 3.1 presents the general scheme of the P-RAT configuration when used for geotechnical applications. The setup is analogous for the material studied herein but with adaptations. As shown in Figure 3.1, in the P-RAT configuration, a metal cylinder is fitted inside the piezoelectric ring using epoxy to allow the propagation of the shear wave through the tested specimen. The piezoelectric ring is welded on each side to a shield wire, which transfers the electrical pulses of different forms and parameters to the ring. Because of the piezoelectric

nature of the ring's material, these pulses will produce a radial deformation of the rings. The cylinder prevents the piezoelectric ring to be in direct contact with the specimen, reducing the generation of compressive waves in the tested specimen. It also prevents the test from being intrusive, unlike many other tests used in soils, such as bending elements that are inserted in the specimen (Dyvik & Madshus, 1985). The design of the sensors allows the P-RAT method to be used in various media (soil, concrete, bituminous materials) and under harsh test conditions (Éthier, 2009; Karray et al., 2015). Finally, the P-RAT configuration makes it possible to test the sensors directly in contact in order to assess their dynamic properties.

Theoretically a material can be seen as a dynamic system. For every dynamic system, a transfer function can be associated. A transfer function is a mathematical way to express the reaction (output) of a system in terms of its entrance excitement (input). Let $y(t)$ be the reaction of a system and $x(t)$ the input excitation applied to this system, and then let $H(j\omega)$ be the transfer function of the system, $X(j\omega)$ and $Y(j\omega)$, Laplace transforms of $x(t)$ and $y(t)$, respectively, are linked by the following equation:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (3.3)$$

Where ω is the pulsation (rad.s^{-1}) and j the imaginary unit. Two parameters can be used to describe this transfer function, the gain $G(\omega)$ and the phase $\Phi(\omega)$.

In the P-RAT configuration, both the emitter and receiver sensors are considered as a single degree of freedom system for which their transfer function is therefore well known. As shown in Figure 3.1, there are two global transfer functions in the test. The experimental one is known, namely, the input signal to the emitter and the output signal measured from the receiver after propagation through the specimen. The unknown transfer function refers to the signal that enters the specimen (after getting out of the emitter) and the signal that leaves the specimen (and then enters the receiver). Because the sensor response is known, the perturbation caused by the system can be evaluated, and the phase shift that is due to this perturbation is calculated.

As explained previously, back calculation leads to a constant velocity, which is the shear wave velocity V_s of the specimen. Numerical simulations that were run at Sherbrooke University have shown that the damped spring-mass model hypothesis representing the behavior of the piezoelectric sensors were correct (Mhenni, Hussien, & Karray, 2015). Details may be found in Karray et al. (2015).

The use of mechanical shear wave is well adapted to CIR material because shear waves, unlike compression waves, do not propagate in water. Indeed, if the tested specimen has its voids filled with water and a compression wave is used to test it, the velocity obtained will be the velocity of the compression wave in water (around $1,500 \text{ m.s}^{-1}$), which would therefore not characterize the tested material. This appears in some UPV tests made on cement materials at early age (Larcher et al., 2015). On the other hand, shear waves will not propagate in water, as they are restricted to travel through the material's skeleton, so the obtained propagation velocity refers to the tested materials and represents the quality of its contacts.

Finally, P-RAT has been used to characterize soils (Éthier, 2009; Karray et al., 2015) and concretes (Soliman et al., 2015; Naji et al., 2017a; Naji et al., 2017n). These studies have shown that minimal cohesion or friction is required in the tested materials, especially in the study of early age materials (Soliman et al., 2015; Naji et al., 2017a; Naji al., 2017b).

3.4 Materials and Methods

3.4.1 Materials used and specimens

The tested specimens are CIR material made with 100 % RAP with 1.5 % added bitumen in the form of asphalt emulsion (Cationic Slow Setting, 67 % of bitumen from McAsphalt), 6.0 % of total water (added water and emulsion water), and 1 % of portland cement (GU10 from CRH Canada Group). All the mentioned percentage are a function of the RAP mass. This mix is the same for all specimens that have been tested. All the components were stored at room temperature, and the RAP was not oven dried. Cement and RAP were first blended together manually for 1 minute before adding water and emulsion at the same time. The mix was

blended for 2 additional minutes before being introduced in the mold for compaction. For the slabs, the mix was prepared in 5-kg batches.

Three cylindrical specimens of various heights and diameters have been compacted with the same composition. Indeed, some preliminary tests had to be run to evaluate the feasibility of the P-RAT method on CIR materials, namely, to check that signals were readily propagated through the specimen. Two specimens have been prepared with the Marshall Compactor. The specimens were 63 and 73 mm high, respectively, both measuring 101 mm in diameter. The third specimen was compacted with a gyratory shear compactor (GSC) (36 rotations) and was 107 mm tall and 100 mm in diameter. They were compacted to air voids between 10 and 12 %.

The water content of these materials, even after compaction, is responsible for weak material that did not allow demolding right after compaction. Indeed, the lack of cohesion would have caused the specimen to collapse under its own weight. The specimens were kept in their mold for 1 d, so tests were performed with the mold still on. For the GSC specimen, tests begun 3 h after compaction. Whenever a mold is kept in place, one has to be aware that the cure should be different and therefore impacts the V_s measurements.

Two slabs have also been made using the Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC) slab compactor. All components were mixed together in the same way as those made for the cylindrical specimens. The use of slabs minimizes the edge effects and the wave mode conversion (P waves turning into S waves and vice versa, which is due to geometrical conditions). The slab dimensions are 500 by 180 by 50 mm. When using the slab compactor for hot mix asphalt materials, six passes of a steel wheel are done at the end of the pneumatic compaction. Former tests have shown that the use of the steel wheel on CIR materials generates raveling on the slabs (Carter et al., 2013). Therefore, compaction was restricted to the pneumatic component of the LPC procedure. To have comparable results with Marshall specimens and GSC, the slabs were compacted to similar air voids, i.e., 10–12 %. Initial

specimen densities after compaction were $2,159.5 \text{ kg.m}^{-3}$ for Slab 1 and $2,173.2 \text{ kg.m}^{-3}$ for Slab 2. Dry densities were $2,031.6 \text{ kg.m}^{-3}$ and $2,031.3 \text{ kg.m}^{-3}$ for Slabs 1 and 2, respectively.

3.4.2 Sensors used

Three kinds of sensors have been built for this study. Because of the composition of CIR materials, it was considered that sensors larger than the mix components had to be used to ensure that a representative material is tested. Indeed, because of the size of some granular materials in the specimen, if small size sensors are used, there are concerns that the tested material between the sensors would not be homogeneous and representative of the whole specimen. Thus, three sensor sizes were made. Table 3.1 compiles the sensor data.

Tableau 3.1 Dimension of transducers, mm

Transducer	Piezoelectric ring			Inner cylinder	
	Outer diameter	Inner diameter	Height	Diameter	Height
22-16 mm	22	16	3.5	14.0	11.9
38-34 mm	38	34	3.5	32.0	11.9
51-45 mm	51	45	14	41.9	21.1

Sensors are identified by their sizes. For example, the 22–16 mm sensor is the one made with the piezoelectric rings with an outer diameter of 22 mm and an inner diameter of 16 mm.

Increasing the size of the piezoelectric ring decreases its resonant frequency, which leads the sensors to resonate for lower frequencies. The size of the inner cylinder also somewhat influences the resonant frequency. In order to facilitate signal interpretation, the higher the sensor resonant frequency, the better it is. Indeed, if the sensors resonate for higher frequencies, more tests can be performed in terms of frequencies of the input signals until the sensors resonate. If the sensor resonates, because of the physical meaning of this phenomenon, it is difficult to assess if the received signal is a response to the perturbation of the specimen or to the sensor resonance.

3.4.3 Experimental methodology

The tests have been run in similar ways for the cylinders and the slabs. The aim of the study is to characterize CIR material in its early age, so the V_s measurements have to start soon after compaction. After compaction, the sensors are carefully set on each side of the specimen. It is important that coupled sensors are well aligned with one another. One sensor is connected to a signal generator, Handyscope HS3 100 MHz (TiePie Engineering). The other sensor is connected to another entry of the same apparatus that also acts as an oscilloscope. An amplifier, 7602M from Krohn-Hite, is used on the generator side. The Handyscope is commanded by a personal computer on which one can observe the emission and the reception signals. The form, amplitude, and frequency of the entrance signal is selected on the computer.

While testing the cylinder specimens, only one couple of sensors could be used at a time. A C-clamp (Figure 3.2 A) was used to keep the sensors in contact with the cylindrical specimen. For the slabs though, the three sizes of sensors were set on the same specimen after compaction, testing three sizes and three different locations of the slabs within a short period of time (Figure 3.2 B). This process obtained several signals for the first hours after compaction of the slabs.

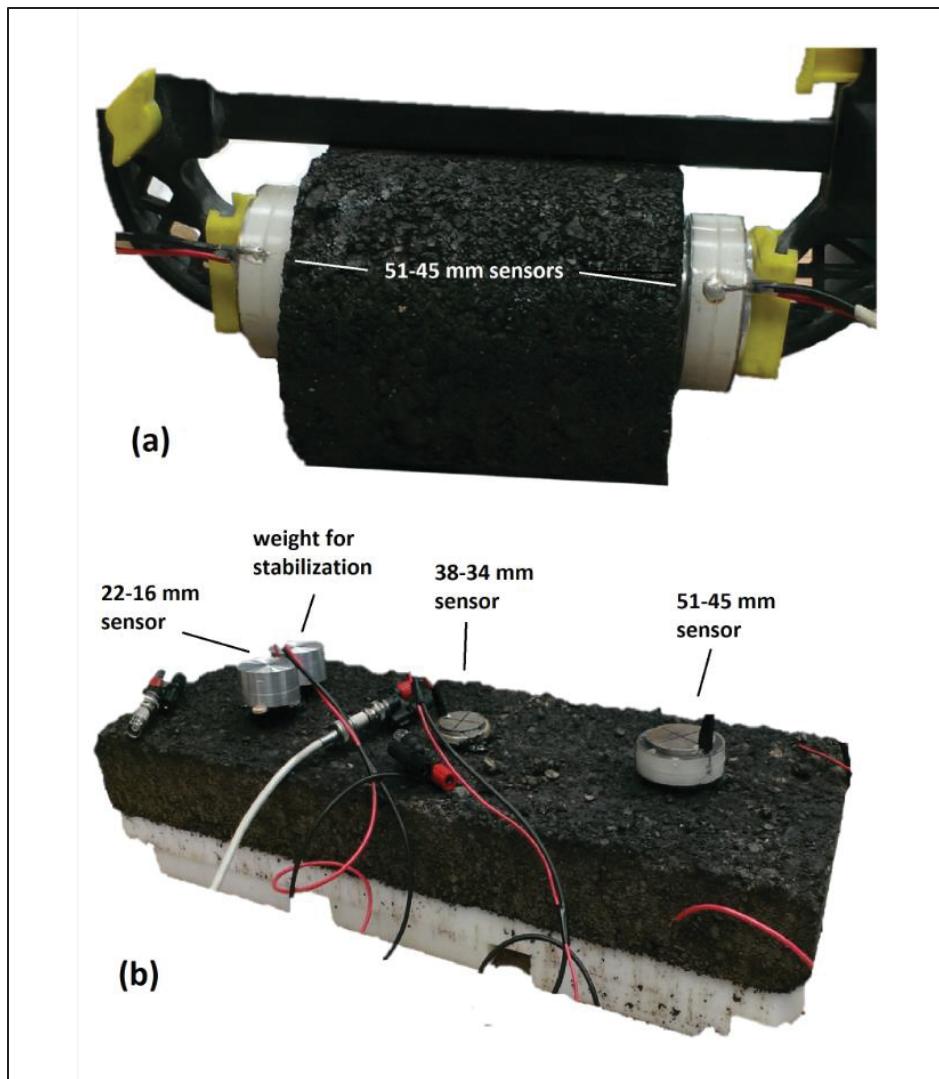


Figure 3.2 (A) Cylinder specimen equipped with a sensor couple and (B) slab specimen equipped with three sensor couples

Concerning slabs, for a same sensor couple, five different emission signals were sent to the specimen. At least three signals have been recorded, with various frequencies, amplitudes, and amplification. A minimum of 15 signals were available for analysis for one sensor couple. With three sensor couples per slab, at least 45 signals were available for what is referred to as an “experiment.” One experiment corresponds to a specific point in time after compaction. A total of 31 experiments was realized (10 on the first day, 7 on the second day, 3 on the third

day, 3 on the fourth day, and then 1 every 2 days) for the first slab and 33 experiments for the second slab (32 over 15 days and one more 30 days later). Finally, more than 1,250 signals for each slab were obtained. These signals were analyzed using P-RAT software developed in LabView from National Instruments with the aforementioned concepts obtained from Sherbrooke University (Éthier, 2009; Karray et al., 2015).

In addition to shear wave velocity, the mass loss of the slabs was measured. For each experiment, the weight of the slab was measured, made possible by installing the specimen on a scale during the test. When all tests were complete, the slab was dried in an oven for 1 d, and the dry weight of the slab was measured. Water loss measured for each slab was 25 and 11.5 g for Slabs 1 and 2, respectively.

3.5 Results and Discussion

3.5.1 Preliminary results on cylinders

The tests on the three cylinders first aimed at verifying whether a signal could readily be propagated through the specimen and measured at the other end. These early tests have shown that wave signals are indeed transmitted from one side to the opposite side of the specimen, for the considered lengths of the specimen varying from 63 to 107 mm. Figure 3.3 A shows the presence of a resonance phenomenon in the received signal. The frequency spectrum of the received signal shows a narrow peak, as shown in Figure 3.3 B. The frequency range where the energy is exchanged between the emission and the reception is very small for this case. It is inferred that the system causes the receiver to vibrate at its natural frequency, thus practically ignoring the material to be tested. It results in difficulties to correctly analyze the received signal. It appears that the contact between the sensors and the specimen had to be improved.

Coupling was improved by adding a thin layer of bitumen mastic (made of sand and PG 58-28 bitumen) between the specimen and the metallic cylinder of the sensor, for both emitter and receiver. Tests on the 107-mm long specimen have shown that the wave propagation in the specimen was improved because of this new coupling effect. Figure 3.3 C and 3.3 D shows

that the signal attenuates quickly and the frequency spectrum presents a wider peak for the received signal, reflecting a greater contribution of the tested materials.

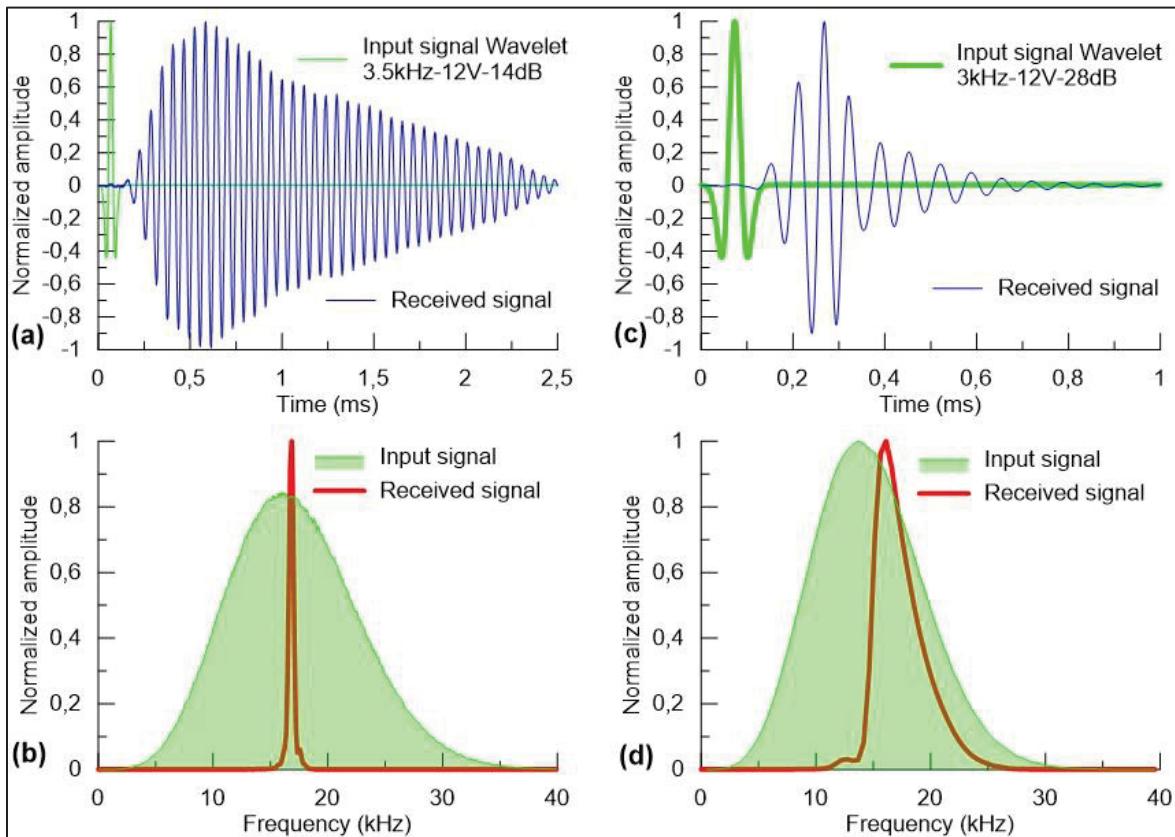


Figure 3.3 (A) Temporal signal and (B) frequency spectrum of a tested signal without bitumen mastic. (C) Temporal signals and (D) frequency spectrum of a tested signal with mastic; 38-34 mm transducers, 107-mm-tall cylinder specimen

These improvements have been thereafter used and applied for the tests on the slabs. Figure 3.2 A shows a sensor coupled to a cylinder and Figure 3.2 B shows a slab equipped with sensors. The use of a coupling material may slightly affect the V_s measurement. This effect is minimized by applying a layer as thin as possible (approximately 1 mm) and by selecting one that has a stiffness close to the stiffness of the material being studied.

3.5.2 Tests on slabs

Because of the high water content in the mix in early age, and, therefore, a low cohesion in the slab, the first slab was locally fissured when the 51–45 mm bottom sensor was installed. No deep cracks were spotted in the area of the other two pairs of sensors. For the second slab, the 22–16 mm upper sensor had to be removed and put back. It was removed by a stress generated by the wire. The results were uneven but nevertheless presented for information. No important cracks (more than 1 mm of depth) were spotted on the rest of the second slab.

For the first slab, the compaction began 2.5 h after mixing. The mix was sealed with a plastic film to prevent it from drying during this delay. The second slab has been compacted right after the end of mixing. The V_s measurements began one hour after compaction for both slabs. The slabs were kept in the same room for the whole duration of the test. The room temperature was 22°C. Humidity was not controlled but measured to be around 25 %.

3.5.2.1 Mass of Water

Figure 3.4 shows the evolution of the water loss in the slabs. The graphs show that water loss is important during the early hours of the test. Table 3.2 compiles some values of the water loss. The water loss in the slab increases quickly with time as 50 % of the water is lost in 19 h for the first slab and in 1 d for the second. After 4 d, the water loss stabilized as more than 75 % of the water is lost at this point.

Tableau 3.2 Main curing values for the slab specimens

	Water loss, %			
	10 %	25 %	50 %	75 %
	Time after compaction, hours			
Slab 1	2.1	6.0	19	96
Slab 2	1.2	10.5	24	66

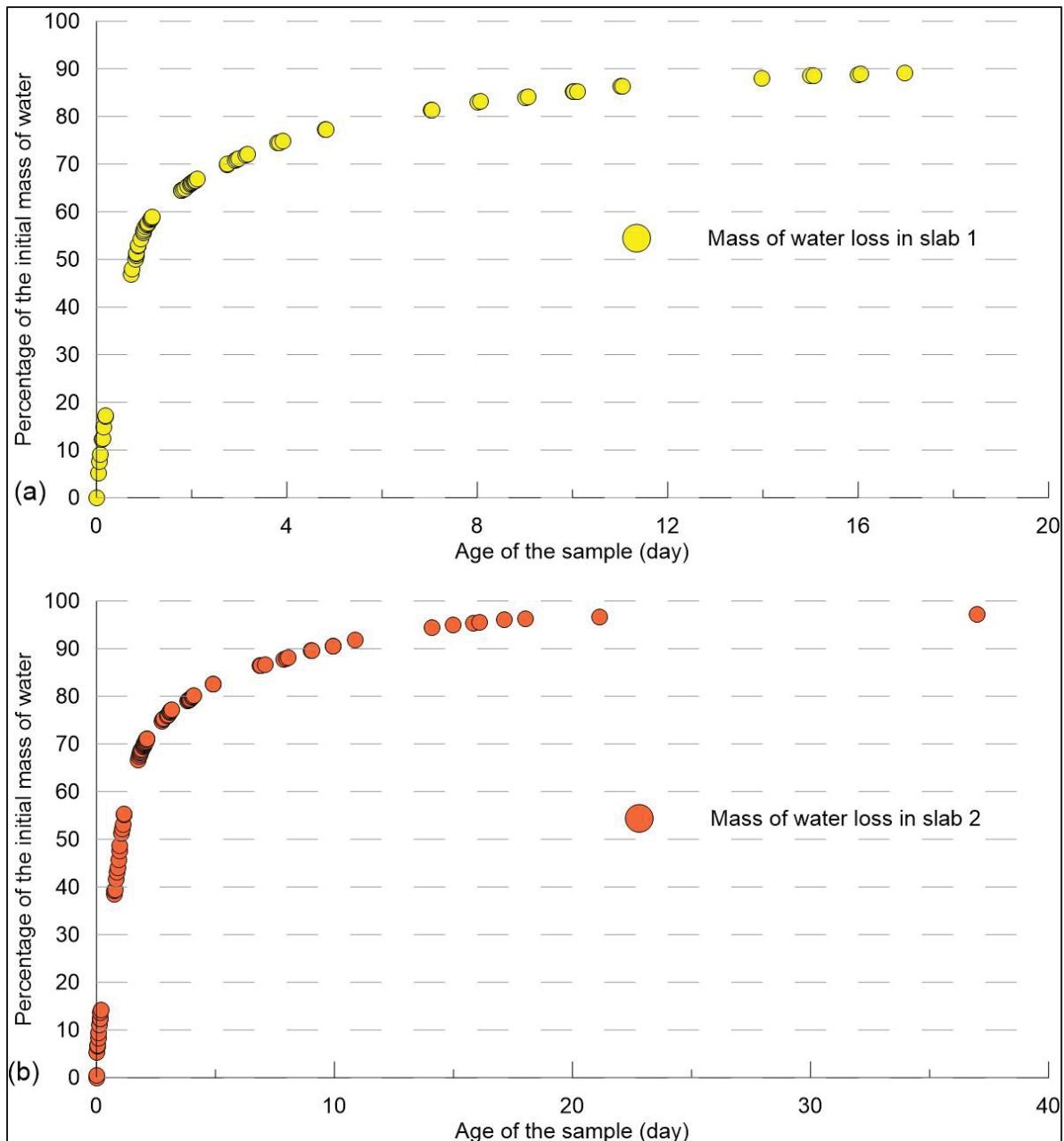


Figure 3.4 Evolution of water loss for (A) Slab 1 and (B) Slab 2

The recording time when the slab was weighted and the time when the shear wave velocity measurement tests were performed are not exactly the same. As Figure 3.4 shows, the variation of the water content during the first day is important, and a shift in the recording times yields discrepancy in mass – V_s results. Water loss considered at the time of the V_s measurement was

obtained by interpolating, with a best-fit polynomial function, the different parts of the water loss curve. These interpolated data are used in Figures 3.5 B, 3.6 B, 3.7 B, 3.8 B, and 3.8 C.

3.5.2.2 V_s Measurement

As for the water mass in the slab that decreases rapidly with time, the shear wave velocity increases rapidly with time. Figure 3.5 presents this evolution for one signal form (half roundish sinus, 5 kHz, 12 V, 14 dB) using the 38–34 mm sensor couple in the second slab. The received signals were normalized with the highest peak. It is a time domain plot and it shows the arrival time of the wave, calculated with V_s values and considering the specimen length (travel distance). The calculated arrival time varies from 0.196–0.170 ms in 200 minutes and from 0.196–0.135 ms in 37 d. The calculated arrival time for this case is always situated on the same spot of the curves. In this case, the arrival time is right before the third peak.

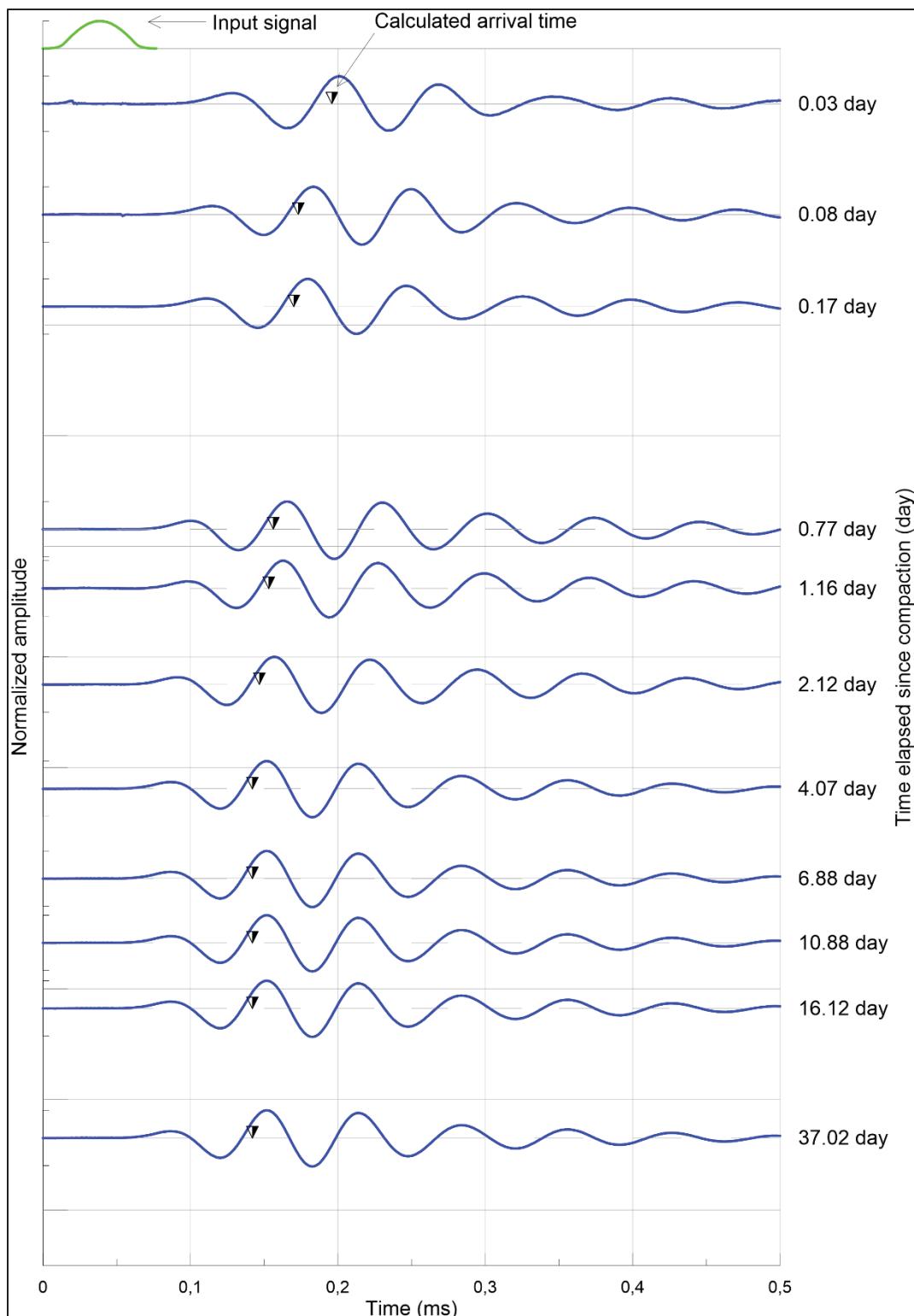


Figure 3.5 Evolution of the received signal over time for half-roundish sinus: 5kHz, 12V, 14dB, Slab 2

Figures 3.6 A and 3.7 A present the evolution of V_s over time and Figures 3.6 B and 3.7 B the evolution of V_s with respect to the mass of water loss in the slab. It appears that the trends of the curve are the same for each couple of sensors and for both slabs (Figures 3.6 A and 3.7 A). The graphs also show that the curve of the evolution of the water loss in the slab tends to be similar to the V_s curves. Concerning the 51–45 mm couple for the first slab, V_s results only show a faster increase of V_s values during the first hours, although the slab was locally cracked. This is certainly due to a faster cure.

For the second slab, the results of the 22–16 mm sensor couple are inoperable (see the red square curve in Figure 3.7). The other sensor couples show similar trends.

The relationship between V_s and water loss in the slabs plotted on Figures 3.6 B and 3.7 B appear to be linear, especially after an initial water loss of about 70 g. The linear regressions give good results as the coefficients of determination range from 0.94–0.98 for both slabs. These curves show a strong bond between the water loss and the increase of V_s . With the water loss, the cohesion of the material increases as well.

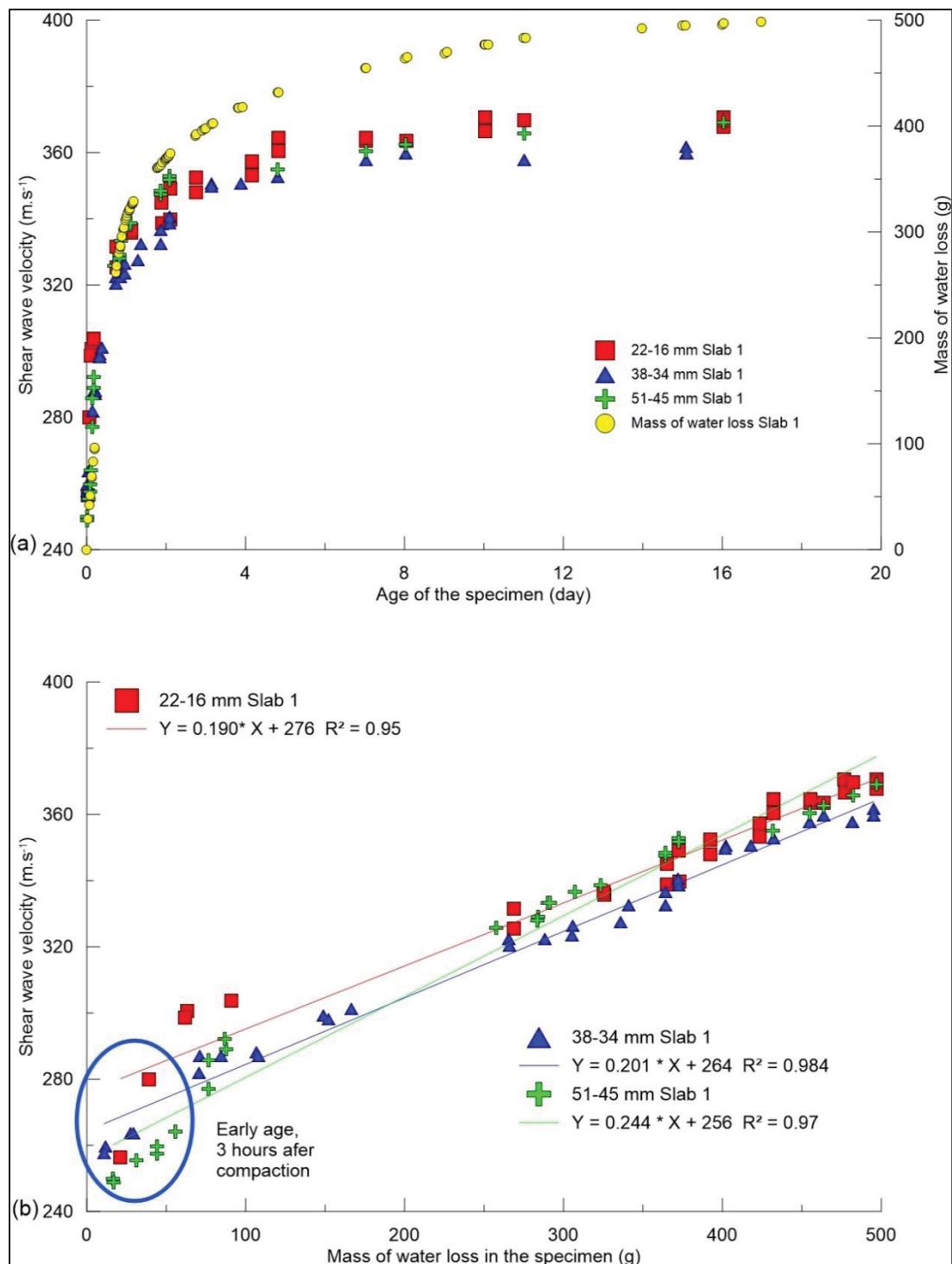


Figure 3.6 V_s measurements using P-RAT for Slab 1 with respect to (a) time and (b) water loss in the slab

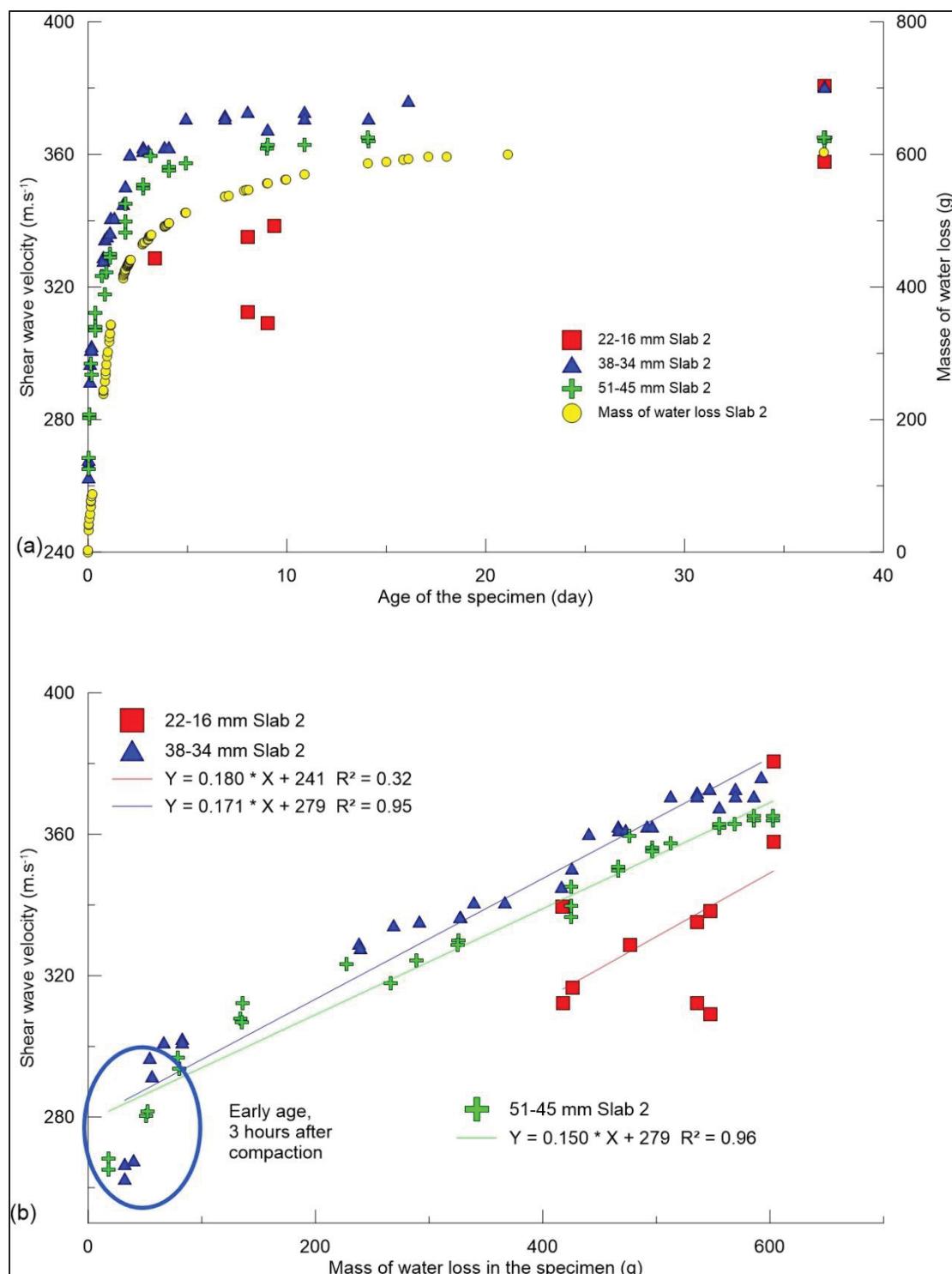


Figure 3.7 V_s measurements using P-RAT for Slab 2 with respect to (a) time and (b) water loss in the slab

Table 3.3 compiles values of V_s obtained for each couple of sensors at different times. Some values in the table are approximated values, especially for 1 and 2 h. Indeed, as the three sensor couples were set on the slab, it was not possible to perform V_s measurements at the exact same time for each measurement (± 10 minutes for the early tests, ± 1 minute for other tests). Values marked as approximate values were in fact obtained by interpolation between measured values. The relative difference is obtained for a slab as follows:

$$\Delta_{\text{rel}} = \frac{\text{Max value} - \text{Min Value}}{\text{Max value}} \quad (3.4)$$

The evolution of the differences for both slabs do not show any trend regarding the sensors while the slabs are curing.

Tableau 3.3 Particular values of V_s , m.s^{-1}

	Sensor couple						
	Slab 1			Relative difference	Slab 2		Relative difference
Values	22-16	38-34	51-45		38-34	51-45	
0.5 hour	249	261*	250	4.6%	257*	266	3.4%
1 hour	272*	263	254	6.6%	267	271*	1.5%
2 hours	290*	275*	262*	9.6%	292	283	3.1%
4 hours	300	287	290	4.3%	300	296	1.3%
18 hours	330	324	326	1.8%	326	324	0.6%
45 hours	340	336	348	3.4%	350	340	2.9%
11 days	369	357	365	3.2%	372	363	2.4%
15 days	370	360	368	2.7%	370	365	1.3%

*approximative values

3.5.2.3 Amplitude Analysis

Figure 3.8 plots the amplitude of some signals as a function of time (Figure 3.8 A), mass of water loss (Figure 3.8 B), and V_s (Figure 3.8 C). Because of the necessity of having a sufficient amount of the same emitted signal at different testing times for a single sensor couple, the results for three sensor couples out of the six available are plotted. The three sensor couples selected are the 38–34 mm for Slab 1 (roundish sinus 5 kHz, 12 V, 14 dB), the 38–34 mm for Slab 2 (roundish sinus, 5 kHz, 12 V, 14 dB), and the 51–45 mm couple for Slab 2 (wavelet 2 kHz, 12 V, 14 dB). The trend of the amplitude with time looks similar to the one of V_s with time. It shows that the amplitude is highly linked to the water loss and thus to V_s ($0.89 < r^2 < 0.98$).

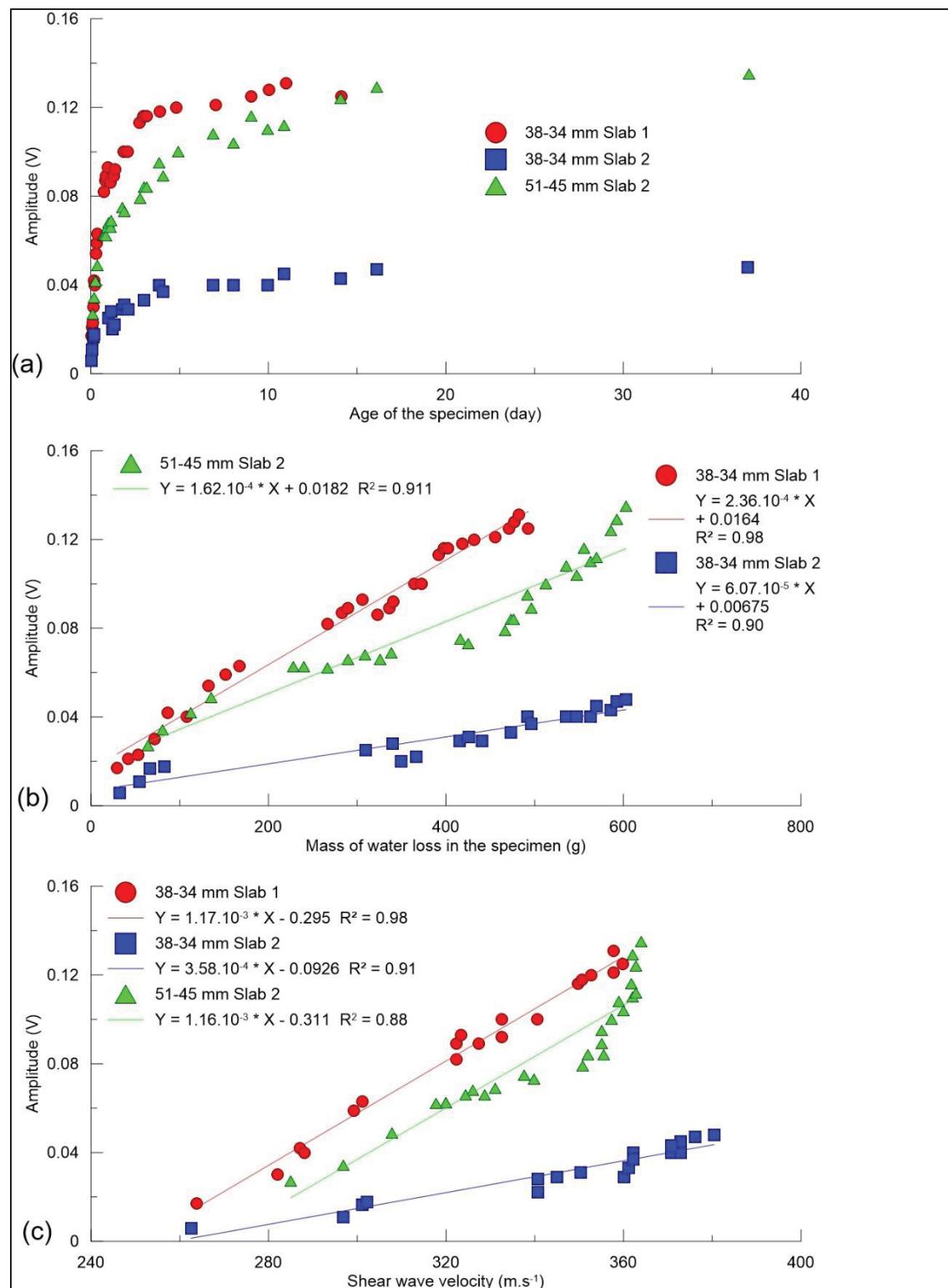


Figure 3.8 Amplitude of received signals for three input signals with respect to (a) time, (b) water loss, and (c) V_s

3.5.3 Analysis

Former studies have shown that the amplitude of the received signal is proportional to the complex modulus $|E^*|$ (Jiang et al., 2011). This study shows that the mass of water within the specimen is linked to V_s , while the first decreases, the second increases, and it seems to be proportional (see Figures 3.5–3.7). Indeed, the plots of V_s with respect to water loss tend to be linear, especially when above 70 g of water loss. The amplitude of the received signals is also highly linked to the water loss and to the increase of V_s in the specimen (see Figure 3.8). Moreover, equations linking $|E^*|$ and V_s exist for hot asphalt mix, even if these equations require obtaining Poisson's ratio and the phase angle from tension-compression tests or from theoretical means.

It appears that in Figures 3.6 B and 3.7 B, at early age and when the mass of water loss is low in the slabs, the curves do not follow a linear trend (see the blue circles). This range of increasing stiffness in such material occurs at the rupture of the bitumen emulsion, which starts when the mix is made and accelerates with compaction. It is generally noticed when the emulsion goes from a brown color to black. It can be assumed that the rupture started before the compaction and continued while the sensors were set on the slab and when the first V_s measurements began. The end of this first range of increasing stiffness is assumed to correspond to the setting time.

Figure 3.9 plots water loss and V_s for Slabs 1 and 2 with respect to time on logarithmic scale. It allows the determination of when the setting time occur. Figure 3.9 A gives a setting time of 0.04 to 0.05 d and shows that the water loss evolution slows down at 4–5 d. Figure 3.9 B and 3.9 C gives similar results of 0.04–0.05 d for the setting time and a slowing in the evolution of V_s at 5–6 d, with the exception of the 51–45 mm couple results, which slows down earlier at around 4–5 d.

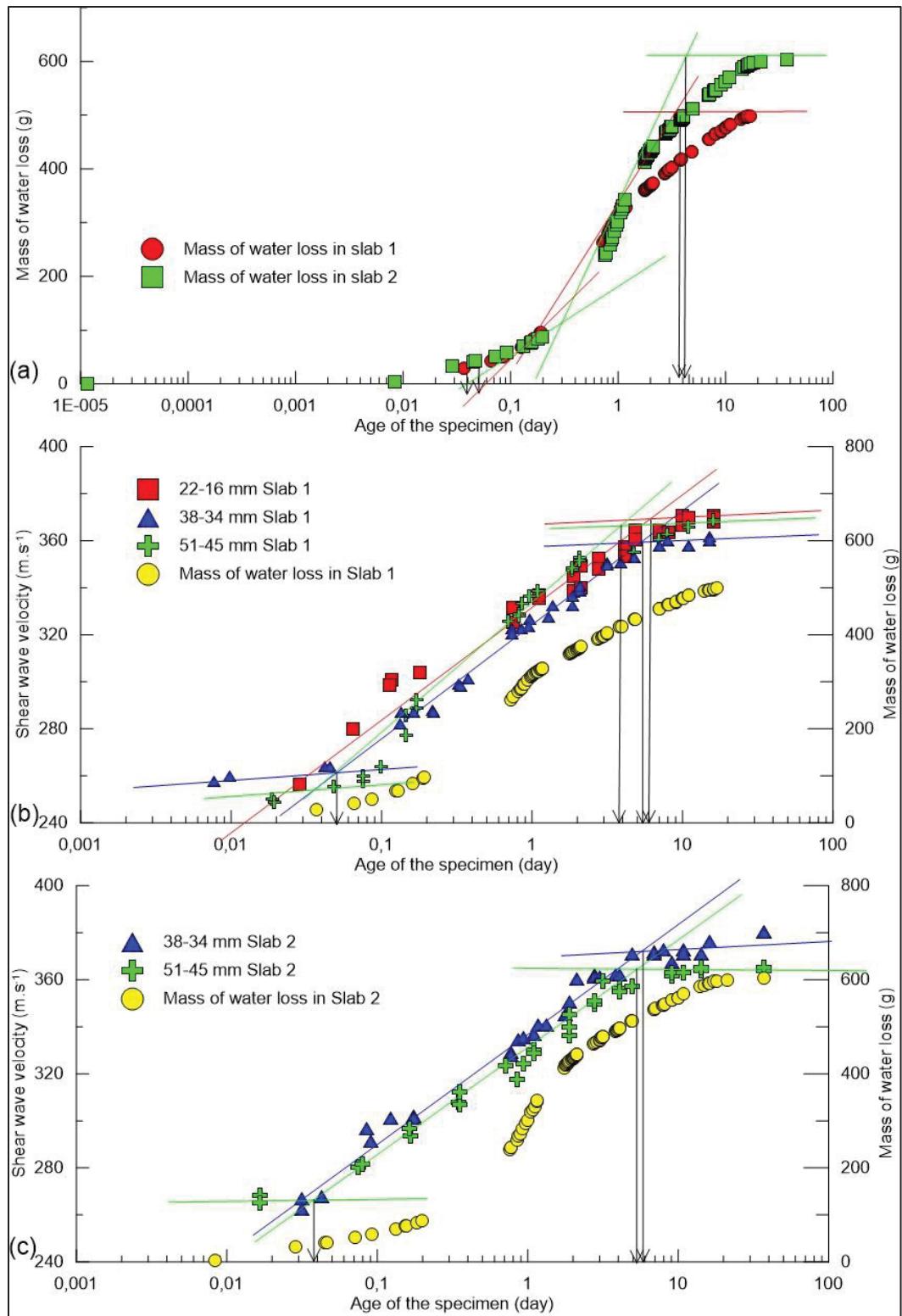


Figure 3.9 Results of the spectral analysis: (a) water loss with respect to time for both slabs; V_s measurement with respect to time for (b) Slab1 and (c) Slab 2

These results strengthen the assumption of the link between the water losses and the V_s evolution. They also show the importance of starting tests as soon as possible after compaction in order to get information during the rupture of the emulsion at the early age of the slab life.

Shear wave velocity values, V_s , range from 250 m.s⁻¹ at young age to 370 m.s⁻¹ toward the end of the tests where the values tend to stabilize. As an indication, these values are somewhat higher than those typically obtained from clay materials ranging from 60–200 m.s⁻¹, depending on the stiffness of these soils (Hussien & Karray, 2016). Moreover, the literature provides V_s values in hot asphalt mix ranging from 1,800–2,100 m.s⁻¹ (Houel & Arnaud, 2009; Mounier et al., 2012).

V_s is an intrinsic parameter, but in the pavement field, stiffness is mostly evaluated using modulus. Using equation (1), an approximation can be obtained for $|E^*|$ with V_s in the tested CIR materials. CIR materials undergo radical changes in behavior from early age to fully cured state, as V_s evolution tends to show. The modulus $|E^*|$ may be approximated considering a room temperature of 22°C, $v = 0.35$, $\varphi = 25^\circ$ (typical average values), $\rho = 2,100 \text{ kg.m}^{-3}$ as measured, and $V_s = 370 \text{ m.s}^{-1}$. The complex modulus, $|E^*|$, obtained is around 800 MPa. Depending on test conditions and mix compositions, values of $|E^*|$ for these materials range from 500–10,000 MPa (Carter et al., 2013; Diefenderfer et al., 2016). Lin, Ashlock, & Williams (2016) obtained modulus values for CIR material around 900 MPa using Multichannel Analysis of Surface Waves and Multichannel Simulation with One Receiver, both methods that use surface waves. These methods are Rayleigh wave (surface wave)-base methods. Spectral analysis and back calculation are used to get information on the tested soil or pavement (Barnes & Trottier, 2010; Lin et al., 2016). The obtained $|E^*|$ value appears to fit in the range of values presented previously. However, other tests with different CIR mixes and study parameters are needed to perform a comprehensive parametric study to properly relate V_s evolution to $|E^*|$ evolution in CIR materials.

Concerning the use of the P-RAT method, this study shows that the method is well adapted for characterizing CIR materials, although some testing setups have to be improved. The contact

between the specimen and the sensors is important for obtaining good signals. Preliminary tests suggest that the use of bitumen improves the contact and therefore signal quality.

Finally, the tests performed could not establish a preferred sensor size among those used based on the V_s values measured. From a dynamic point of view, the resonant frequency of smaller sensors is higher and should be preferred. However, it is inferred that larger sensors are more appropriate to characterize materials containing larger particles. Moreover, it appears that for the smaller sensors (22–16 mm), some signal noise is present, especially during the first tests. This could be attributed to difficulties in correct alignment for smaller sensors and to their light weight. For both 38–34 mm and 51–45 mm sensors, signals appear clearer and with less noise. These observations agree with the P-RAT results in concrete materials determined by Naji et al. (2017).

Also, the P-RAT methods characterize the specimen as a volume between opposite sensors. Larger sensors, such as the 51–45 mm, could be less influenced by minor defaults in the material. This is supported by the V_s results of the 51–45 mm couple sensor for Slab 1 not being disturbed by local cracks.

3.6 Conclusion and Recommendations

Conventional testing methods for bituminous materials, such as indirect tension or complex modulus, are not fit for testing CIR materials at very young ages. Indeed, because of the high content of water in such materials, there is a lack of cohesion among the specimen, preventing use of conventional testing apparatus.

A nondestructive method using mechanical shear waves was tested in this study. The P-RAT method was used on CIR materials of the same composition during the entirety of the study. This method enabled evaluation of the evolution of the shear wave velocity (V_s) in CIR slabs from the end of compaction to fully cured material. The use of a wave-based method allowed

this without damaging and then modifying the tested materials. The water content and the amplitude of the received signals were also evaluated in order to allow correlations.

It appears that V_s values and the amplitude of the received signals increase with time, showing an increase of the material cohesion and stiffness. Also, V_s is highly linked to the water loss in the slabs as well as the amplitude of the received signal. The knowledge of V_s in the tested specimen provides information on other mechanical properties of the materials, such as $|E^*|$ or Poisson's ratio, as equations linking these parameters are available. The P-RAT method has been shown to be appropriate to characterize CIR materials at young ages, and the V_s parameter can be used as a mechanical parameter of the tested material.

Future works will be directed toward improving the testing setup, with emphasis on the improvement of the contact between sensors and the tested specimen. Other improvements are needed to provide V_s measurements at the earlier state of the tested material. Finally, the proposed method has the potential to allow for V_p measurements, which is being explored as Poisson's ratio could then be calculated and its evolution monitored during CIR cure.

3.7 Données expérimentales

Section non présente dans l'article original.

Les données expérimentales utilisées dans le Chapitre 3 sont présentées à l'Appendice A.

CHAPITRE 4

ANALYSE COMPLÉMENTAIRE DE L'ARTICLE 1

4.1 Introduction

Le présent chapitre a pour vocation de faire le lien entre le Chapitre 3 et le Chapitre 5, comme présenté à la section 2.3. Il y est fait état de l'usage du modèle Michaelis-Menten avec les données présentées au Chapitre 3. Une emphase est faite sur les données en très jeune âge. Finalement, les essais préliminaires qui ont mené aux améliorations décrites à la section 2.7 (méthodologie) sont présentés.

4.2 Utilisation du modèle Michaelis-Menten

Comme évoqué à la section 1.4.4, le modèle Michaelis-Menten est efficace pour modéliser les effets de la cure sur des ERF. Le modèle MM utilisé est présenté à la section 2.6.3. Les Figures 4.1, 4.2 et 4.3 présentent les données de la plaque 1, plaque 2 et de l'évolution de l'amplitude des signaux de réceptions, respectivement. Pour rappel, le temps 0 correspond à la fin du compactage. Le modèle MM est appliqué à chacune des données, et les paramètres sont rassemblés dans le Tableau 4.1 pour les valeurs de l'évolution de V_s et de la perte d'eau (Figures 4.1 et 4.2).

Tableau 4.1 Paramètres A, B et C du modèle MM pour l'évolution de V_s et de la perte d'eau dans les plaques 1 et 2

	Plaque 1				Plaque 2			
	A	B	C	R ²	A	B	C	R ²
V_s 22-16 (m.s⁻¹)	246,8	121,6	0,37	0,95	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
V_s 38-34 (m.s⁻¹)	247,7	115,5	0,49	0,99	262,1	116,3	0,55	0,97
V_s 51-45 (m.s⁻¹)	215,2	152,3	0,27	0,99	261,1	105,8	0,56	0,98
Perte d'eau (g)	-50,9	554,1	0,60	0,99	-28,7	654,6	0,95	0,99

Il apparaît que le modèle MM est adapté à la modélisation des données relatives à la cure des deux plaques d'ERF testées. En effet, les coefficients de corrélation R² sont tous supérieurs à 0,95.

Concernant la modélisation de la perte d'eau, le paramètre A est négatif. Physiquement, une masse ne peut pas être négative, cependant cela représente la prise en compte du délai entre la fin du compactage et la première mesure. La valeur de masse d'eau perdue choisie comme étant 0 (première mesure) ne prend donc pas en compte la masse d'eau perdue pendant cette période. La valeur de A négative peut être interprétée comme la masse d'eau perdue depuis la fin du compactage et avant la première mesure. Finalement, cette valeur négative est due au choix de compenser le décalage entre la fin du compactage et la première mesure par l'ajout d'une constante, l'ordonnée à l'origine, comme évoqué à la section 2.6.3.

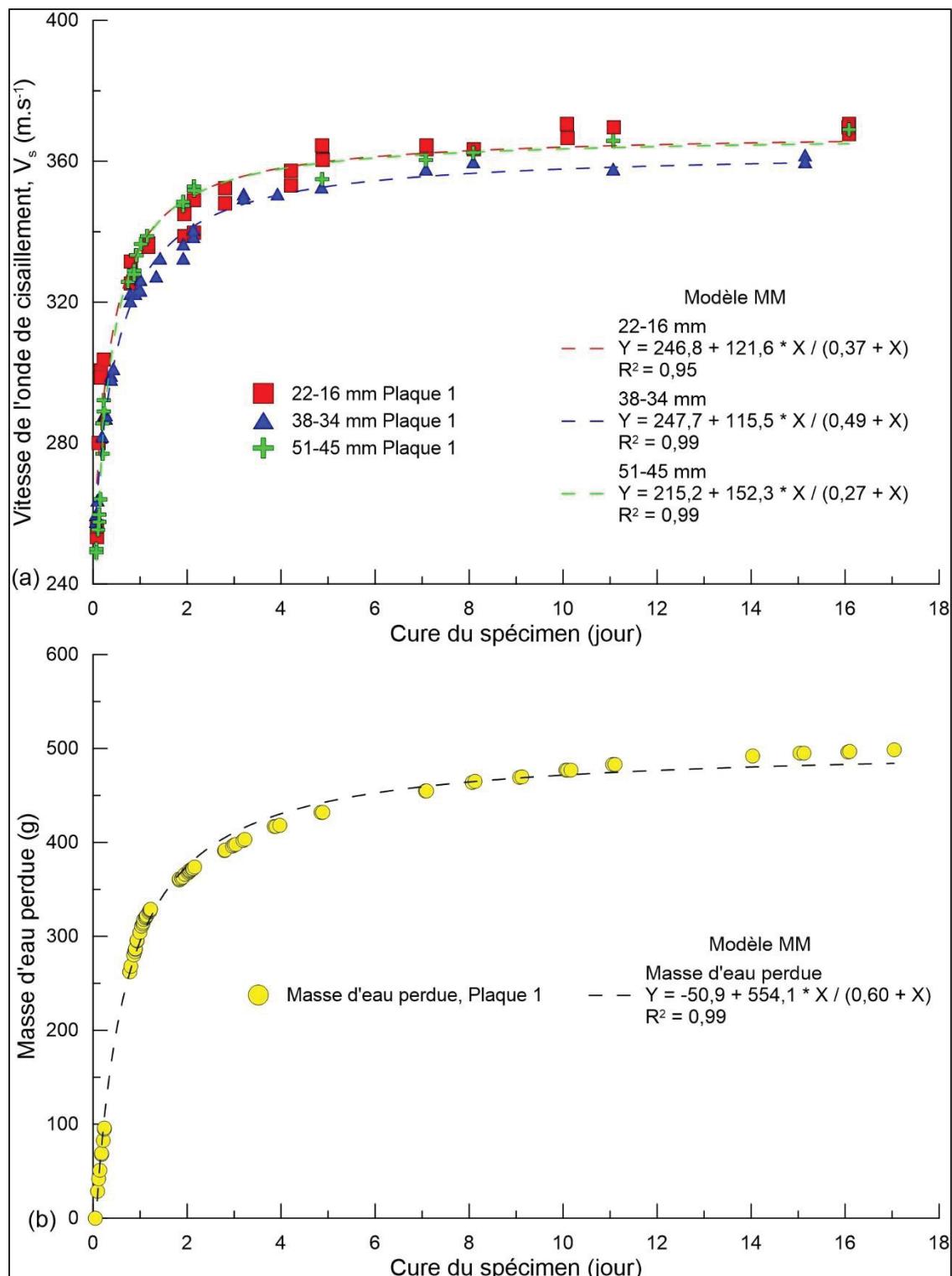


Figure 4.1 Évolution de V_s en fonction du temps, (a); évolution de la perte d'eau en fonction du temps, (b); plaque 1. Modélisation Michaelis-Menten

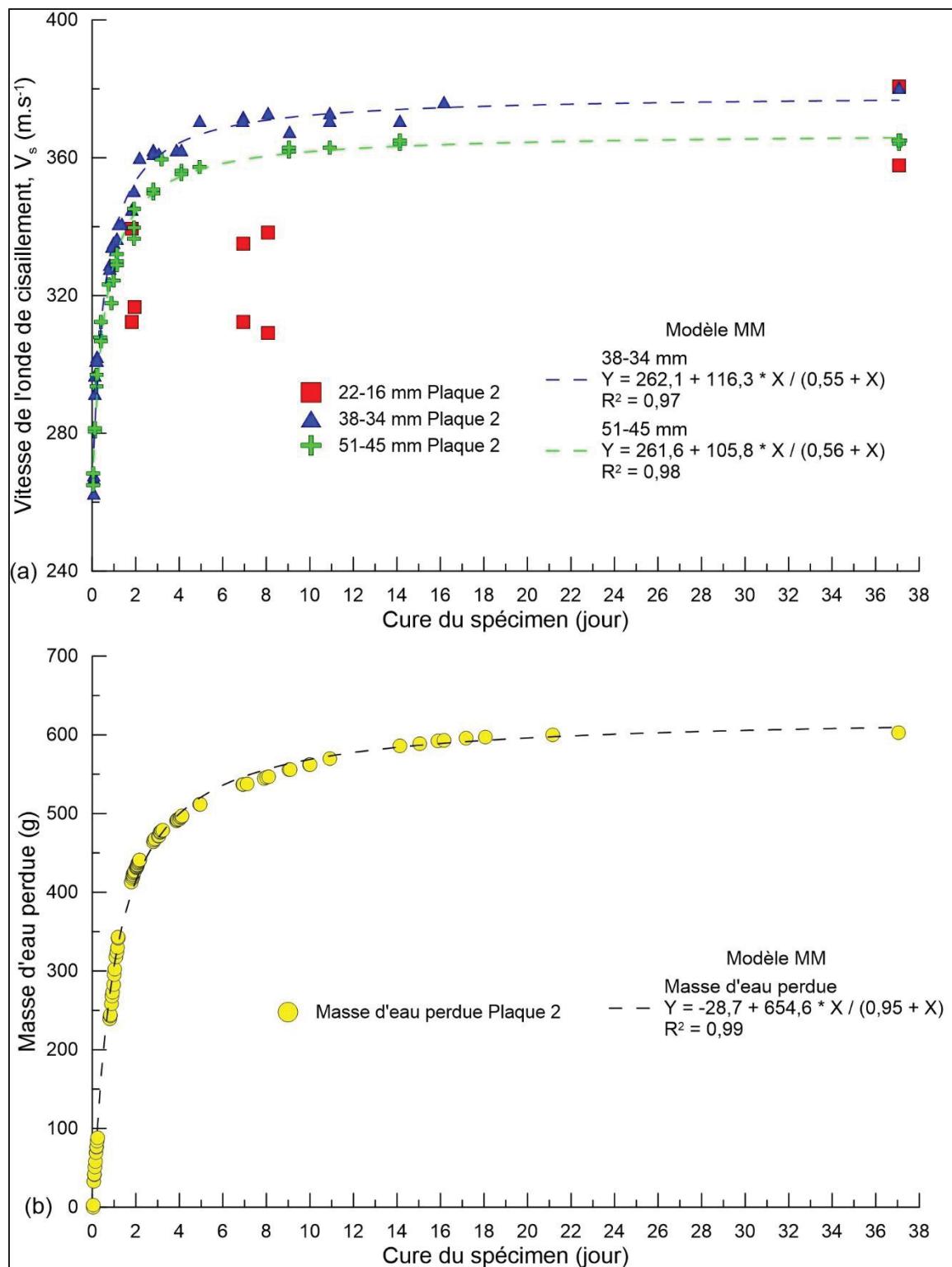


Figure 4.2 Évolution de V_s en fonction du temps, (a); évolution de la perte d'eau en fonction du temps, (b); plaque 2. Modélisation Michaelis-Menten

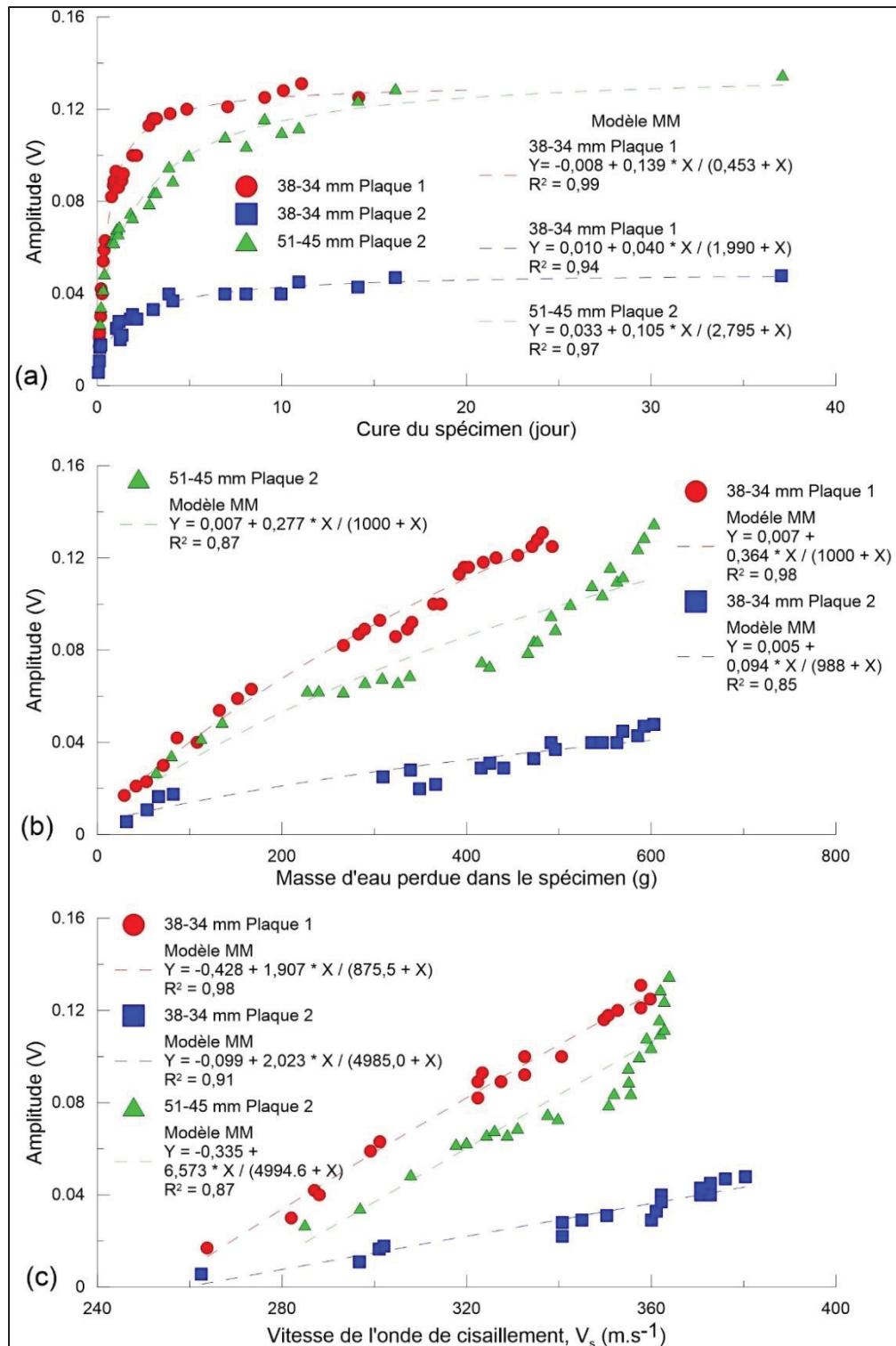


Figure 4.3 Évolution de l'amplitude des signaux en fonction du temps, (a); évolution de l'amplitude en fonction de la perte d'eau, (b); évolution de l'amplitude en fonction de la vitesse de l'onde de cisaillement, (c); Modélisation Michaelis-Menten

Le modèle MM permet également de modéliser l'évolution d'un paramètre en fonction d'un autre paramètre modélisable par le MM. Les Figures 4.3 B et 4.3 C présentent cela pour l'évolution de l'amplitude en fonction de la perte d'eau et de V_s , respectivement. Les Figures 4.4 et 4.5 présentent l'évolution de V_s en fonction de la masse d'eau perdue pour la plaque 1 et 2 respectivement.

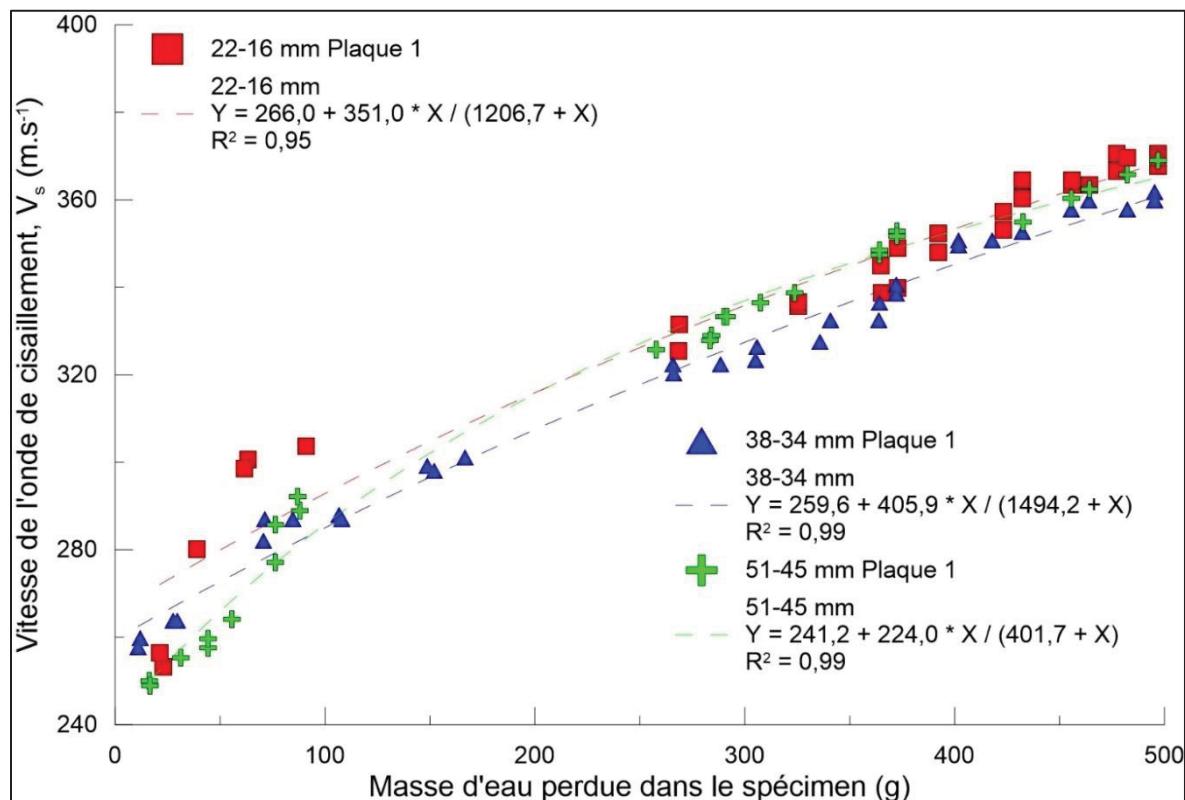


Figure 4.4 Évolution de V_s en fonction de la perte d'eau dans la plaque 1;
Modélisation Michaelis-Menten

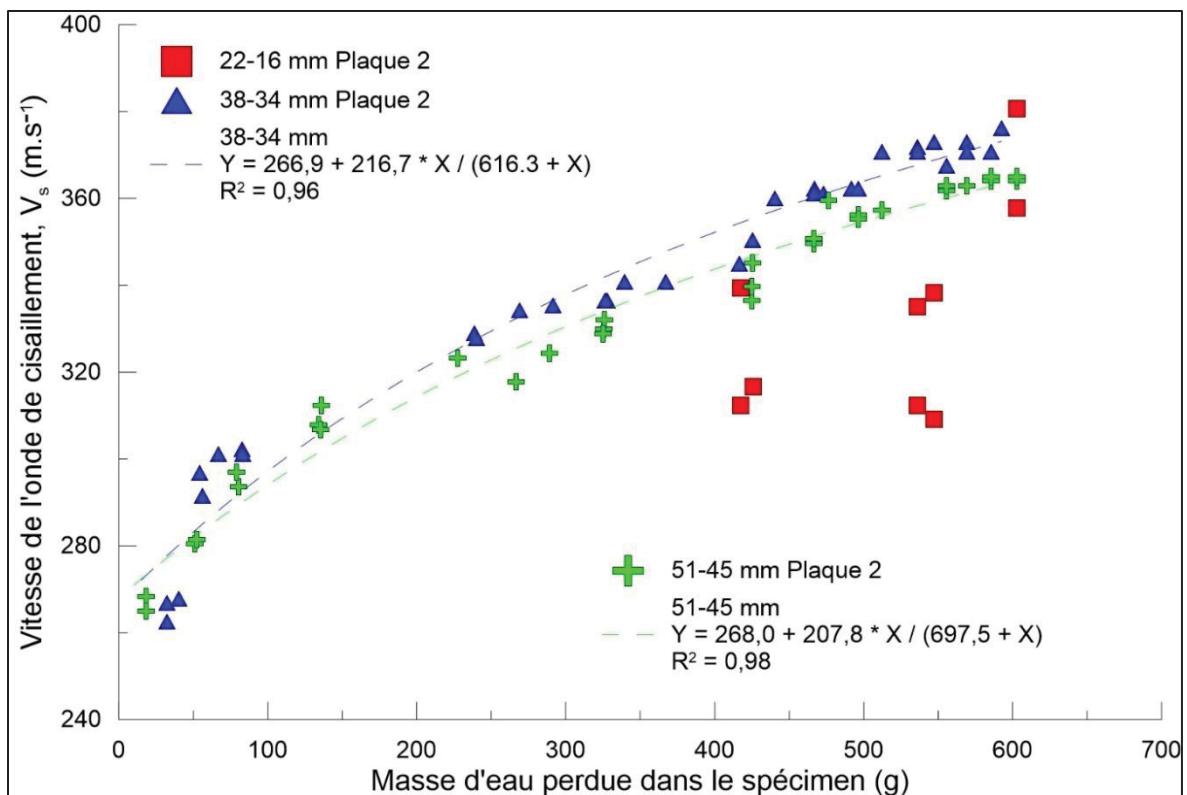


Figure 4.5 Évolution de V_s en fonction de la perte d'eau dans la plaque 2;
Modélisation Michaelis-Menten

La concavité des courbes indique que le paramètre V_s évolue plus rapidement que la perte d'eau (voir Annexe V pour plus de détails). La disparition de l'eau implique une montée en cohésion, mais il apparaît que la création de liens bitumineux, du fait de la rupture de l'émulsion, soit prépondérante. Il apparaît cependant que le modèle MM ne colle que difficilement aux valeurs réelles lorsque les valeurs de masse d'eau perdue sont faibles. Un nombre plus élevé de mesures en jeune âge permettrait certainement d'améliorer la corrélation entre le modèle et les données réelles, permettant une analyse plus solide.

4.3 Plaque et temps de mesure

Dans les travaux présentés au Chapitre 3, le choix d'une plaque comme format de spécimen a été motivé par la volonté d'éviter les effets de bord. Cependant, la géométrie des spécimens et la nature du matériau rendent la manipulation des spécimens compliquée. Il en va de même

pour la mise en place des couples de transducteurs, bien que le montage présenté à la section 2.6 soit utilisé. Les Figures 4.6 et 4.7 présentent l'évolution de V_s dans les plaques 1 et 2, respectivement, sur une période de 24 heures après le compactage.

Les premières mesures de V_s ont été effectuées 85 minutes après le compactage pour les deux plaques. La Figure 4.8 présente l'évolution de la perte d'eau et de la température de surface pour les plaques 1 et 2 sur une période de 24 heures et de 72 heures après le compactage. Les premières mesures de la masse des plaques ont été réalisées 75 minutes et 60 minutes après le compactage pour les plaques 1 et 2 respectivement. Il en est de même pour les mesures de la température de surfaces.

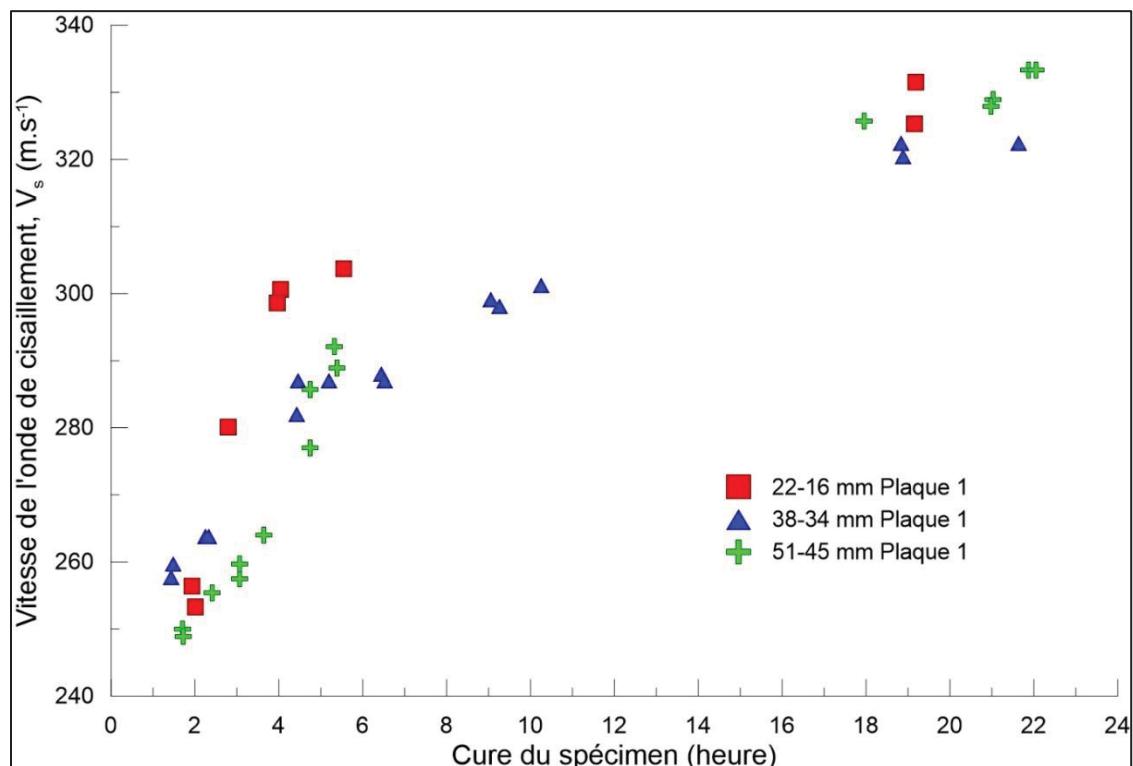


Figure 4.6 Évolution de V_s sur une période de 24 heures, plaque 1

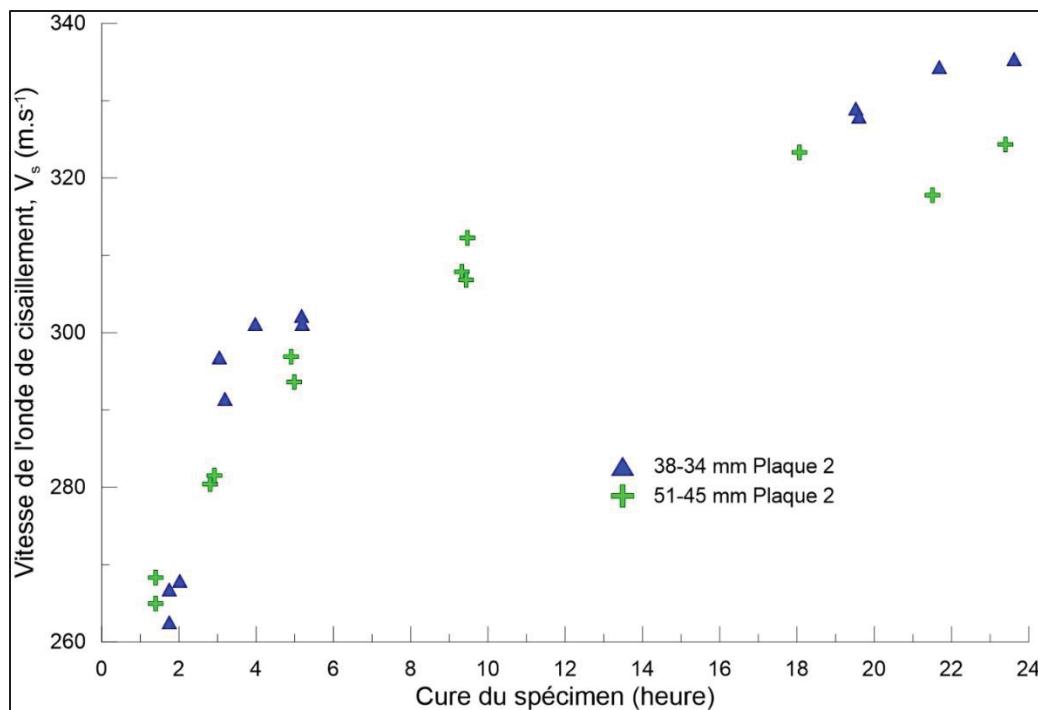


Figure 4.7 Évolution de Vs sur une période de 24 heures, plaque 2

Les Figures 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8 mettent en évidence un manque de mesures entre 6 et 18 heures après le compactage. Il apparaît que dans ce laps de temps, la température de surface atteint un pic avant de remonter pour se stabiliser à la température ambiante. Il serait intéressant d'observer le comportement de l'évolution de V_s et de la perte d'eau lors de ce phénomène. Il est évident que la température en surface et la perte d'eau dans la plaque sont liées. D'un point de vue thermodynamique, l'évaporation de l'eau est une réaction endothermique qui conduit donc à une baisse de la température lorsqu'une grande quantité d'eau s'évapore. À la vue des courbes de la Figure 4.8, il apparaît également que la variation de l'une influence l'autre.

La difficulté à bien modéliser l'évolution de V_s en fonction de la perte d'eau (Figure 4.4 et 4.5) est due au manque de mesure de V_s et de la masse des plaques en très jeune âge, et à fréquence élevée. L'évolution des valeurs de V_s lors des premières heures est bien plus importante que par la suite. Il est donc nécessaire de commencer les mesures plus tôt et de façon plus soutenue.

Il est à noter que des valeurs de V_s , paramètre mécanique intrinsèque, mesurées 1 heure et demie après le compactage contribuent déjà en une avancée de l'état des connaissances sur les ERF.

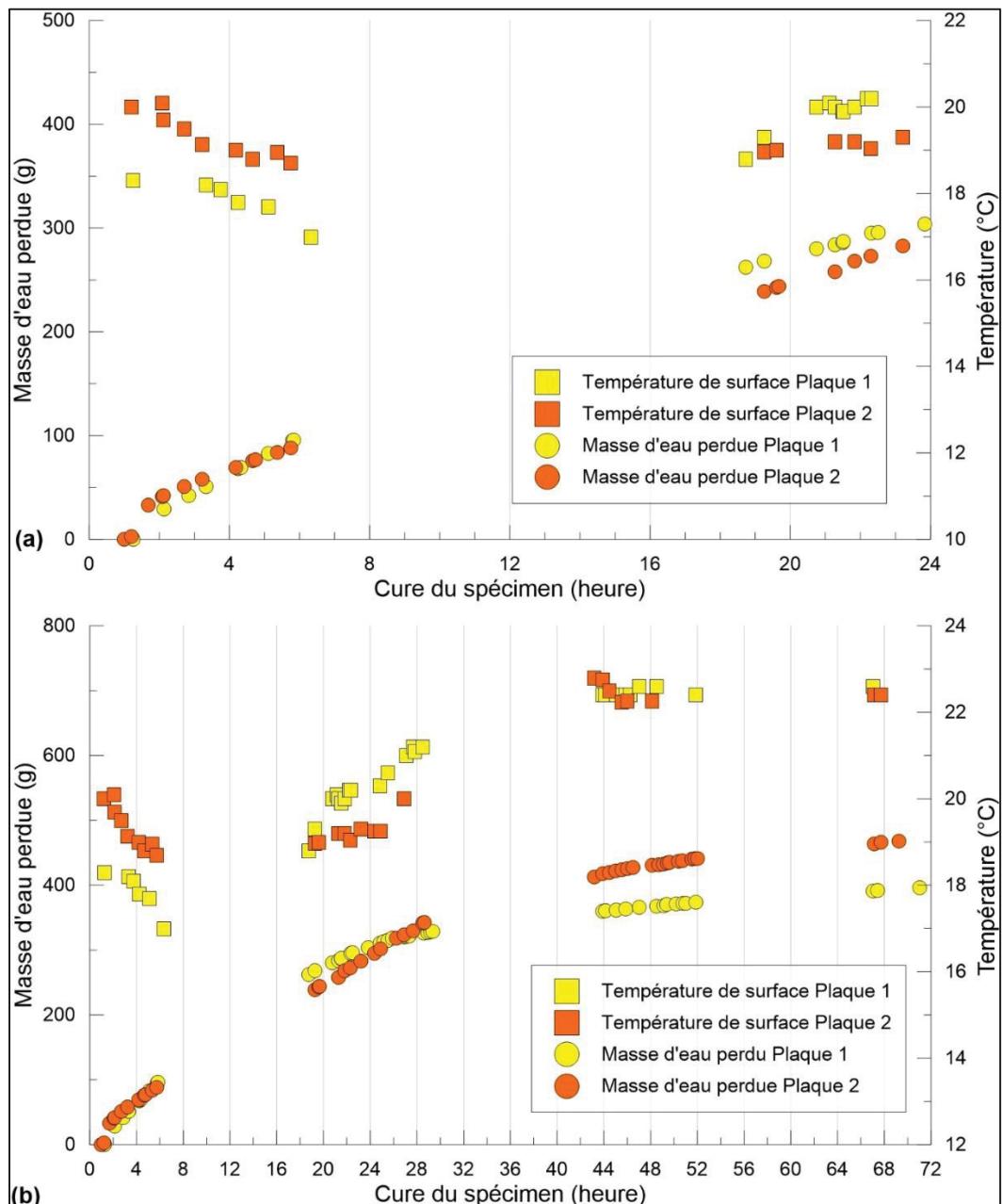


Figure 4.8 Évolution de la température de surface et de la masse d'eau perdue pour les plaques 1 et 2; (a) période de 24 heures après la compaction; (b) période de 72 heures après la compaction

4.4 Essais préliminaires

Pour permettre une prise de mesure encore plus tôt après le compactage, des essais préliminaires sur des spécimens d'ERF compactés à la PCG ont été réalisés. La présente section décrit ces travaux.

4.4.1 Matériaux

Des essais ont été réalisés sur des spécimens cylindriques compactés à la PCG. Le mélange était composé de 100% de GBR (0-20mm), 2 % de bitume d'ajout (CSS-1 de McAsphalt, 67% de bitume), 2% d'eau d'ajout et 1% de ciment Portland (GU 10 de Ciment Québec). Une masse d'eau équivalente à $\frac{1}{4}$ de la masse du ciment a été ajoutée pour permettre une bonne hydratation de celui-ci. Les spécimens ont été compactés à des teneurs en vide différentes. Le Tableau 4.2 présente les informations de chaque spécimen. À des fins de concordance avec la section 2.4.2 et le Chapitre 4, les spécimens testés se nomment Contrôle-X.

Comme décrit à la section 2.4.2, la cure des spécimens Contrôle-17_1 à 3 consiste en 7 jours dans une étuve. Par la suite, les spécimens sont laissés à l'air libre. Le spécimen Contrôle-12 a subi une cure de quatre jours dans une étuve à 50°C et 50% d'humidité suivie d'une journée à l'air libre.

Tableau 4.2 Informations relatives aux spécimens pour les essais préliminaires

Spécimen	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Teneur en vide (%)
Contrôle-17_1	17,1	100,0	17,1
Contrôle-17_2	17,5	100,0	17,5
Contrôle-17_3	17,2	100,0	17,2
Contrôle-12	12,4	100,0	12,4

4.4.2 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale est décrite à la section 2.7.2.2.

Les couples de transducteurs utilisés sont les 19-16 mm, 26-22 mm A et 36-31 mm.

4.4.3 Résultats

Il apparaît qu'un spécimen cylindrique obtenu à la PCG peut être manipulé, avec précaution, afin d'installer des transducteurs piézoélectriques rapidement. Aucun bris n'a été observé sur le cylindre à la suite des premières mesures. La première mesure a pu être réalisée 20 minutes après la fin du compactage. Ce délai prend en compte le démoulage du spécimen, son transport et la mise en place du premier couple de transducteurs.

Les Figures 4.9 et 4.10 présentent l'évolution de V_s avec 3 couples de transducteurs et l'évolution de la perte de masse d'eau dans le spécimen Contrôle-17_3. L'évolution de la perte d'eau dans les spécimens Contrôle-17_1 et Contrôle-17_2 est présentée pour comparaison. La période de cure est de 50 jours pour la Figure 4.9 et de 48 heures pour la Figure 4.10. La modélisation MM est effectuée sur la cure totale.

Le modèle MM est utilisé avec succès pour modéliser l'évolution de V_s et de la perte d'eau dans le spécimen. Comme montré dans les travaux du Chapitre 3, l'évolution est rapide lors des premières heures. Du fait de la géométrie du spécimen et de la cure dans l'étuve à 50°C l'évolution est plus rapide que pour les plaques étudiées au Chapitre 3, comme le montrent les valeurs du paramètre C dans la modélisation MM de la section 4.2. Une différence apparaît dans l'évolution de la perte d'eau entre les spécimens Contrôle-17_1 et 2 et le spécimen Contrôle-17_3. Cela vient du fait que le spécimen Contrôle-17_3 est resté plus longtemps hors de l'étuve afin de réaliser les essais de mesure de V_s au moyen du P-RAT. La perte d'eau en jeune âge est donc plus faible.

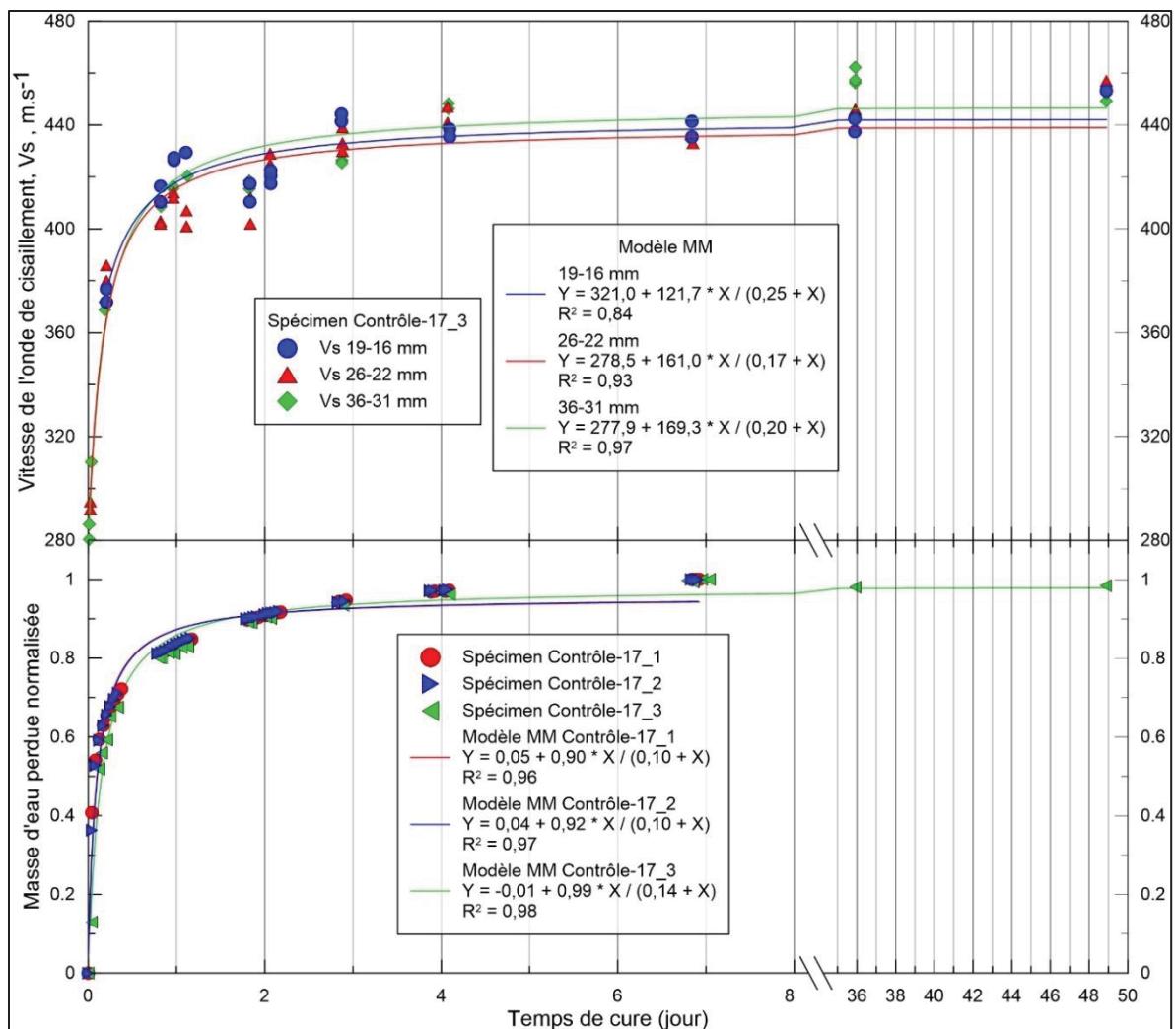


Figure 4.9 Évolution de la perte d'eau et de V_s en fonction du temps de cure du spécimen Contrôle-17_3 sur une période de 50 jours

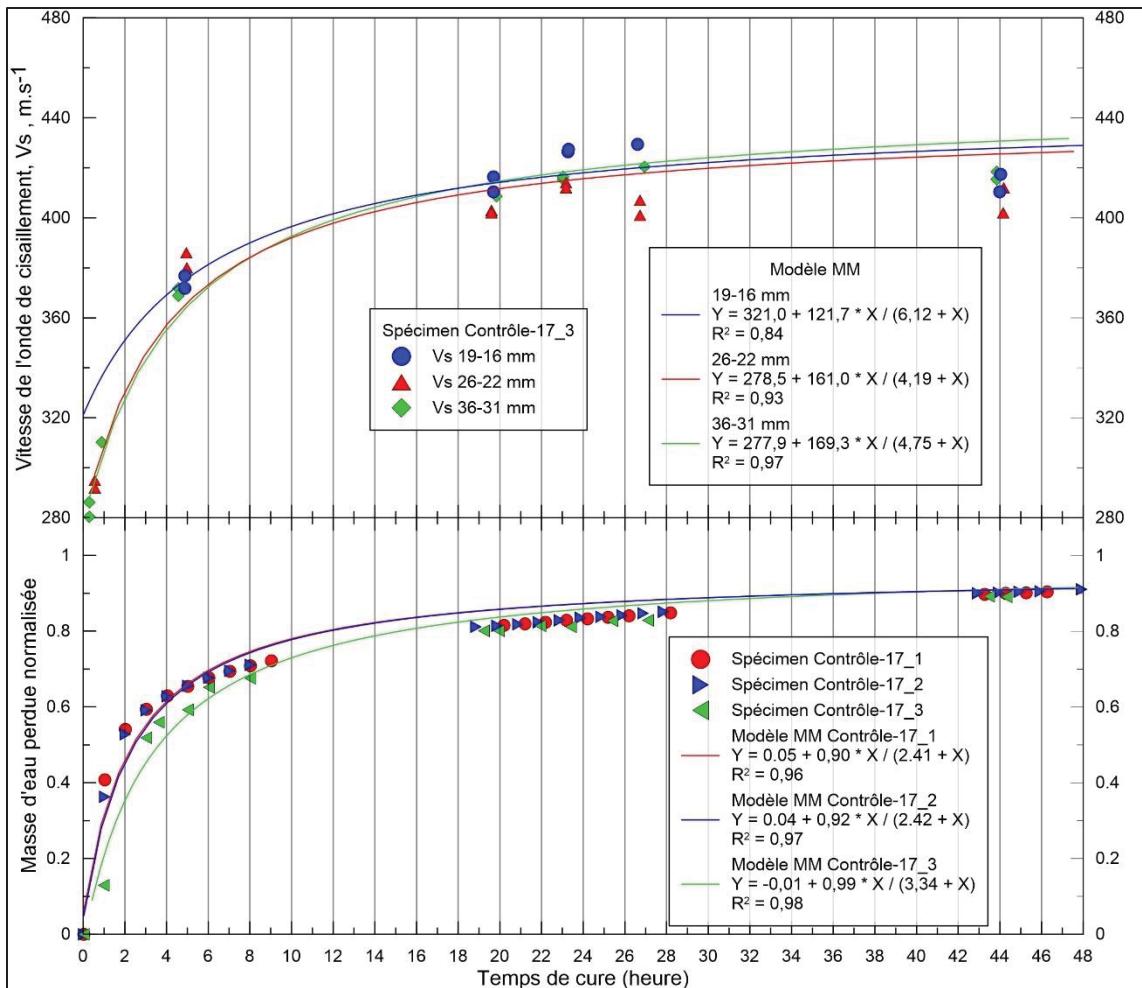


Figure 4.10 Évolution de la perte d'eau et de V_s en fonction du temps de cure du spécimen Contrôle-17_3 sur une période de 2 jours

Les mesures de P-RAT sur le spécimen Contrôle-12, après la cure décrite à la section 4.4.1, donnent des valeurs de V_s de 578, 570 et 586 m.s^{-1} pour les couples de transducteurs 19-16 mm, 26-22 mm A et 36-31 mm. Le Tableau 4.3 présente une comparaison entre des valeurs de V_s obtenues pour le spécimen Contrôle-12 à celles du spécimen Contrôle-17_3. On note une augmentation significative.

Tableau 4.3 Comparaison des valeurs de V_s des spécimens Contrôle-12 et Contrôle-17_3

	Valeur de V_s pour les couples de transducteurs ($m.s^{-1}$)			
Spécimen	19-16 mm	26-22 mm	36-31 mm	Moyenne
Contrôle-12	578	570	586	578
Contrôle-17_3	453	457	452	454

Pour un mélange similaire, les valeurs de V_s augmentent lorsque la teneur en vide diminue. Cela concorde avec la littérature (Nazarian et al., 2005; Zargar et al., 2019; Hou et al., 2022; Orosa et al., 2022). En effet, un meilleur compactage implique un meilleur contact entre les granulats et donc un chemin plus court pour traverser le spécimen. Il en résulte une vitesse de propagation de l'onde de cisaillement plus élevée.

4.5 Conclusion

La modélisation des résultats présentés au Chapitre 3 par le modèle Michaelis-Menten est efficace, aussi bien pour l'évolution de la perte d'eau que pour l'évolution de V_s dans les spécimens d'ERF testés. Il apparaît que la géométrie des spécimens choisie, à savoir des plaques, impacte négativement la rapidité de la prise de mesure après le compactage. De plus, une planification des mesures avec une fréquence de mesure plus importante et mieux étalée permettrait d'améliorer l'observation des phénomènes se déroulant en très jeune âge.

Les essais réalisés sur des spécimens cylindriques compactés à la PCG permettent de réduire le délai entre la fin du compactage et les premières mesures. Ce délai est passé de 90 à 20 minutes. En prenant des précautions, et avec un montage adéquat, il est possible d'accélérer davantage la mise en place des transducteurs sur le spécimen et donc de réduire davantage le délai entre la première mesure et la fin du compactage du spécimen testé.

Finalement, une différence significative est observée dans les valeurs de V_s pour des spécimens de teneur en vide différente. La reproductibilité matérielle de la mesure n'a pas été testée cependant. Les conclusions précédentes servent à orienter les travaux présentés au Chapitre 5 et à améliorer le protocole expérimental et le montage expérimental présentés à la section 2.7.

CHAPITRE 5

EARLY-AGE STIFFENING OF COLD RECYCLED BITUMINOUS MATERIALS USING SHEAR WAVE VELOCITY

Quentin Lecuru^a, Yannic Ethier^b, Alan Carter^c, Mourad Karray^d

^{a,b,c} Department of Construction Engineering, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

^d Department of Civil Engineering, Université de Sherbrooke,
2500 Boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1

Article accepté dans « Journal of Testing and Evaluation », mars 2025

ABSTRACT

The characterization of cold recycled bituminous materials (CRM) at a very young age, shortly after compaction, is inherently challenging due to the nature of the material. The granular aspect of CRM at this stage and its high-water content render the use of conventional mechanical techniques impractical. Following on from previous work, the use of a non-destructive technique based on the frequency analysis of mechanical elastic shear waves, P-RAT, has enabled to assess the behaviour of cold in-place recycled material treated with bitumen emulsion from 10 minutes after compaction to 30 days of curing. Emphasis on shear wave velocity (V_s) measurements during the early age confirmed the rapid stiffening of the mix along with the departure of water present in the mix. A 6°C drop of the surface temperature is observed along with this rapid increase of V_s and water loss. The initial and final V_s values range from 287 m.s⁻¹ to 330 m.s⁻¹ and from 461 m.s⁻¹ to 578 m.s⁻¹ respectively. In order to assess the capabilities of P-RAT, specimens with different void contents were tested, mainly 12 %, 15% and 17 %. It was observed that in each tested specimens, a similar behaviour was exhibited during the first few hours of curing. Based on these observations, hypotheses are put forth regarding the phenomena governing the increase in stiffness during this period. Finally, the influence of the compaction of the specimens on the V_s values is consistent and comparable with the information available in the literature for such CRM.

Keywords: shear wave velocity (V_s), cold recycled material (CRM), early age, air voids ratio, P-RAT

5.1 Introduction

With traffic and time, pavements deteriorate, and rehabilitation is needed to ensure that the pavement lasts and remains safe. By milling and reusing some part of the removed layers, recycling can be done. The reclaimed asphalt pavement (RAP) can either be partly integrated into a hot mix asphalt (HMA) mix or reused completely to create a new pavement layer.

Cold recycling is achieved by mixing RAP, bitumen in the form of bitumen emulsion or foamed bitumen and added water. Cement and other additives can also be included. The mechanical behaviour of cold recycled materials (CRMs) has been studied, but there is a deficit concerning its early age behaviour and performance, mainly due to its changing, evolutive behaviour over time and the limited number of test methods capable of characterizing this not completely bound material. CRM can be prepared either in plant or in-place, but in both cases, the material has to support traffic quickly, before it is completely cured. An early reopening to the traffic results in changes, damage, to the recently laid base layer.

In several regions of the world, there is no specific regulation pertaining to the timing of the covering of CRM materials with a course layer. However, in Ontario (Canada), a Cold In-place Recycling (CIR) materials must be cured for a minimum of two weeks, and the moisture content must be less than 2% before any wearing surface can be placed on top (MTO, 2015). If the CIR material is covered before it has fully cured, its stiffness will be less than anticipated, and moisture may become trapped, potentially leading to damage during the winter months. In the case of a late covering, damage could be induced by the traffic to the CIR layer (Carter et al., 2008).

A better understanding of CRM behaviour at young age would improve the management of such renewed layers and could prevent early damage that would jeopardize the lifespan of the pavement.

5.2 Objectives

The work presented here is part of a research project on the characterization of cold recycled asphalt mixes using shear wave velocity. The objective of this particular study is to evaluate the behaviour of CIR material treated with bitumen emulsion at very young age. This is achieved through the use of a non-destructive approach to measure the shear wave velocity (V_s), which is capable of characterizing the material before hardening. The work presented here investigates the influence of the air voids on the evolution of V_s , an intrinsic mechanical parameter. An effort is made to link the surface temperature of the tested specimens to its curing condition and mechanical evolution.

5.3 Background

5.3.1 CRM and curing conditions

In CRM, water greatly influences the mechanical behaviour of mixes at early ages. Although it is needed for workability issues and to ensure a homogeneous distribution of the added binder (Brown & Needham, 2000; Oruc, Celik, & Akpinar, 2007; Graziani et al., 2018), its presence at young age results in the material being considered as granular (Santagata et al., 2010; Juntao et al., 2015; Guatimosim et al., 2016; Orosa et al. 2022b). With the water leaving the mix, CRM becomes a cohesive material. Some of the water gets out during the compaction process, while the remainder will eventually evaporate over time. Therefore, mixture properties such as aggregates size, targeted void ratio or mix composition (Godenzoni et al., 2015; Kuchiishi et al., 2021; Orosa et al., 2022a), and curing condition such as humidity or heat (Cardone et al., 2015; Juntao et al., 2015; Guatimosin et al., 2016; Graziani et al., 2017; Graziani et al., 2018), influence the curing of the CRM.

Carter et al. (2008) performed rutting tests on emulsion treated CIR materials. They showed that there is no rutting resistance at young age, and that curing is necessary to reach acceptable values. The work done by Guatimosim et al. (2016) on foam treated CRM support this. It appears that the rutting rate grows smaller as the curing period gets longer. Therefore, at early

age, the pavement is susceptible to develop permanent deformations. This implies that conventional testing can only be achieved if a certain amount of time has elapsed or if specific curing conditions are met, which accelerates the process.

For instance, Graziani et al. (2018) (35 to 40 °C, 65 % humidity and 4 hours at 20 °C) and Juntao et al. (2015) (20 to 30 °C, 60 and 90 % humidity) performed Indirect Tensile Strength (ITS) test on CRM materials after 1 day of curing. Graziani et al. (2017; 2018) showed a correlation between ITS results and the water loss in CRM material under a specific curing condition. Both ITS and water loss evolution with respect to the curing time were modelled with a Michaelis-Menten model. Juntao et al. (2015) also observed the evolution of ITS values. They highlighted a quick increase during the first days of curing, followed by a slower increase. A similar evolutive behaviour was observed in CRMs characterized in term of resilient modulus by either Indirect Tensile Strength Modulus (ITSM) tests (Goli et al. 2023) or triaxial test (Santagata et al., 2010; Orosa et al., 2022b; Orosa et al., 2023) and in term of complex modulus (Cardone et al., 2015; Nguyen et al., 2023). In the same direction, Lecuru et al. (2019) showed a correlation between shear wave velocity (V_s) and the water loss inside CIR slabs. The use of Piezoelectric Ring Actuator Technique (P-RAT) allowed monitoring the behaviour of CIR material 1.5 hours after the end of compaction, without any accelerated cure.

Orosa et al. (2022a) tested CRM made of various types of RAP. The size distribution of the RAP influences the volumetric properties of the CRM. Moreover, the ITSM, ITS and dynamic Impact Resonance (IR) tests showed that a lower void content results in higher stiffness, as expected.

5.3.2 Wave based technique and P-RAT

5.3.2.1 Wave based technique

Since standard mechanical tests are problematic at very young age, the use of wave-based tests is proposed. Wave-based methods are non-destructive and, for most of them, non-intrusive. Such methods are used to get wave velocity, attenuation of the signals, resonance frequency,

and much more mechanical parameters. These parameters can directly characterize the tested materials (shear wave velocity in soils, for instance) (Karray et al., 2015; Elbeggou et al., 2019) or be used to determine connected parameters such as modulus (Ultrasonic Pulse Wave, Impact Resonance methods) (Nazatian et al., 2005; Mounier et al., 2012; Abd Elhafeez et al., 2014; Larcher et al., 2015; Mounier et al., 2016; Carret et al., 2018; Hou et al., 2022; Orosa et al., 2022a). Wave-based methods can either be time domain or frequency domain, the first one being simpler and more straightforward than the second one. Indeed, frequency domain methods require complex signal treatment, but lead to a better accuracy.

5.3.2.2 Piezoelectric ring actuator technique (P-RAT)

Initially developed for geotechnical purposes, the P-RAT is a frequency domain method that uses mechanical shear waves. It is based on the cross-correlation method, which compares two signals, emission and reception at the same frequencies to give the shear phase velocity (V_{ph}). V_{ph} vary with frequency. Spectral analysis of shear waves propagated in a specimen is used, and back calculations provide the shear wave velocity (V_s) instead of the phase velocity (V_{ph}). As V_s is an intrinsic mechanical parameter, it is constant with the frequency.

A classical P-RAT setup is composed of two piezoelectric transducers, acting as emitter and receiver for the signal, which are connected to a signal generator. The transducers are composed of a piezoelectric ring in which a metallic cylinder is fitted using epoxy. A shield wire is welded on each side of the piezoelectric ring. Due to its material nature, the piezoelectric ring will produce a radial elastic deformation when subjected to an electrical pulse. This deformation is transmitted to the metallic cylinder that will transfer it to the specimen. Figure 5.1 presents a general scheme of the P-RAT configuration in a geotechnical application.

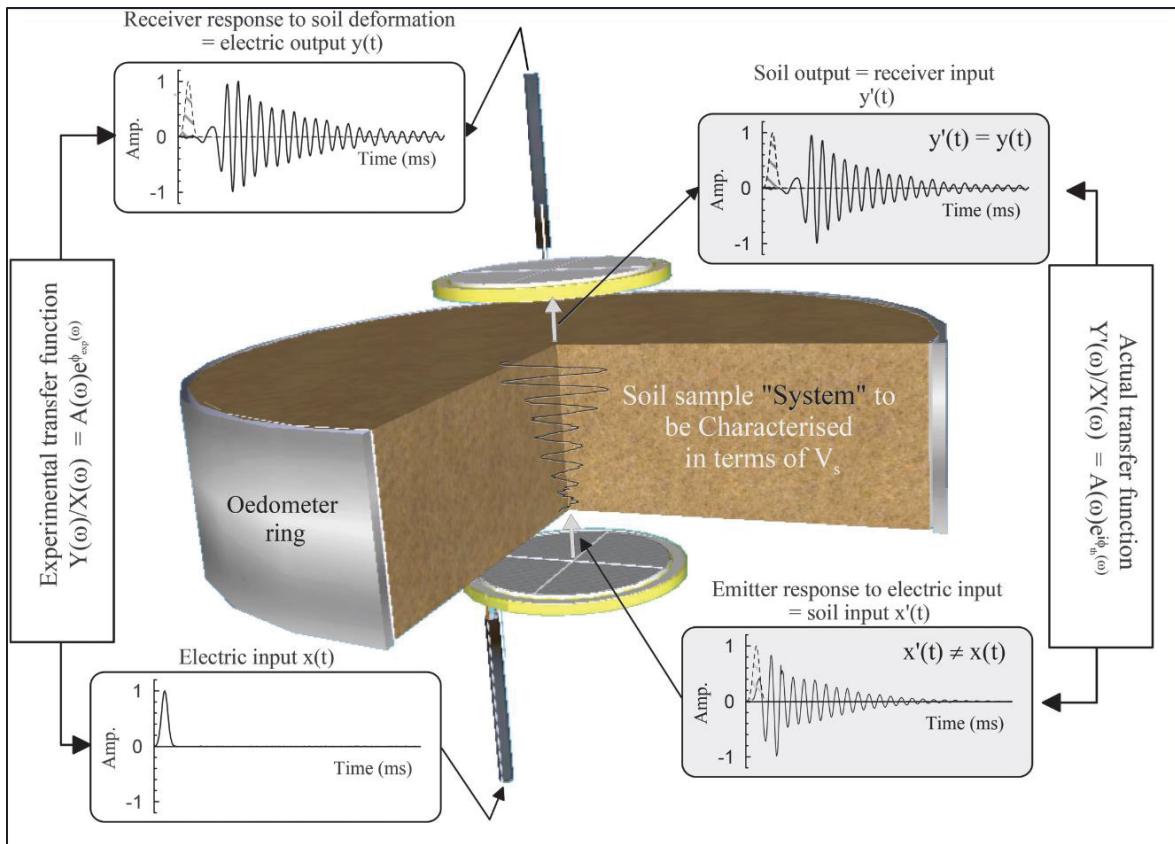


Figure 5.1 General scheme of the P-RAT setup, in a geotechnical application
Adaptée de Karray et al. (2015, p. 5)

The inner cylinder serves two other purposes. It prevents the piezoelectric ring to be in direct contact with the tested specimen, reducing the generation of compressive waves in the specimen. It also makes the test non-intrusive.

The general concept of the P-RAT lies on the fact that a transfer function can be associated with a dynamic system. A transfer function is a way of mathematically express the reaction of a system (output) in terms of its entrance excitation (input).

In the P-RAT configuration presented in Figure 5.1, two transfer functions are presented. The experimental one consists of the input in the emitter and the output of the receiver, two signals that are known. The actual transfer function, associated with the tested specimen, refers to the signal that enters the specimen (after getting out of the emitter) and the one exiting the specimen (then entering the receiver), two signals that are unknown. The transducers are

considered as a single degree of freedom system, and their transfer function is well known. As the transducers response is known, it is possible to determine the perturbation caused by the tested system, and the phase shift induced by this perturbation is calculated. Back calculations lead to a constant velocity, which is the shear wave velocity (V_s) of the tested specimen. Details may be found in Karray et al. (2015).

P-RAT has been firstly used to characterize soils (Karray et al., 2015; Elbeggo et al., 2019). It has also been used to characterize concretes (Naji et al., 2018), and bituminous materials (Lecuru et al., 2019) at young age and beyond. Shear waves are particularly adapted to CRMs as these materials contains a high quantity of water at young age. Because shear waves do not propagate through water, their use will only characterize the material's skeleton.

5.4 Materials and Methods

The experimental program can be split into two distinct parts. The first part consists of monitoring the evolution of V_s , the water loss and the surface temperature of 3 specimens of the same mix compacted at different void ratio during 30 days of curing at room temperature. The second part consists of testing additional specimens which underwent an accelerated cure in an oven, with the P-RAT. The obtained V_s values will be used as control for reproducibility concerns. Figure 5.2 summarizes the overall experimental campaign. Its components are described further.

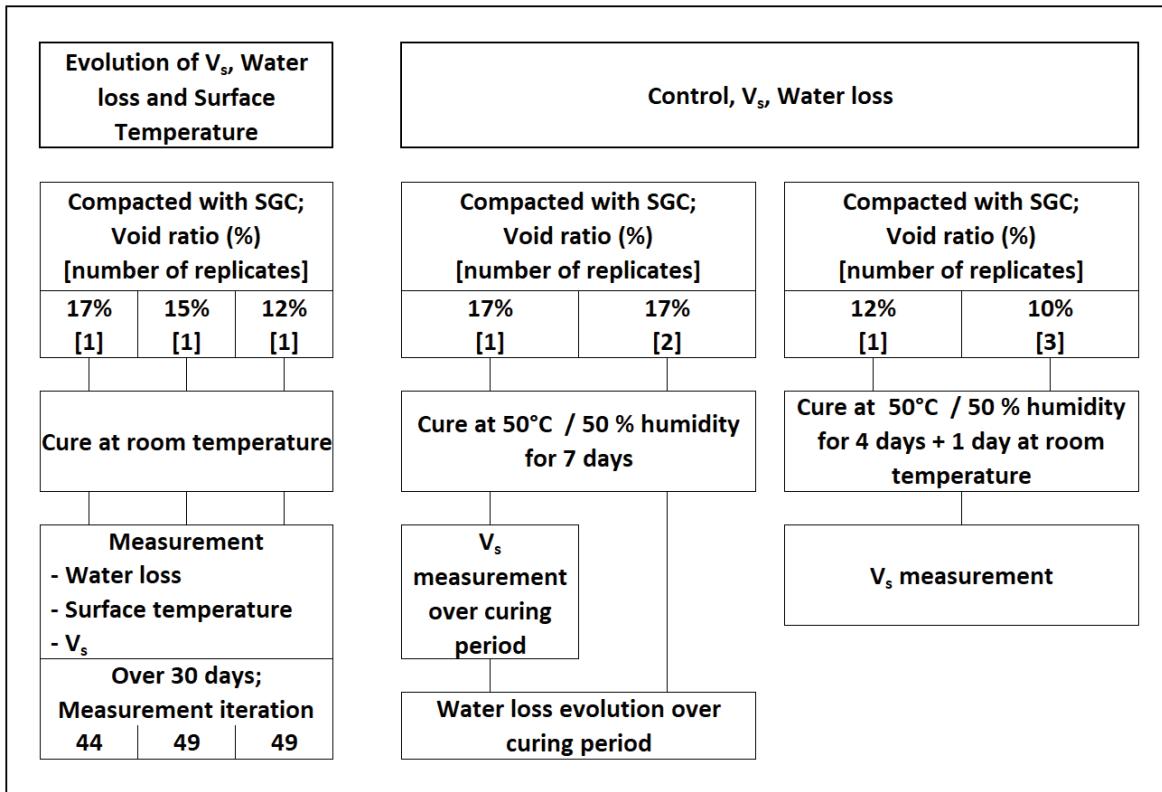


Figure 5.2 Scheme of the experimental campaign

5.4.1 Materials used

The tested specimens were made of 100 % RAP, 2 % added bitumen in the form of an asphalt emulsion (Cationic Slow Setting, 67% of bitumen from McAsphalt), 2 % added water and 1 % of Portland cement (GU10 from Ciment Québec). All the percentage are in mass related to the mass of RAP. The water was first added to the RAP and hand mixed for 1 minute, followed by the emulsion, 1 minute of mixing then the cement before 1 more minute mixing.

Cylindrical specimens were obtained using the gyratory shear compactor (GSC) with a 100mm mold. The GSC was chosen over the slab compactor to reduce the time between the end of compaction and the beginning of the V_s monitoring. Ten specimens were made with different targeted void ratio. Three of them are monitored over 30 days of curing at room temperature and information regarding them are presented in Table 5.1.

Tableau 5.1 Information concerning specimens monitored over 30 days

Specimen	Void ratio, %	Heigh, mm	Number of gyrations	Total duration from beginning of compaction to demolding, min	Theoretical water mass before compaction, g
C-17	17.5	75.0	51	7	41.07
C-15	15.1	74.5	72	8	41.75
C-12	12.1	75.0	195	12	43.68

The rest serves as control specimens and the information regarding them can be found in Table 5.2. These specimens were cured in an oven at 50°C and 50 % of relative humidity for 4 days then left 1 day at room temperature before testing. Specimens Control-17_1 to 3 were tested while curing.

Tableau 5.2 Information concerning control specimens

Specimen	Void ratio, %	Heigh, mm	Curing condition
Control-17_1	17.1	99.3	7 days 50°C, 50 % humidity
Control-17_2	17.5	99.7	
Control-17_3	17.2	99.4	
Control-12	12.4	100.0	4 days 50°C, 50%humidity + 1 day at room temperature
Control-10_1	10.6	98.2	
Control-10_2	10.4	97.9	
Control-10_3	10.6	98.0	

5.4.2 Experimental setup

The setup is composed of a plate covered with a foam layer to fit the shape of the specimen. To avoid excessively moving the specimen at young age, the plate is set on a scale, as shown in Figure 5.3 A. The mass of the plate and foam is deducted from the mass of the whole setup to get the mass of the specimen and thus, the evolution of its water loss.

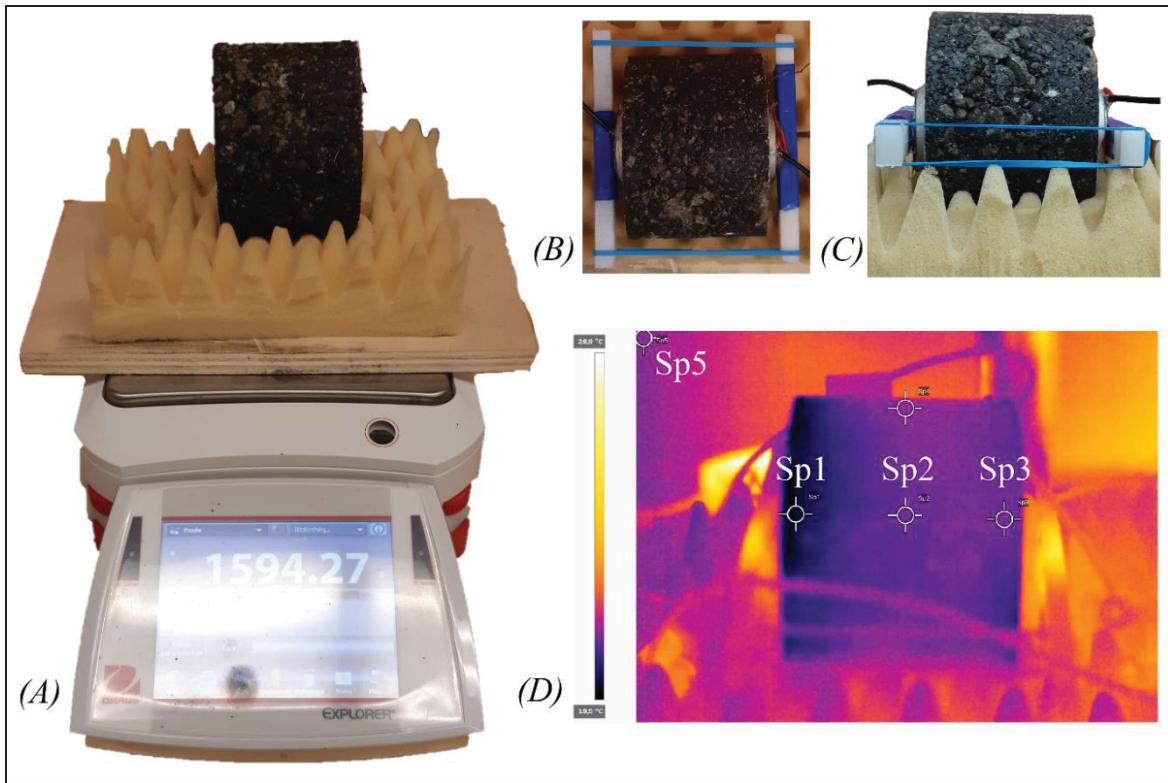


Figure 5.3 Experimental setup with a specimen, (A); closeup view of a specimen with the 36-31 mm transducer pair, (B) and (C); Thermal picture of the specimen (D)

A FLIR thermal camera is used to take thermal pictures of the specimen. The pictures are then analyzed in FLIR Thermal Studio to get the surface temperature of the specimen. The room temperature was measured with a thermometer. Figure 5.3 D displays an example of a thermal picture analysis. The surface temperature is the mean value of 3 measured spots (SP1 to 3) on the specimen. A reference spot is used to correct the surface temperature with the actual room temperature (SP5).

With regard to the P-RAT measurement, the transducers are positioned with great care on either side of the specimen, ensuring their alignment (Figures 5.3 B and 5.3 C). One transducer is the emitter and is connected to a Handyscope HS3 100MHz (TiePieEngineering) signal generator. The other transducer acts as a receiver and is connected to another entry of this apparatus. A 7602M (Krohn-Hite) amplifier is used on the generator side. A personal computer is utilized to command the Handyscope which allows for the observation of both emission and

reception signals. Moreover, the entrance signal's form, amplitude, and frequency can be selected on the computer.

For repeatability and control issues, signals of varying shape and frequencies are employed during the testing of specimens with a given transducer pair. Each individual signal (one shape, one frequency) is transmitted 8 times in succession and stacked to remove potential noise. The stacked signals are then analyzed with a dedicated P-RAT software developed in Labview (National Instruments) with the concept obtained from Sherbrooke University (Karray et al., 2015).

In order to ensure control purpose and to enhance the reproducibility of the measurement, 4 transducer pairs of varying sizes were utilized during this study. In this text, they are referred to as transducer *Outer- Inner Diameter (mm)*. The four sets of transducers are as followed.

Transducers 19-16 mm are composed of a piezoelectric ring (type 2, from APC) with an outer and inner diameter of 19 and 16 mm respectively and 3 mm in height. A 6.3 mm high and 13 mm diameter aluminum inner stone is fitted inside the ring.

Transducers 26-22 mm A are composed of a piezoelectric ring (type 1, from APC) with an outer and inner diameter of 26 and 22 mm respectively and 3.5 mm in height. A 6.5 mm high and 20 mm diameter aluminum inner stone is fitted inside the ring.

Transducers 26-22 mm B are composed of a piezoelectric ring (type 2, from APC) with an outer and inner diameter of 26 and 22 mm respectively and 3.5 mm in height. A 6.5 mm high and 20 mm diameter aluminum inner stone is fitted inside the ring.

Finally, transducers 36-31 mm are composed of a piezoelectric ring (from Steminc) with an outer and inner diameter of 36 and 31 mm respectively and 3.5 mm in height. A 7.5 mm high and 29 mm diameter aluminum inner stone is fitted inside the ring.

5.4.3 Experimental methodology

5.4.3.1 Monitoring of the evolution

Following compaction, the cylindrical specimen is removed from the PCG mold, its surfaces are cleaned up and positioned on the experimental setup. One pair of transducers is used at a time. The transducers are precisely aligned with one another and maintained in contact with the specimen through the use of an elastic band. A good contact between the transducer and the specimen is essential for the acquisition of reliable signals, especially at young age. To prevent edge effects, the transducers are positioned in the center of the specimen's surface. However, if the contact is inadequate in this area, the transducers are shifted by a few mm on both ends of the specimen while maintaining a good alignment.

In this study, a measurement refers to a specific point in time after compaction. A typical measurement is comprised of the following steps. First, a pair of transducers is affixed to the specimen, after which a series of emission signals of varying shapes and frequencies are transmitted to the specimen and subsequently collected. Once this process is complete, the pair of transducers is removed and replaced with another, and the cycle is repeated. Second, once the signals for every pair of transducers have been collected, the mass of the specimen is measured. The water loss of the specimen is obtained by subtracting its mass at a specific time of curing from its mass after compaction. Therefore, the water loss presented in this study do not consider the water lost during compaction. Thermal pictures are taken to obtain the surface temperature of the specimen and the ambient temperature is measured. For every specimen, the first measurement was conducted approximately 10 minutes after the end of the compaction process. Emphasis was placed on the first hours of curing, as presented in the histogram in Figure 5.4. Four different bins are used to highlight this. As displayed in the planning, during the first day of curing, 28 measurements were conducted over a total of 49. Of these, 9 were conducted during the first hour of curing.

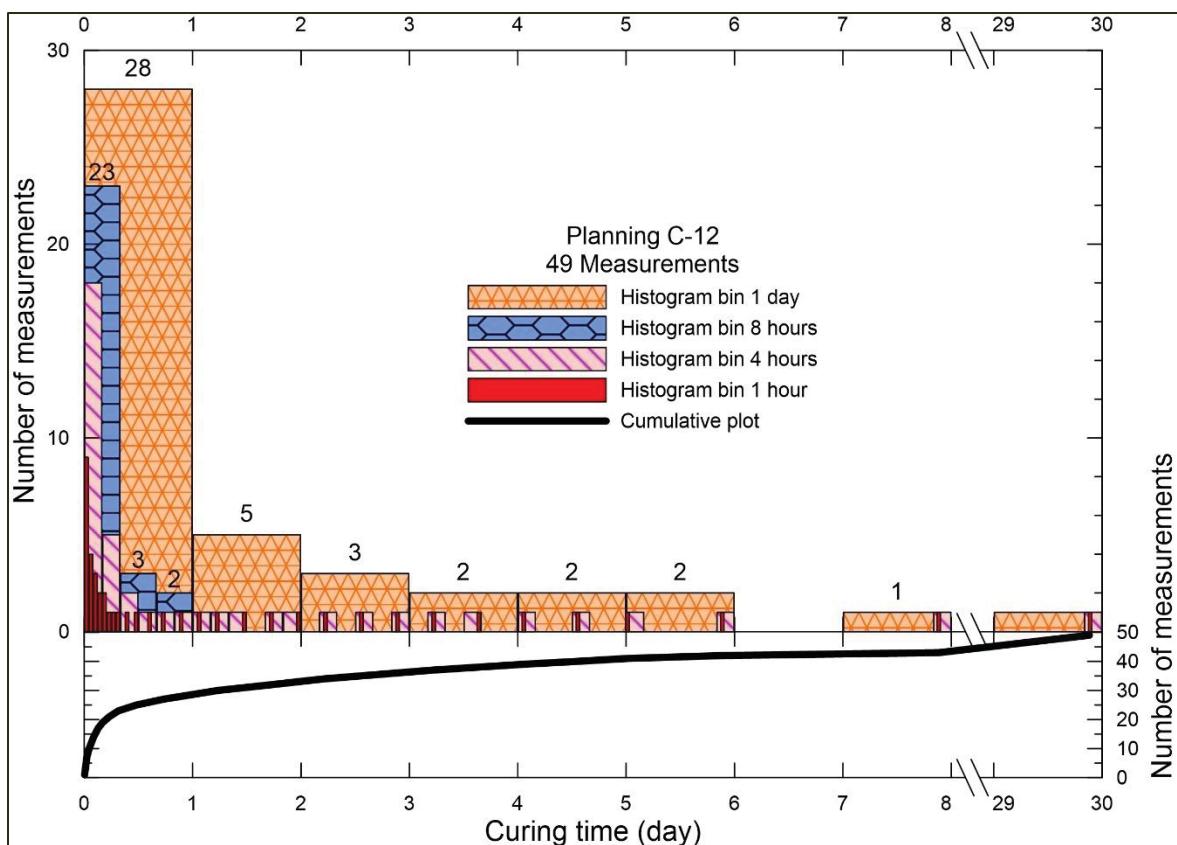


Figure 5.4 Experimental planning for specimen C-12

Due to the low stiffness of the specimen at early age and the brief interval between the initial measurements, a single pair of transducers, 36-31 mm, was utilized during the first 7 tests for C-12 and C-15, and the first 9 tests for C-17. Finally, a total of approximately 1200, 2000, and 1600 signals were collected for specimens C-12, C-15, and C-17, respectively, over the 30-day curing period. Those numbers do not include the stacking steps mentioned in the experimental setup section. The tests were conducted in an air-conditioned room, which may have influenced the curing conditions depending on the season. Moreover, the ventilation did not operate from midnight to 6 AM in the laboratory where the tests were performed.

Both water loss evolution and V_s evolution will be modeled by a modified Michaelis-Menten model. A classical MM model is (Graziani et al., 2017):

$$Y(t) = \frac{B * t}{(C + t)} \quad (5.1)$$

with B the maximum value and C the time of half-life (t value at which Y = B/2).

To consider the time delay between the end of compaction and the beginning of the first measurement, the MM model has been modified as follow:

$$Y(t) = A + \frac{B * t}{(C + t)} \quad (5.2)$$

with A being the minimal value and B+A now represents the maximum value and C the half-life (X value at which t = A + B/2)

As mentioned earlier, V_s is an intrinsic parameter and it is related to the elastic shear modulus and Young modulus through the following equation (Kramer, 1996; Jiang et al., 2011; Mounier et al., 2012; Mounier et al., 2016):

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (5.3)$$

with V_s the shear wave velocity (m s^{-1}), G the shear modulus (Pa), ρ the bulk density (kg m^{-3}) and ν the Poisson ratio.

5.4.3.2 Control

Specimens Control-17_1 and 2 were monitored for water loss during their cure. The specimens were removed from the oven, weighted, and put back in the oven. As for specimen Control-17_3, it was monitored in terms of water loss and V_s measurement during its curing period. Upon removal from the oven, the specimen was weighted and allowed to cool at room temperature for 1 hour before being tested with the P-RAT. Following completion of the test,

the specimen was returned to the oven. Ten P-RAT measurements were performed over a 7-day period. Finally, specimens Control-12 and Control-10_1 to 3 were tested with the P-RAT after their curing process was completed.

5.5 Results and Discussion

In this section, the water loss and the surface temperature are presented first. Then, the results of the V_s evolution in the 3 specimens tested are presented, and the relationship between V_s and void ratio is presented. Finally, the relationship between water loss and V_s is discussed.

5.5.1 Water loss

Figure 5.5 presents the water loss and the surface temperature evolution for specimens C-12, C-15 and C-17 during the first 48 hours. The water loss in Figure 5.5 does not consider the water loss during compaction. As shown in Figure 5.5, there is a rapid decrease of surface temperature at early age in each specimen. This is due to the evaporation of water, which is an endothermic transformation. The more intense the temperature decrease is, the higher the slope of the water loss curve is. It is assumed that the thermal impact of the low mass of cement used in the mix is negligible compared to the water evaporation and ambient changes.

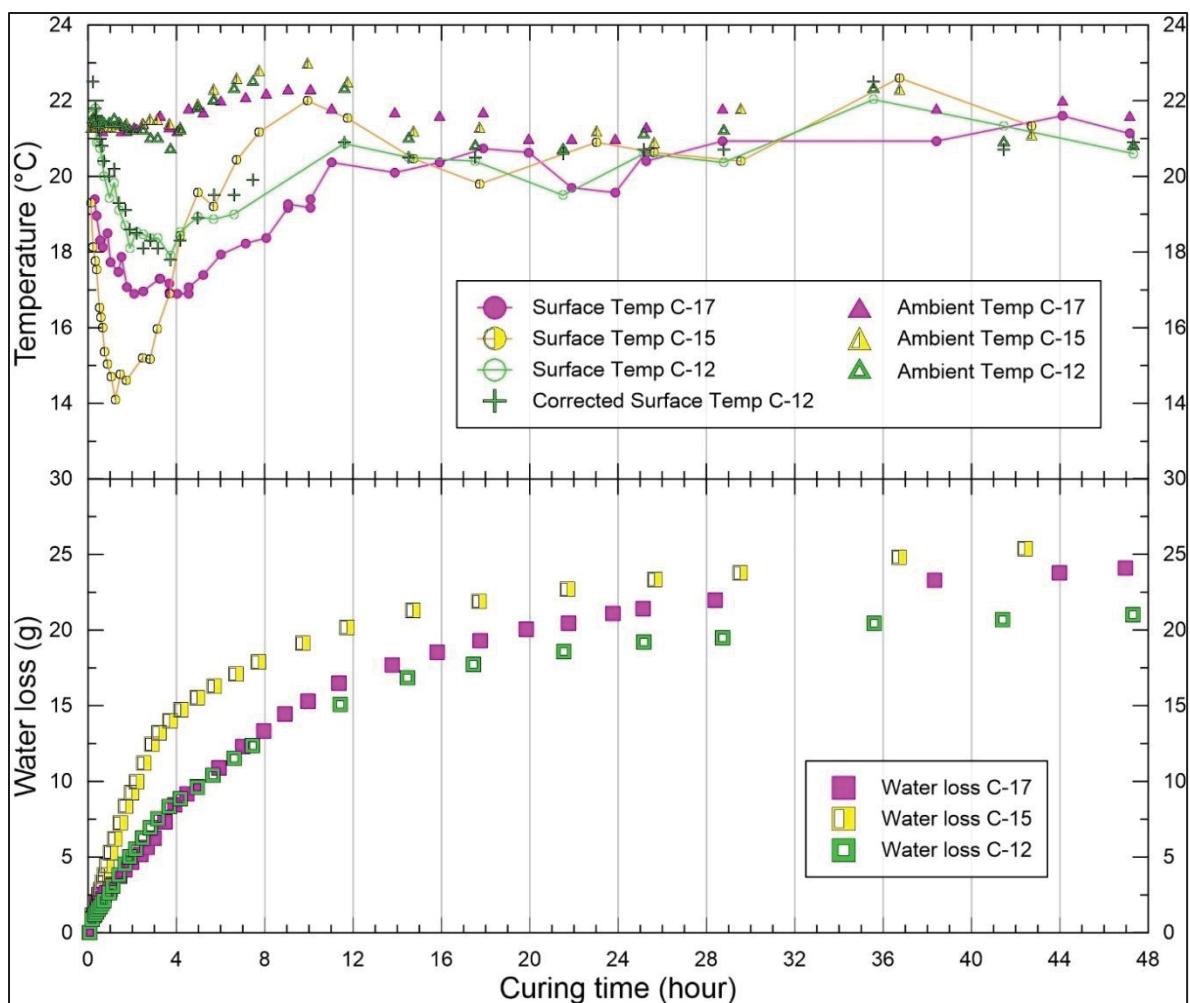


Figure 5.5 Evolution of the water loss and surface temperature during the 48 hours after compaction for the 3 tested specimens

The temperature drop of specimen C-12 and C-17 are smaller than those of specimen C-15. Specimens C-12 and C-17 were tested during summer, whereas specimen C-15 was tested during winter. In summer, the intensity of the air conditioning fluctuates, whereas in winter the ventilation is continuous and smoother. After about 24 hours of curing, the surface temperature reaches the ambient temperature. As mentioned earlier, the air conditioning stops operating during the night, therefore an increase of the room temperature can be observed in Figure 5.5, from 4 to 10 hours of curing (midnight to 6 AM).

Figure 5.6 displays the evolution of water loss over 30 days of curing. Specimens C-12 and C-17 exhibit a peculiar behaviour. Even if the specimens were handled with care, some aggregates may have fallen, modifying the overall mass of the specimen. The air conditioning in the laboratory, may affect the evolution of water loss. Finally, the foam on which the specimen is laid, act as an insulator. Therefore, the water in the lower part of the specimen does not evaporate at the same rate as in the upper part. If the specimen is removed from the foam and put back in a different orientation, evaporation may occur. This could explain the shift observed in Figure 5.6 for specimen C-17 between the 8th and 10th hour of curing.

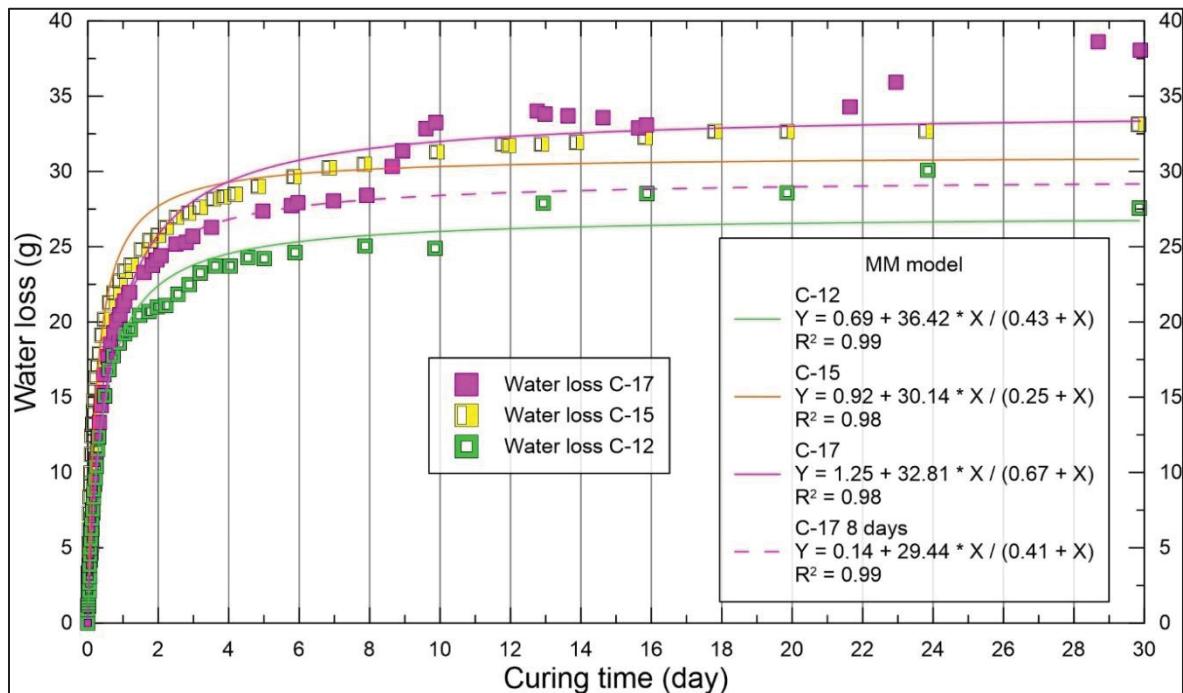


Figure 5.6 Evolution of the water loss in specimens C-12, C-15 and C-17, over 30 days of curing

A Michaelis-Menten (MM) model has been used to model the water loss results (equation 5.2). The coefficient of determination, R^2 , values for each specimen are closed to 1 which indicate a good correlation between the model and the real data, as displayed in Figure 5.6.

Figure 5.7 compares the evolution of water loss with respect to curing time for specimen Control-17_1 to 3, and for specimens C-12, C-15 and C-17. The water loss was normalized to simplify the comparison. The influence of the curing condition can be observed, as specimens Control-17_1 to 3 show a faster increase in water loss values and a higher slope at young age.

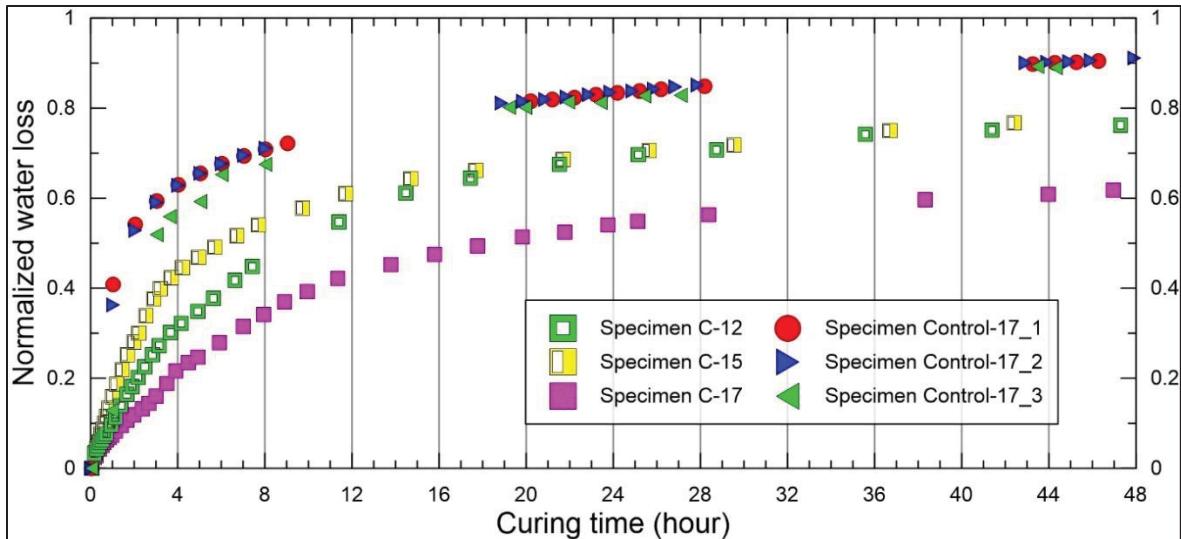


Figure 5.7 Evolution of the normalized water loss with respect to curing over 2 days

Table 5.3 summarizes the C values (half-life) of the MM model for specimens Control-17_1 to 3, C-12, C-15, and C-17. In Table 5.3, the results are compared to slabs that were compacted and tested in a previous study (Lecuru et al., 2019). The volume/surface ratio shown in Table 5.3 is calculated by dividing the volume of the specimen by the surface area in contact with air. The higher this ratio, the slower the cure should be for the same curing condition. The slab mix is different from the specimens tested in this study, which may affect the results. The slabs contained 100 % RAP, 1.5 % added bitumen in a form of a bitumen emulsion (CSS, 67 % of bitumen), 1 % cement and 6 % added water and their dry densities were $2,031 \text{ kg.m}^{-3}$. Slab 1 was cured during winter (March) and slab 2 was cured during spring (April). The air conditioning conditions were different. The first water loss measurement was taken 1 hour after compaction. In Table 5.3, the C parameter shown for specimen C-17 is taken considering only the 8 days of curing, since the increase in water loss after 8 days (Figure 5.6) affects the overall model. Figure 5.8 presents the evolution of surface temperature and water loss for both

slabs. The ambient temperature was varying from 20 to 23 °C. The evolution of water loss and surface temperature shows a similar trend for the slabs and cylindric specimens.

Tableau 5.3 Comparison of MM model C parameter and geometric configuration for each specimen

Specimen	MM model C value water loss, day	Ratio Volume/Surface in contact with air, mm³/mm²	Curing condition
C-12	0.43	19.7	Room temperature, 21°C - 22°C
C-15	0.25	19.7	
C-17 – 8 days	0.41	19.7	
Slab 1	0.60	28.5	
Slab 2	0.95	28.5	
Control-17_1	0.11	20.0	Oven, 50°C, 50 % humidity
Control-17_2	0.11	20.0	
Control-17_3	0.14	20.0	

It appears that the geometrical properties (volume/surface ratio), and the curing condition (room temperature or oven accelerated cure, c.f. Figures 5.5 and 5.7) influence the MM model C parameter. A lower C parameter value indicates a quicker reach of the maximum value of water loss, which then influences the V_s evolution. Further experimentation is necessary to confirm these observations.

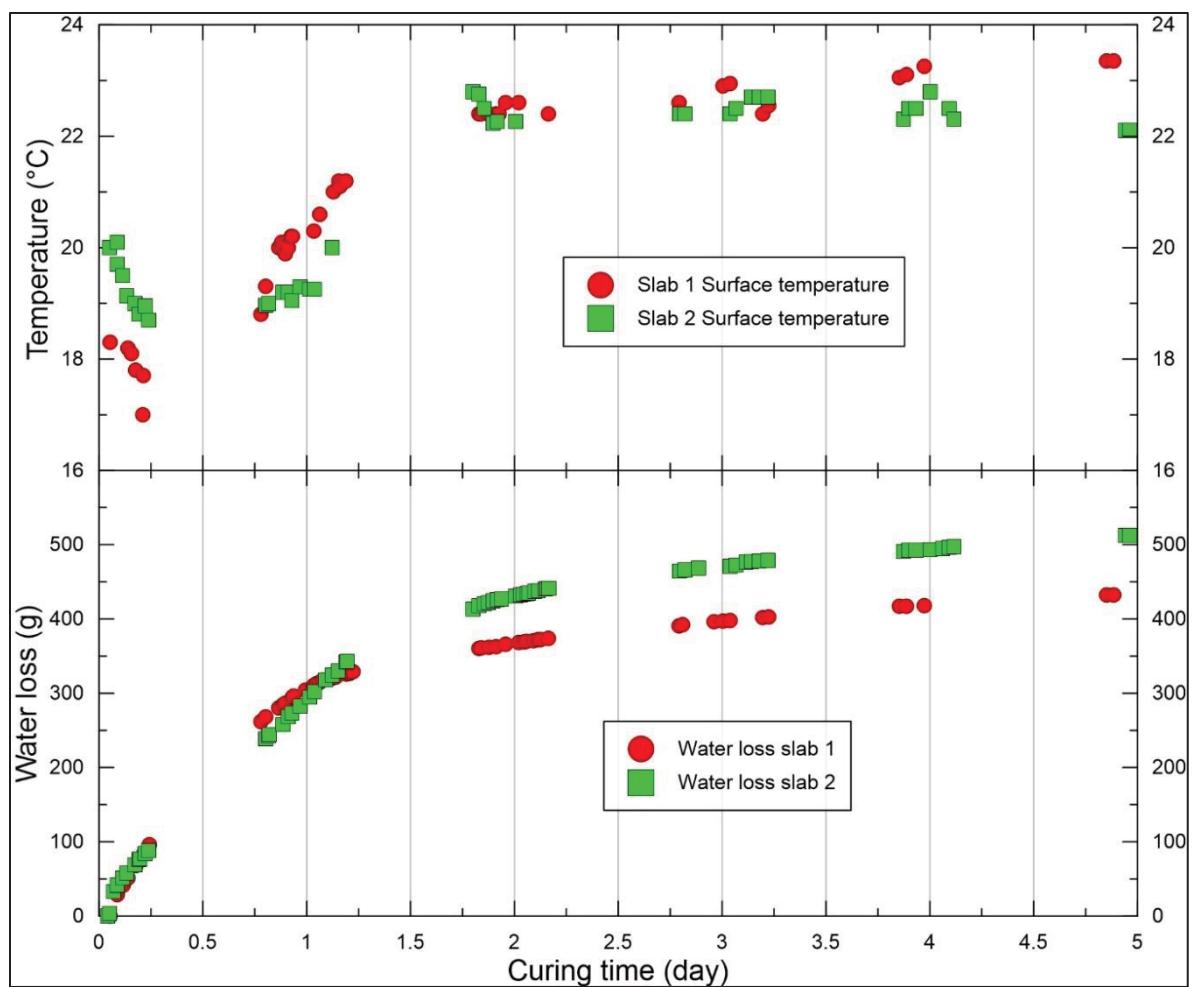


Figure 5.8 Evolution of the water loss and surface temperature

for 5 days for 2 slabs

Adaptée de Lecuru et al. (2019, p. 345)

5.5.2 V_s measurements

Figures 5.9, 5.10 and 5.11 present the evolution of V_s values, water loss and surface temperature over 30 days of curing for specimen C-12, C-15, and C-17 respectively. A logarithmic scale is used to clearly distinguish both early age and cured state behaviour.

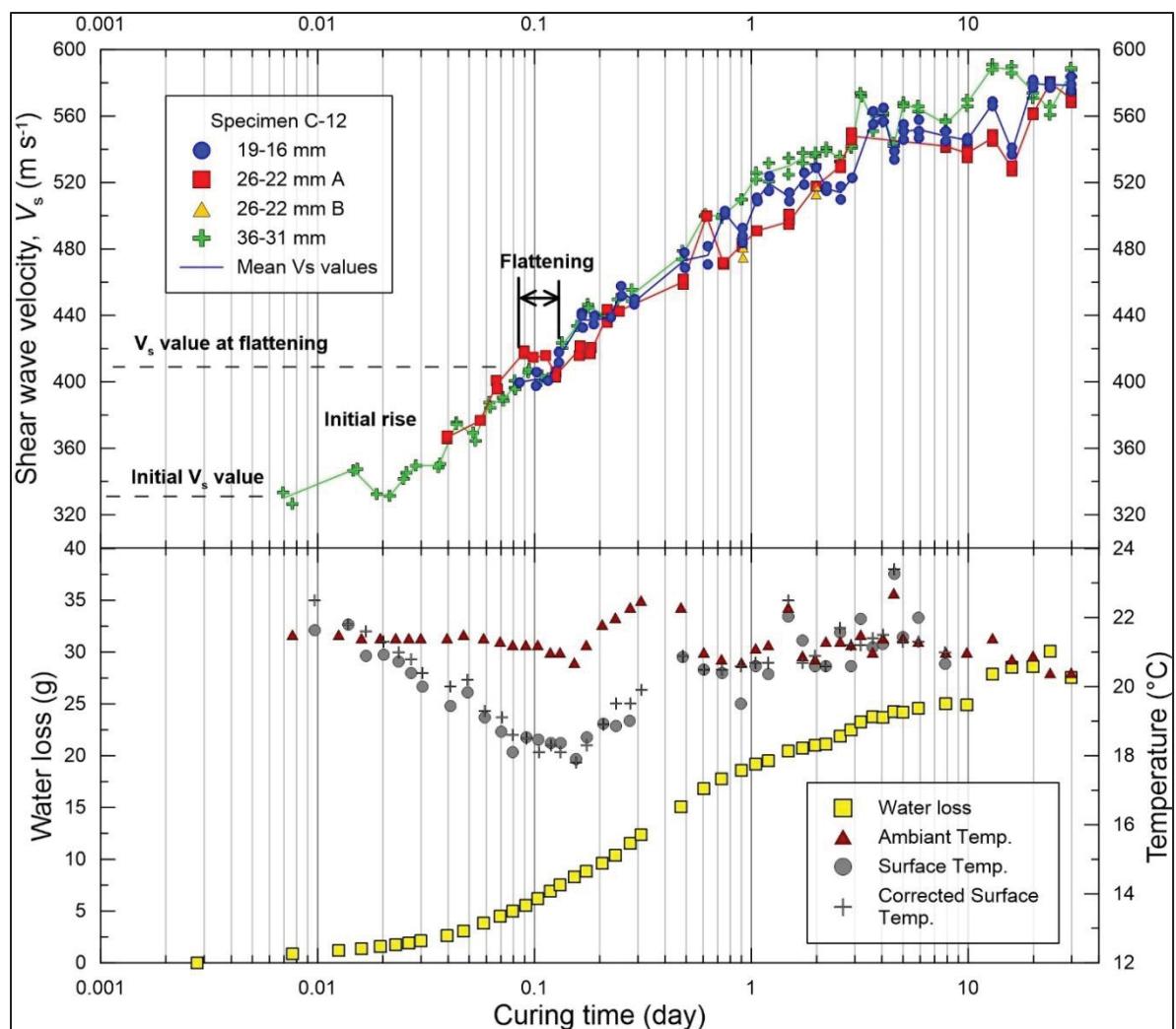


Figure 5.9 Evolution of V_s values, surface temperature and water loss evolution for specimen C-12 over 30 days, logarithmic scale

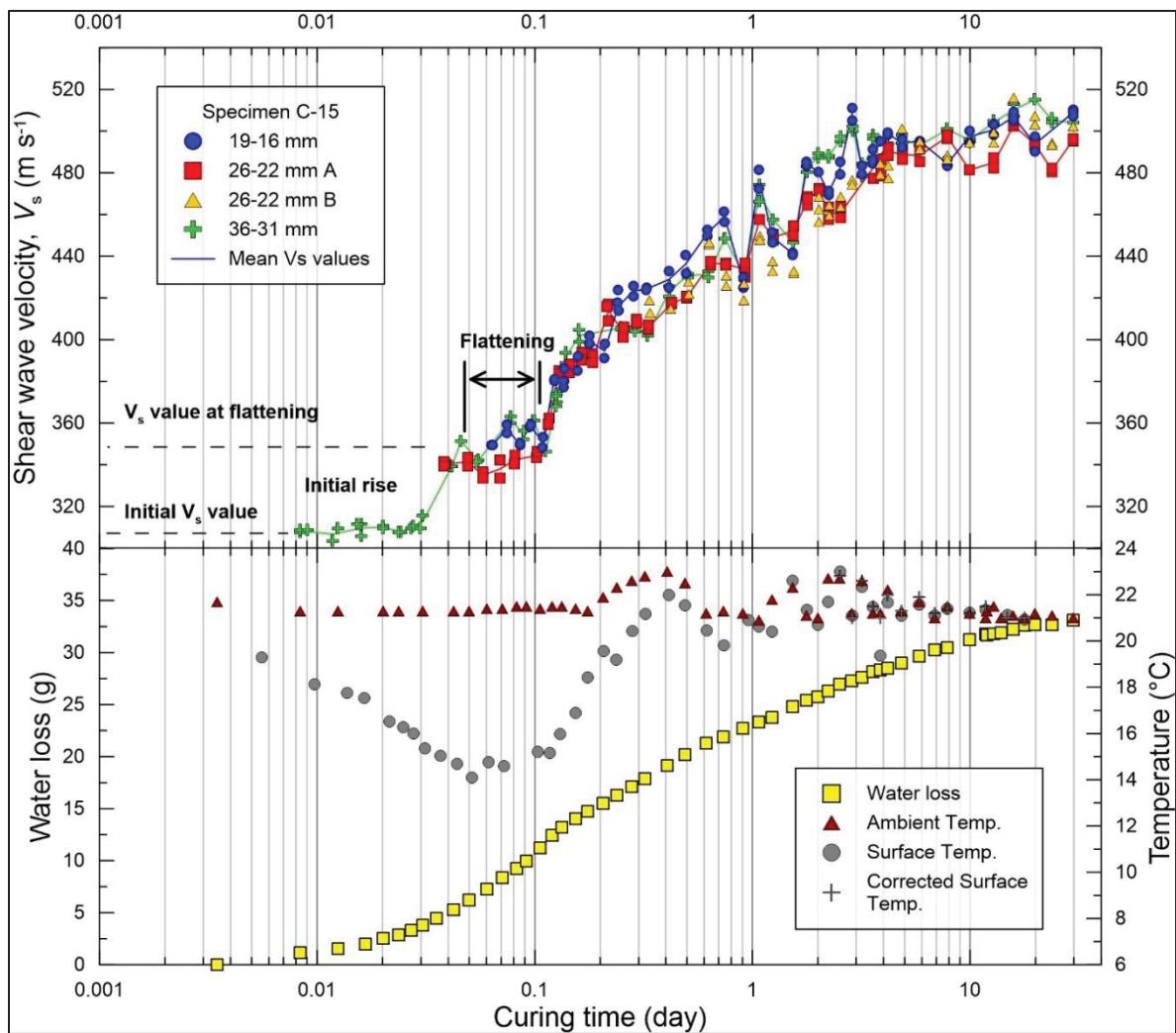


Figure 5.10 Evolution of V_s values, surface temperature and water loss evolution for specimen C-15 over 30 days, logarithmic scale

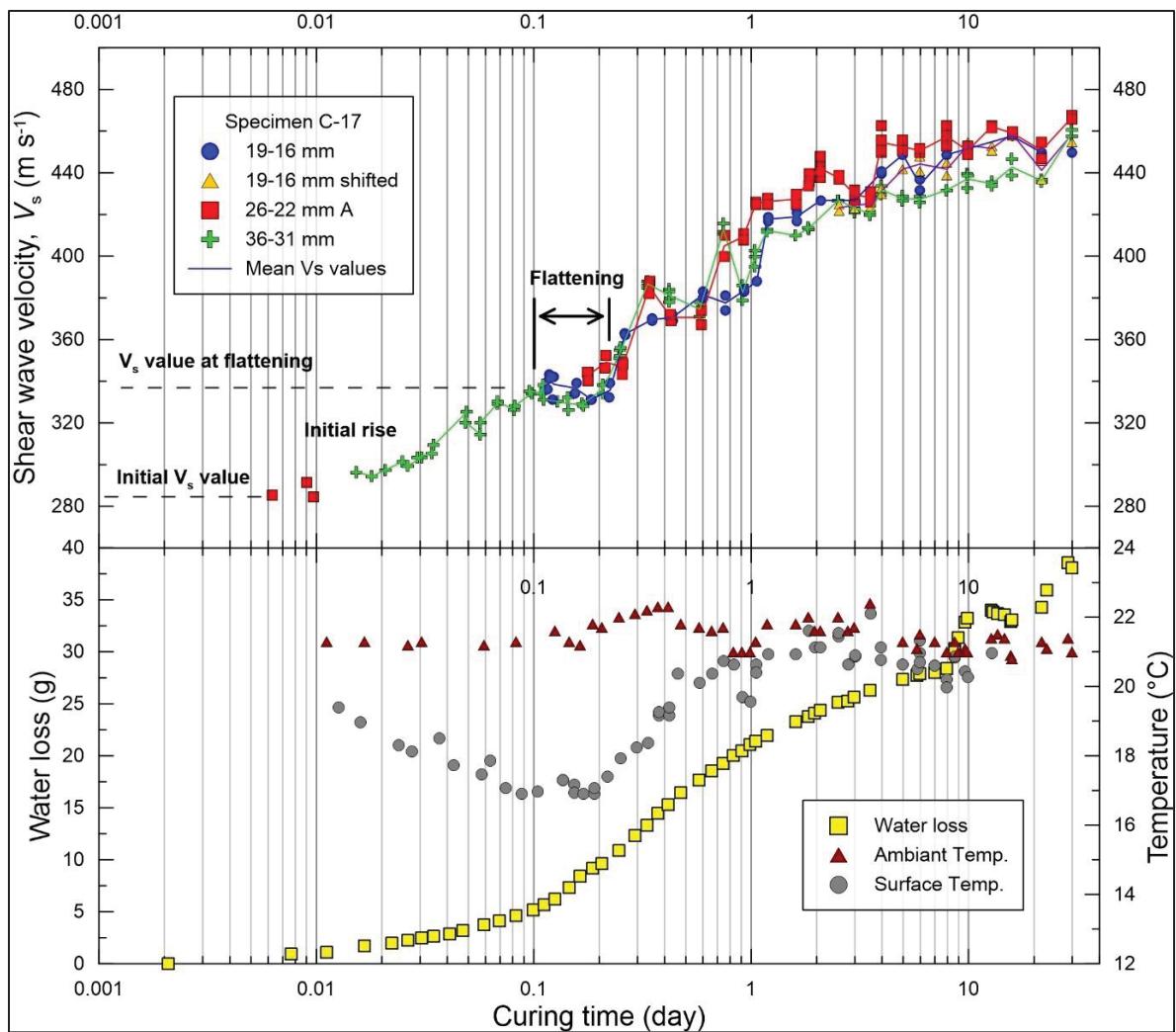


Figure 5.11 Evolution of V_s values, surface temperature and water loss evolution for specimen C-17 over 30 days, logarithmic scale

For the 3 specimens, there is a rapid increase of V_s values in the early ages, although flattening is observed in the evolution of V_s , in all cases. This occurs when the surface temperature curve reaches its minimum, which coincides with the maximum rate of evaporation. The flattening appears in both V_s and surface temperature curves. The V_s flattening is less extensive as compaction increases. Indeed, the flattening duration is approximately 1 hour, 2 hours, and 3 hours (obtained visually from curve) for specimens C-12, C-15, and C-17, respectively. In addition, it seems that the value of V_s before the flattening is higher when compaction is also higher. The difference between initial and flattening V_s values is 80 m.s^{-1} and 43 m.s^{-1} for

specimens C-12 and C-17, respectively. The presence of a flattening suggests two or more opposing mechanisms. These mechanisms are presented and hypotheses on these mechanisms are presented.

If we consider CRM at a very early age as granular materials, surface tension, which increases with the disappearance of water, must play an important role in the increase in rigidity in the very short term. However, as water loss increases, i.e. saturation decreases, rigidity will reach a peak then decrease (Santamarina et al., 2001).

The first hypothesis is that the initial rise in V_s is due to the increase in surface tension associated with the disappearance of water. During flattening, water evaporation reaches its maximum, so surface tension contributes less to the increase in stiffness and therefore V_s . After flattening, the formation of bituminous bonds is expected to contribute more to the increase in stiffness because water loss is less pronounced.

However, CRMs are not just granular materials, and emulsion breakage leads to the creation of bituminous bonds, which in turn increases the cohesion of the mix and thus stiffness. However, the emulsifier in the emulsion softens the recycled bitumen at some point, which tend to reduce the stiffness of the mixture. This would be the second hypothesis.

The effect of temperature on bitumen could also be considered. Due to evaporation, there is a drop in surface temperature, and this stiffens the mixture, leading to a potential increase in V_s . After the flattening, the specimen warms up and becomes less rigid.

Surface tension is impacted by material pore size (Holtz & Kovacs, 1991), as smaller pores will generate higher surface tension. The compaction of the mix, could impact the number and the size of the voids, thus impacting the surface tension. This could explain the V_s flattening duration and the gap between initial and flattening V_s values. But, when comparing air voids ratio with void mean radius in HMA and Warm Mix Asphalt (WMA), it appears that the void mean radius is more impacted by the properties of the components (gradation of the mix,

properties of aggregates) than the density of the mix, although some mixes exhibit such dependency (Alvarez et al., 2012; Alvarez-Lugo et al., 2014). However, a higher void ratio also means a longer path for the bitumen droplets to travel in order to create bonds. That could also explain the difference in the gap between initial and flattening V_s values for different compaction.

The evolution of V_s values is observed to exhibit some drops and pics. These can be linked to temperature variation in the laboratory, as evidenced for instance in Figure 5.10. Indeed, between 1 and 2 days, the ambient temperature increases from 20.9 to 22.3 °C, and the V_s values for every pair of transducers decrease and the mean V_s value decreases from 463 to 443 m.s^{-1} .

For each specimen, the curves exhibit a consistent pattern and share a similar appearance. The V_s values range from 330 to 578 m.s^{-1} , 308 to 502 m.s^{-1} and 287 to 456 m.s^{-1} for C-12, C-15, and C-17, respectively. The values for specimen C-12 are higher than those for C-15's which are in turn higher than those for C-17's. The same observation can be made for the minimal values.

For each pair of transducers utilized, several signals were analyzed. The mean relative differences, $\Delta\%$, for V_s values in a specific pair of transducers in each specimen are presented in Table 5.4. The mean values are relatively low, indicating a good repeatability of the measurements, as shown in Table 5.4. Although the maximum values may be considered high, in most cases, they represent only 1 or 2 measurements and may result from a poor signal, which is more challenging to analyze. Such issues may arise from a poor contact between the specimen and one of the transducers or a bad alignment. As the number of measurements increases, the surface on which the transducers are set becomes worn explaining contact issues.

Tableau 5.4 Relative difference, $\Delta\%$, for a specific pair of transducers

Specimen	C-17			C-15			C-12		
	$\Delta\% = (V_s \text{ Max} - V_s \text{ Min}) / V_s \text{ Mean, \%}$								
Transducers	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
19-16 mm	0.00	3.24	0.97	0.00	2.37	0.95	0.00	2.31	1.17
26-22 mm A	0.22	2.84	1.22	0.00	2.64	0.83	0.00	1.82	0.61
36-31 mm	0.00	2.08	0.91	0.00	2.21	0.66	0.00	2.12	0.79
26-22 mm B	n.a.	n.a.	n.a.	0.00	2.58	0.81	0.20	1.25	0.63

Table 5.5 presents the relative standard deviation, $\sigma\%$, between the mean V_s values obtained with the different pairs of transducers (i.e. 19-16 mm, 26-22 mm A, 26-22 mm B and 36-31 mm) in a specific specimen.

Tableau 5.5 Relative standard deviation $\sigma\%$ between pairs of transducers in a specific specimen

Specimen (number of eligible measurements)	C-17 (28)	C-15(42)	C-12 (36)
$\sigma\% \text{ min}$	0.66 %	0.00 %	0.13 %
$\sigma\% \text{ max}$	4.70 %	3.49 %	5.77 %
$\sigma\% \text{ mean}$	2.27 %	1.83 %	2.10 %

The mean standard variation is approximately 2 % for every specimen, indicating good reproducibility of the measurements. Although the maximum values are relatively high, they are generally confined to a few measurements within the context of the entire experimental campaign and mostly comes from contact issues between the specimen and the transducers. It is possible that the transducers were not perfectly aligned and set at the exact position due to the differing sizes of the transducers and the wear of the surface, as mentioned earlier. For instance, in Figure 5.9 (specimen C-12) around 16 days, the V_s values for 19-16 mm and 26-22 mm A are approximately 530 m.s^{-1} whereas the V_s value for 36-31 mm is approximately 580 m.s^{-1} . In this case, the signals obtained for the 36-31 mm transducer pair are notably

inferior in quality when compared to those obtained by the 19-16 mm and 26-22 mm A transducers. This discrepancy in signal quality may be a contributing factor to the observed difference in the V_s values.

Finally, it can be assumed that the complexity of the material induces differences in the measures, as shown by Naji et al. (2019). Their study on concrete pointed out that the aggregates could generate wave diffraction if the P-RAT transducer used is smaller than the aggregate. A diffracted wave is more challenging to analyze, leading to variation in measured V_s values for different sizes of transducers.

Figures 5.12 presents the evolution over time of the mean values of V_s obtained with every pair of transducers for the 3 specimens.

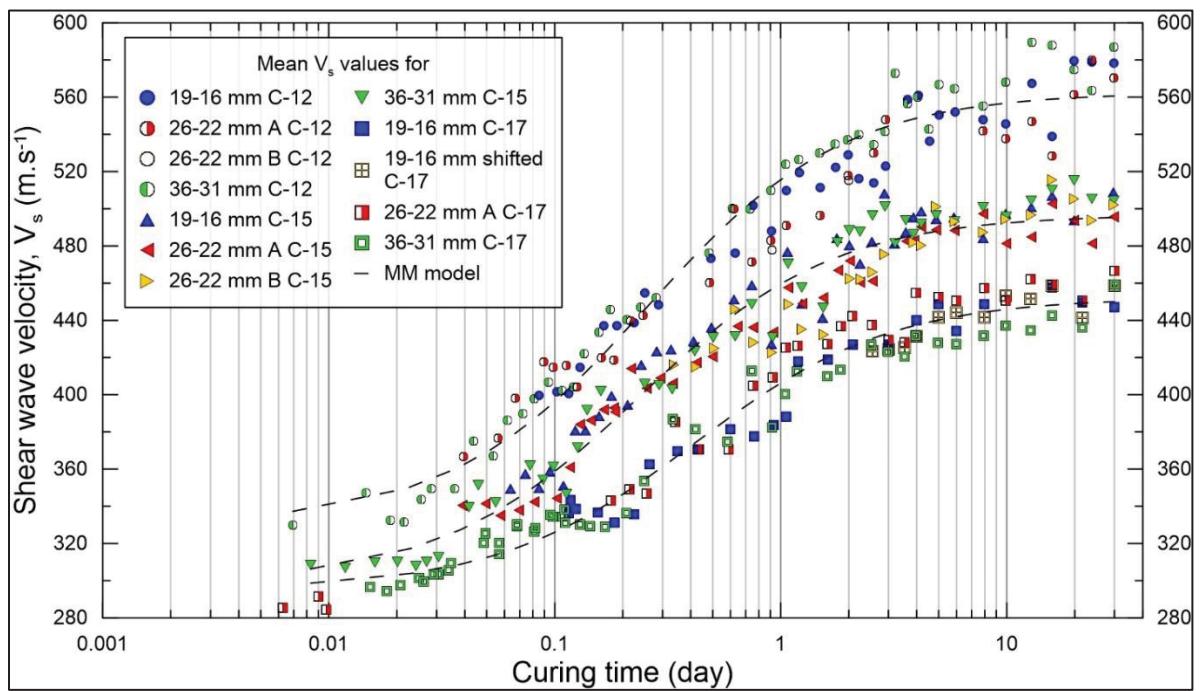


Figure 5.12 Comparison of Mean V_s for specimen C-12, C-15 and C-17 over 30 days of curing, logarithmic scale. The MM models are presented

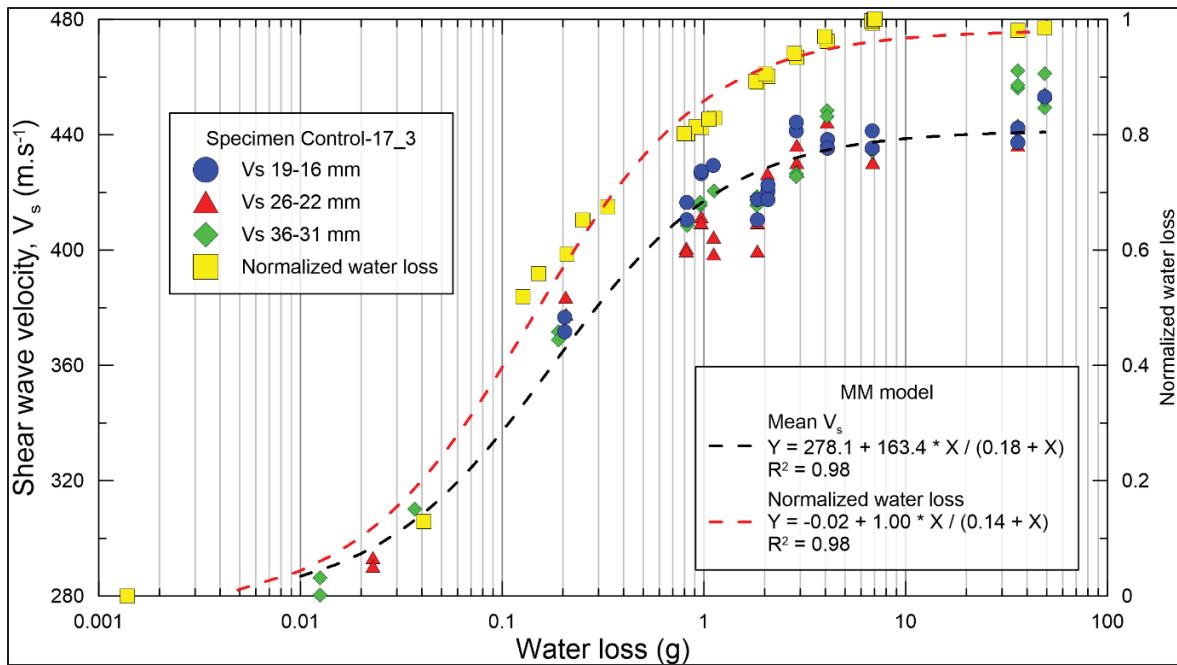


Figure 5.13 Evolution of V_s values and water loss in specimen Control-17_3, over curing (7 days in oven, then room temperature)

Figure 5.13 illustrates the evolution of V_s in specimen Control-17_3, with the evolution of water loss in the specimen also displayed for comparison purposes. The V_s mean values (and V_s values over all) can be modeled with a MM model. The MM model does not consider the flattening in V_s detailed earlier and therefore represent the overall evolution of V_s . The MM model parameters for each specimen and the curing time needed to reach specific values are presented in Table 5.6. The influence of the curing condition is highlighted in the observation that specimen Control-17_3 necessitates a shorter curing period than C-17 to attain an equivalent level, as illustrated by the model. However, a comparison of Figures 5.13 and 5.11 suggests that the evolution of V_s is faster at young age for specimen Control-17_3 in comparison to C-17. After one day of curing, the values exhibit a similar trend. Finally, the coefficient of determination, R^2 , values for each specimen are closed to 1 which indicate a good correlation between the model and the real data.

Tableau 5.6 Michaelis-Menten model parameters for specimens C-12, C-15 and C-17; and curing time necessary to reach specific values of V_s , according to the MM model

	% of the maximal value					Michaelis-Menten Model (30 days curing) parameters							
	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	A, m.s ⁻¹	B, m.s ⁻¹	C, day	R^2				
Specimen	Required curing time,												
	h		day										
C-12	2.0	6.1	18.3	2.3	4.8	331.1	231.5	0.254	0.98				
C-15	1.9	5.6	16.8	2.1	4.4	299.5	197.3	0.233	0.98				
C-17	3,3	10.0	29.9	3.7	7.9	295.6	156,6	0.415	0.98				
Control-17_3	1.4	4.2	12.7	1.6	3.4	278.1	163.4	0.177	0.98				

The difference between mean V_s values for specimens C-12, C-15 and C-17, i.e. different void ratio (Table 5.1), is significant, as shown in Figure 5.12. A two-way analysis of variance (ANOVA) was conducted, and the results are presented in Table 5.7. The null hypothesis, h_0 , is that the mean values of V_s for specimens C-12, C-15, and C-17 are equal. The tested data are the mean values of V_s obtained with different pairs of transducers for a single specimen at a specific curing time. A total of 35 points with respect to time with one V_s value for every specimen were tested, resulting in a total of 105 V_s mean values.

Tableau 5.7 Analysis of Variance

Variation	Sum of square	Degree of freedom	Mean of square	F ₀	F (p=0.05)	Probability
Time	520,243.05	34	15,301.26	66.88	1.60	1.70 E-40
Void ratio	139,836.66	2	69,918.33	305.64	3.13	1.03 E-34
Error	15,555.49	68	228.75			
				$h_0 : V_s \text{ C-12} = V_s \text{ C-15} = V_s \text{ C-17}$		
Total	678,635.21	104		$F_0 >> F$, the hypothesis is false		

Table 5.8 presents the relative differences between mean V_s values, with C-12 serving as the reference for specimens C-15 and C-17. The gap is 6.6 and 13.0 % after compaction for specimens C-15 and C-17, respectively. After 30 days of curing, the gap reaches 13.1 and 20.9 % for C-15 and C-17, respectively. Orosa et al. (2022a) outlined a relative difference in ITS values of 17.4 % between 12.5 and 15 % void ratio and 30.4 % between 12.5 and 17 % void ratio for specimens obtained with a GSC at 100 gyrations and tested at 15 °C, with the same RAP source and a similar design to that used in this study.

The modulus values calculated from V_s with equation 5.3 are displayed in Table 5.8. Bulk densities used in the calculus are taken after 30 days of curing and the Poisson coefficient is set to 0.3. The magnitude of error was calculated from the standard deviation of V_s values presented in table 5 and is approximately 4 % (mean values considered). The relative modulus differences are higher than those in Orosa et al. (2022a). This can be explained by the number of gyrations, as it can lead to a better overall compaction. C-12, C-15 and C-17 required 51, 72 and 195 gyrations respectively. It can be assumed that the compaction of C-17 is not as good as that of C-12 in terms of particle alignment.

Tableau 5.8 Particular values of V_s and equivalent modulus for each specimen;
 Relative difference of V_s and equivalent modulus among specimens
 with C-12 as reference

Specimen, 21°C		Curing time								
		10 min	1.35 h	2.35 h	5 h	18 h	1 j	5 j	10 j	30 j
C-12 $\rho = 2212$ kg.m^{-3} $v = 0.3$	V_s , m.s^{-1}	330	372	392	439	491	489	559	550	578
	G , MPa	241	306	340	427	533	530	690	670	740
	E , MPa	626	795	884	1,111	1,386	1,379	1,795	1,742	1,925
C-15 $\rho = 2135$ kg.m^{-3} $v = 0.3$	V_s , m.s^{-1}	308	338	344	404	443	429	495	492	503
	G , MPa	203	245	252	349	419	392	523	527	539
	E , MPa	528	636	656	907	1,089	1,020	1,361	1,345	1,403
C-17 $\rho = 2080$ kg.m^{-3} $v = 0.3$	V_s , m.s^{-1}	287	317	330	340	398	392	443	447	461
	G , MPa	171	209	226	241	330	319	407	415	436
	E , MPa	446	547	588	626	858	830	1,059	1,080	1,134
Relative differences, Δ , with specimen C-12 values as reference, %										
ΔV_s	C-15	6.6	9.0	13.0	8.0	9.8	8.8	11.4	10.6	13.1
	C-17	13.0	14.7	17.9	22.6	18.8	20.4	20.8	18.8	20.9
Δ Equivalent Modulus	C-15	15.7	20.0	26.9	18.4	21.4	19.7	24.2	22.8	27.1
	C-17	28.8	31.5	36.6	43.6	38.1	40.4	41.0	38.0	41.1

Young modulus values range from 446 to 1134 MPa, 528 to 1403 MPa and 626 to 1925 MPa for specimens C-17, C-15 and C-12, respectively. According to the literature, CRM modulus values range from 500 to 10,000 MPa (Diefenderfer et al., 2016; Lin et al., 2016; Goli et al., 2023; Ngyuen et al., 2023) depending on the test method and the mix composition. Orosa et al. (2022a) conducted ISTM tests at 20 °C on a similar mix compacted at 12.6 % void ratio. They obtained an ITSM mean value of 2134 MPa ($\sigma\% = 6.82 \%$), which is in the magnitude of the C-12 results at the end of curing, considering the temperature.

Figure 5.14 presents the evolution of V_s mean values for every pair of transducers with respect to void ratio. As mentioned earlier, the V_s values increase as the void ratio decreases, i.e., as compaction increases. With a better compaction, there is better contact between the aggregates, allowing the waves to propagate faster through the specimen, resulting in higher V_s values. V_s values for the control specimens can be found in Table 5.9. The standard deviation of V_s values from a given specimen, for V_s values for specimens of the same void ratio and for the mean V_s values from specimens of the same void ratio are also presented. The relative standard deviations between specimens of the same void ratio are low, indicating good reproducibility of the mix, and thus of the V_s measurements.

Tableau 5.9 V_s mean values for every pair of transducers at 30 days of curing

Specimen	Void, %	V_s values, m.s^{-1}				Raw or relative Standard deviation, or both, σ and [$\sigma\%$]		
		19-16 mm	26-22 mm	36-31 mm	Mean	For a given Specimen	All V_s values	Mean V_s
Control-10_1	10.6	594	596	587	591	0.72%	8.7 [1.45 %]	4.5 [0.76 %]
Control-10_2	10.4	598	602	603	602	0.46%		
Control-10_3	10.6	605	582	609	595	2.45%		
Control-12	12.4	591	582	581	585	0.95%	7.3 [1.25 %]	4.6 [0.80 %]
C-12	12.1	578	570	586	578	1.44%		
Control-17_3	17.2	453	454	450	452	0.40%	5.7 [1.26 %]	6.3 [1.38 %]
C-17	17.5	459	466	459	461	0.97%		
C-15	15.1	509	496	504	503	1.32%	n.a.	n.a.

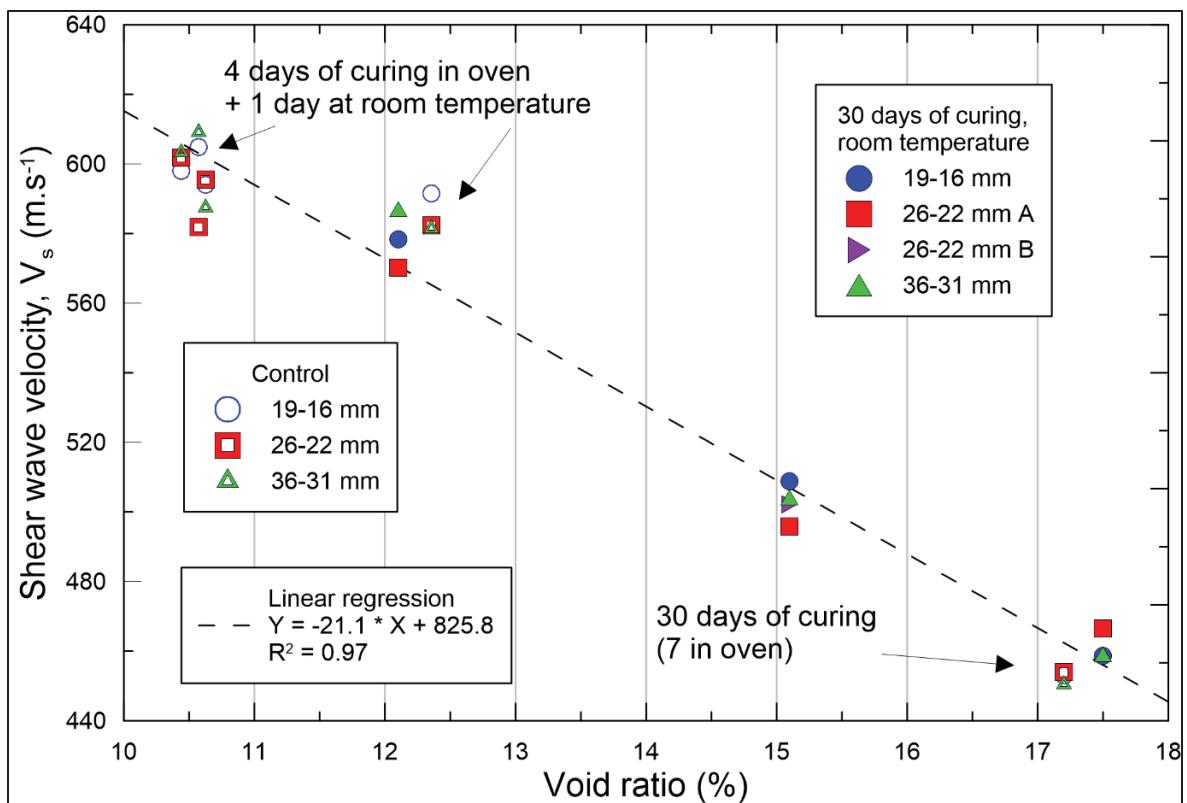


Figure 5.14 Mean V_s values for every pair of transducers with respect to void ratio; hollow symbols refer to control specimen V_s values

For P-RAT in general, the study did not show a clear advantage to using a particular transducer size. Indeed, it appears that in some cases one pair of transducers provides better signals and better interpretation, but that in another configuration, either temporally or spatially, this is no longer the case. Furthermore, the interpretation of signals from one pair of transducers may benefit from the interpretation of signals from the other pair. Since the main variable under study is time, it is preferable to use several sizes of transducer pairs in order to maximize usable results.

5.5.3 Relation between V_s and water loss

The evolution of the V_s mean values with respect to water loss in each specimen is presented in Figure 5.15.

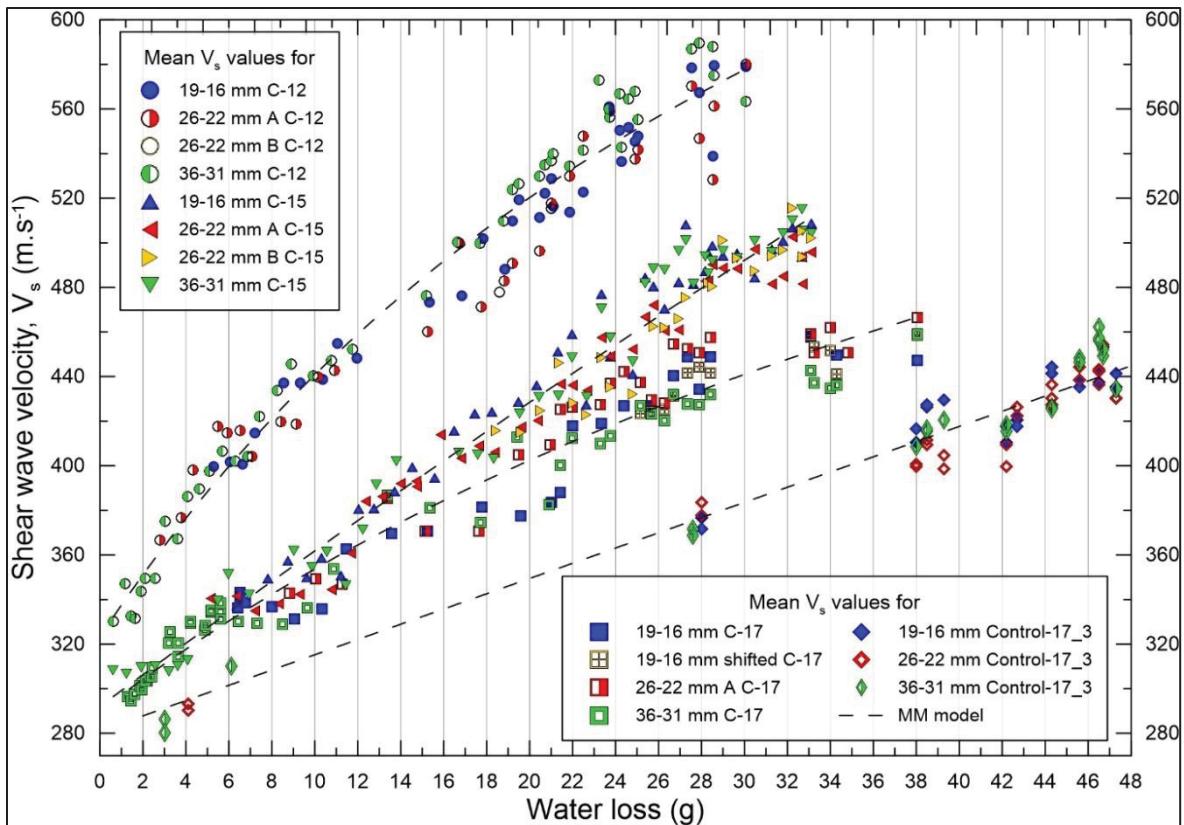


Figure 5.15 V_s with respect to measured water loss for every specimen over 30 days of curing

Since the evolution of water loss and V_s values with respect to time can both be modelled by a MM model, the V_s values with respect to the water loss can also be modelled by a MM model, as shown in Figure 5.15. If the relationship between V_s and water loss were linear, it would mean that only water disappearance affects the increase of V_s and thus the stiffness in the material. The concavity of the curve indicates that the increase in V_s is faster than the disappearance of water in the 3 specimens (Graziani et al., 2017), meaning that the stiffness of the material created by the bituminous bonds increase faster than the disappearance of water. Moreover, it appears that the points get stuck at the end of the curve, which would imply that V_s values continue to grow despite the water loss not doing so.

Table 5.10 presents the parameters for the MM model of the evolution of V_s with respect to the water loss for specimens C-12, C-15, and C-17. The impact of the curing conditions of the

specimens can be observed in the MM model parameters. Indeed, the B and C values for specimen C-15 are larger than those of C-12 and C-17. As shown in Figure 5.5 and detailed in the relevant section, specimen C-15 was subjected to a different curing regimen (heating and air conditioning, due to winter conditions) in comparison to the other two specimens.

Tableau 5.10 Michaelis-Menten model parameter for specimens C-12, C-15, and C-17; V_s with respect to the water loss

	V_s mean values with respect to the water loss		
Specimen	A, m.s ⁻¹	B, m.s ⁻¹	C, g
C-12	323.32	608.78	41.82
C-15	292.07	3,030.62	424.45
C-17	290.26	480.51	65.99
Control-17_3	281.00	34,300	10,000

Figure 5.15 also displays the evolution of V_s with respect to water loss in specimen Control-17_3. In this case, where the specimen has been cured in an oven, the relationship between V_s and the water loss appears to be linear. This implies that V_s evolve at the same rate as the water gets out of the specimen, especially at a young age, as shown by the close C parameter values for the MM model of water loss and V_s evolution presented in Figure 5.13.

5.6 Conclusion and recommendations

In this study, a non-destructive method utilizing mechanical shear waves was used. The P-RAT was employed to characterize 3 specimens of a single mix, compacted at 12.1, 15.1, and 17.5 % void ratio with a GSC, from 10 minutes after compaction to 30 days of curing in the laboratory, which is an original contribution. During this period, a minimum of 1,200 V_s measurements were obtained for each specimen, resulting in a total of approximately 4,800 V_s measurements across the experimental program. The water loss and surface temperature were also evaluated in order to establish a correlation between variables.

The evolution of V_s and water loss is rapid at the young age. Their evolution can both be modelled with a Michaelis-Menten model, showing a strong link between them. However, the relationship between the two parameters is not linear, and V_s appears to evolve more rapidly than the water disappearance at the young age. This suggests that bituminous bonds are created.

In the early stages of development, the surface temperature exerts a significant influence on the water loss and V_s values. A flattening in V_s evolution is observed after a few hours of curing. It is postulated that the early age evolution of V_s is the result of a confluence of phenomena, including the variation of surface tension, the formation of bituminous bonds and, the impact of emulsion on recycled bitumen. Moreover, the curing conditions and geometrical properties play a role in determining the MM model parameters for the water loss and the subsequent evolution of V_s .

As expected, the compaction of the specimens influences the V_s values, with more compacted specimens exhibiting higher V_s values. The relative difference in V_s between each specimen increases as they cure. In this study, the increase in V_s from the initial measurements after compaction until the end of curing ranged from 169 to 248 m.s^{-1} . The equivalent modulus relative differences, calculated with V_s , are of a similar magnitude to those obtained with ITS and ITSM tests on a comparable mix.

Finally, the possibility of obtaining non-destructive measurements at early age, along with the observed trend in the measurements obtained in this study and the comparisons with other methods and models, has led to the conclusion that the P-RAT is a reliable and effective approach for characterizing CIR materials.

Future works should concentrate on monitoring the curing of CRM materials in a controlled environment in order to gain a comprehensive understanding of its impact on the development of mechanical properties, with a particular focus on the early stages of development, with V_s as the main parameter. Moreover, the evolution of water loss is influenced by the surface

temperature, so it could be modeled by coupled hygrothermal models. It would enable the verification of the various hypotheses put forward.

5.7 Données expérimentales

Section non présente dans l'article original.

Les données expérimentales utilisées dans le Chapitre 5 sont présentés aux Appendices B, C, D, E et F.

CHAPITRE 6

ESSAIS SUR LE MASTIC BITUMINEUX

6.1 Introduction

Le présent chapitre sert à introduire certains éléments évoqués dans l'article présenté au Chapitre 7 et dont le détail n'est pas mentionné dans celui-ci. Dans l'article présenté au Chapitre 3, l'usage d'un mastic a permis d'améliorer la qualité des signaux analysés. Il était supposé que le mastic possède des propriétés proches de celui des spécimens d'ERF testés et que la faible épaisseur de mastic influencerait peu les valeurs de V_s . Il convient donc d'évaluer l'impact du mastic bitumineux sur les valeurs de V_s . Dans cette optique, des mesures de V_s réalisées avec le P-RAT sur un mastic bitumineux sont présentées.

La composition du mastic testé ainsi que la procédure d'essai sont présentées en premier. Par la suite, les résultats obtenus sont présentés et les paramètres d'influences sont discutés.

6.2 Matériaux et procédure expérimentale

Afin d'évaluer l'impact du mastic bitumineux sur les valeurs de V_s , des essais P-RAT sont réalisés sur un mastic composé tel que décrit à la section 2.4.4. Le montage utilisé est décrit à la section 2.9. Pour rappel, les transducteurs utilisés sont enchâssés dans des capsules pour éviter l'écoulement du mastic et donc une potentielle déformation des spécimens de mastic et donc de la distance entre les transducteurs.

Les couples de transducteurs utilisés sont les suivants : 19-16 mm; 20-17 mm avec capsule; 26-22 mm avec capsule; 36-31 mm avec capsule A et B. Les essais de P-RAT sont effectués selon les éléments présentés à la section 2.5.2 et l'analyse des signaux est effectuée conformément à la section 2.5.3.

6.3 Résultats

Le diamètre des capsules supérieures est inférieur à celui des moules, un enfoncement est donc observé. L'enfoncement mesuré est, à la fin des mesures réalisées avec un couple de transducteurs, de 0,3 mm. L'enfoncement est mesuré après chaque émission de signaux afin de déterminer avec précision V_s . Les résultats de V_s pour le mastic testé dans les moules de 30 mm et 15 mm sont présentés à la Figure 6.1. Les valeurs de V_s présentées correspondent à la moyenne des V_s pour un même couple de transducteurs.

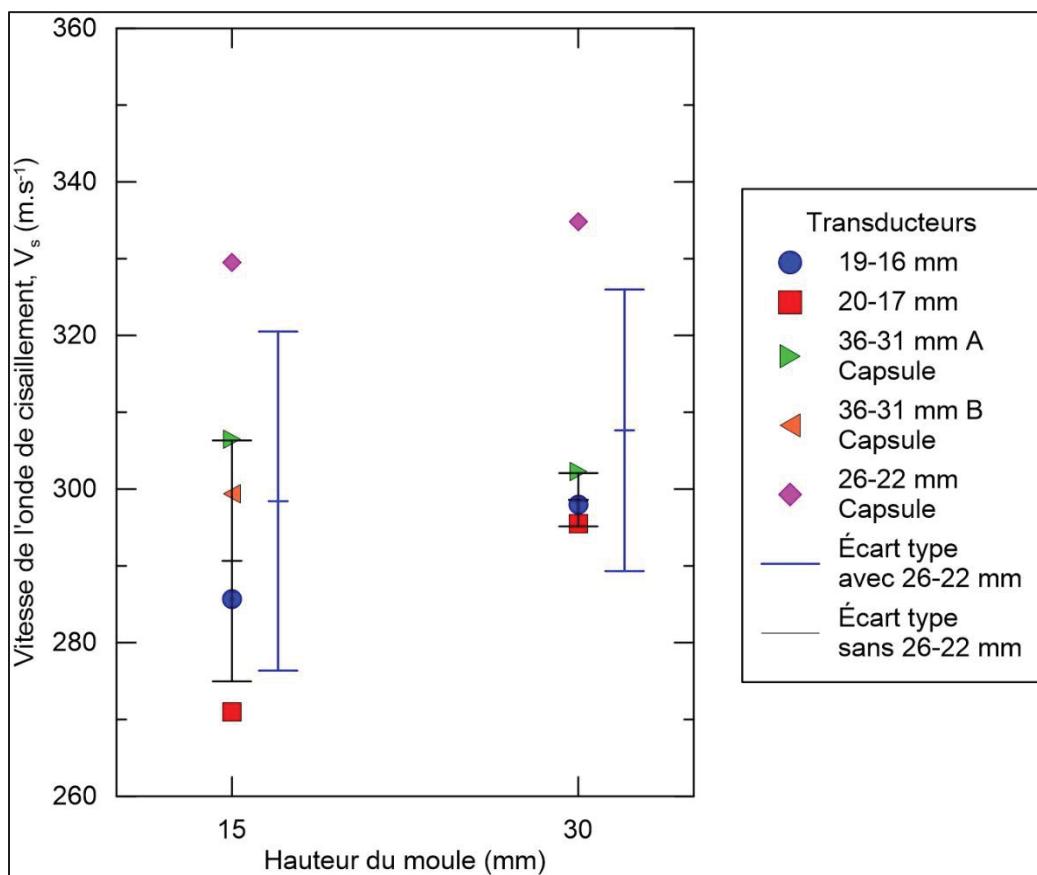


Figure 6.1 Résultat de V_s dans les spécimens de mastic bitumineux

On observe une plus grande dispersion des valeurs de V_s dans le cas du spécimen dans le moule de 15 mm que dans celui dans le moule de 30 mm. En effet, malgré la mesure de la distance entre chaque transducteur ou chaque capsule, une erreur similaire représente un plus grand

impact dans le spécimen de 15 mm que dans le spécimen de 30 mm. Les valeurs de V_s pour le couple de transducteurs 26-22 mm avec capsule sont supérieures à celle des autres couples de transducteurs, tout en restant cohérentes entre les spécimens de 15 et 30 mm. Le Tableau 6.1 présente les valeurs moyennes de V_s ainsi que les écarts types pour les deux hauteurs de spécimens testés. Deux analyses sont proposées, avec et sans le couple de transducteurs 26-22 mm. La valeur obtenue avec le couple de transducteurs 26-22 mm est en dehors de la plage d'écart type pour les deux hauteurs de mastic testées. Il a été choisi de ne pas considérer cette valeur dans la suite de l'analyse.

Tableau 6.1 Valeurs moyennes de V_s et écart type pour les spécimens de mastic bitumineux

	Hauteur de spécimen (mm)			
	Sans 26-22 mm		Avec 26-22 mm	
	15	30	15	30
V_s moyen ($m.s^{-1}$)	290,6	298,6	298,4	307,6
Différence relative (%)		2,7		3,0
Écart type ($m.s^{-1}$)	15,7	3,5	22,1	18,3
Écart type relatif (%)	5,4	1,2	7,4	5,9

Il apparaît que la valeur moyenne de V_s dans le mastic bitumeux étudié est comprise entre 290 et 298 m.s^{-1} . Cela représente un écart de 2,7 %. L'écart est de 3,0 %, dans le cas où les résultats de V_s obtenus avec le couple de transducteurs 26-22 mm sont considérés.

6.4 Influence du mastic bitumineux sur V_s

Dans le cas où une couche de mastic est appliquée sur le spécimen à tester, on doit distinguer deux V_s . Le V_{s_exp} qui est la mesure de V_s réalisée et qui prend en compte la couche de mastic et $V_{s_spécimen}$ qui ne considère que le spécimen et qui est donc la valeur que l'on souhaite obtenir. Si on connaît les dimensions du spécimen testé ainsi que l'épaisseur de la couche de mastic, on peut obtenir la valeur $V_{s_spécimen}$ dans le spécimen seul à l'aide de l'équation 6.1 :

$$V_{s_spécimen} = \frac{H}{\left(\frac{H + h_{mastic}}{V_{s_exp}}\right) - \left(\frac{h_{mastic}}{V_{s_mastic}}\right)} \quad (6.1)$$

Avec $V_{s_spécimen}$ la vitesse de l'onde de cisaillement dans le spécimen (m.s^{-1}), H la hauteur du spécimen testé (m), h_{mastic} l'épaisseur totale de mastic (m), V_{exp} la vitesse de l'onde de cisaillement expérimentale (m.s^{-1}) et V_{mastic} la vitesse de l'onde de cisaillement dans le mastic (m.s^{-1}).

Le Tableau 6.2 présente les valeurs de $V_{s_spécimen}$ obtenues avec l'équation 6.1 pour deux hauteurs de spécimens (H), deux épaisseurs de mastic (h_{mastic}), deux V_{s_mastic} et deux V_{s_exp} .

Tableau 6.2 Valeurs de $V_{s_spécimen}$ en fonction des paramètres V_{s_mastic} , h_{mastic} pour deux V_{s_exp} mesurée et deux hauteurs de spécimen considérées;
Les écarts relatifs, $\Delta\%$, sont présentés

V _s _spécimen en fonction de		Hauteur spécimen, H					
		100 mm			50 mm		
		V _s _mastic, m.s ⁻¹			V _s _mastic, m.s ⁻¹		
h _{mastic}	V _s _exp, m.s ⁻¹	290	298	Δ%	290	298	Δ%
4,0 mm	300	300,4	300,1	0,11%	300,8	300,1	0,22%
	600	626,8	625,3	0,23%	656,1	652,9	0,48%
3,7 mm	300	300,4	300,1	0,10%	300,8	300,1	0,21%
	600	624,7	623,4	0,21%	651,6	648,6	0,44%
Δ% h _{mastic}	300	0,01%	0,00%		0,02%	0,00%	
	600	0,33%	0,32%		0,70%	0,66%	

Il apparaît que l'écart entre les valeurs de V_{s_mastic} décrit plus haut engendre un écart relatif de 0,11 et 0,23 % dans le cas où la vitesse expérimentale mesurée est de 300 et 600 m.s^{-1} , respectivement. On remarque également que si le ratio h_{mastic} / H augmente, l'influence du mastic est plus prononcée. Enfin, plus V_{s_exp} augmente, plus la variation de la hauteur de mastic influence les valeurs de V_{s_mastic} . Cette variation de 0,3 mm correspond à l'enfoncement des

transducteurs observé lors des essais sur le mastic bitumineux. Une variation de la hauteur de mastic apporte plus d'erreurs que l'écart entre les valeurs de V_s_{mastic} .

6.5 Conclusion

Un faible écart est observé dans la valeur de $V_s_{\text{spécimen}}$ lorsque la valeur de V_s_{mastic} varie entre 290 et 298 m.s^{-1} . De plus, un écart de quelques dixièmes de mm dans la mesure de la hauteur de mastic entraîne un plus grand écart de la valeur de V_s réelle. Or, la hauteur de la couche de mastic dépend de la surface sur laquelle elle est appliquée, et sa mesure peut être imprécise si la surface est rugueuse. C'est le cas notamment de la surface supérieure d'une plaque d'ERF.

Donc, la valeur de V_s pour le mastic utilisé peut être considérée comme valant 298 m.s^{-1} sans engendrer d'erreurs importantes, d'un point de vue pratique, sur la valeur de V_s mesurée.

CHAPITRE 7

ASSESSMENT OF ANISOTROPY IN COLD IN-PLACE RECYCLED MATERIALS USING SHEAR WAVE VELOCITY AND COMPUTED TOMOGRAPHY ANALYSIS

Quentin Lecuru^a, Yannic Ethier^b, Alan Carter^c, Mourad Karray^d

^{a,b,c} Department of Construction Engineering, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

^d Department of Civil Engineering, Université de Sherbrooke,
2500 Boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1

Article soumis dans « Infrastructures », avril 2025

ABSTRACT

Pavement materials like Hot Mix Asphalt (HMA) and Cold Recycled Mixes (CRM) are typically considered isotropic. This study evaluates the anisotropy of a Cold In-Place Recycled (CIR) material using the shear wave velocity (V_s) parameter. The Piezoelectric Ring Actuator Technique (P-RAT) is utilized to assess V_s in three directions in CIR slabs. Similarly, the Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) technique is employed to measure P wave velocities. Both methods evaluate mechanical properties in multiple directions. Complex modulus tests are conducted to link velocities results to $|E^*|$ modulus. Finally, Computed Tomography (CT) scans are performed on the specimens in order to evaluate anisotropy resulting from aggregate alignment. The V_s obtained using P-RAT and the V_p from UPV indicate anisotropy as the wave velocities differ across the three directions. Differences range from 0.6 to 11.6 % in V_s , influenced by measurement location. UPV results are analysed in relation to the $|E^*|$ modulus master curves, demonstrating that the first peak arrival time for the P-wave correspond with the master curve. CT-Scan analysis reveals that the aggregates tend to be more aligned in the direction of the compacting wheel's displacement, which also highlights anisotropy.

Key words: anisotropy; shear wave velocity (V_s); cold recycled asphalt material; frequency analysis; CT-Scan

7.1 Introduction

Cold Recycled Materials (CRM) have been employed for several years in the rehabilitation of pavement. They offer an economical and ecological way of renewing upper layers through Cold In-place Recycling (CIR) techniques or of correcting deeper default by using Full-Depth Reclamation (FDR). However, the evolutive mechanical properties of CRM make their behavior difficult to precisely analyze over time. For instance, CIR materials are composed of 100% reclaimed asphalt pavement (RAP), to which a binder in the form of asphalt emulsion or foamed asphalt is added to enhance mechanical resistance. At early ages, considering actual humidity and added water during mixing, CIR mixtures contain a great amount of water. While curing, the water content in the mixture decreases, resulting in an increase in the stiffness of the material. The cure brings the CIR behavior closer to that observed in hot mix asphalt (HMA). The characterization of CRM is of interest and is covered by many researchers. It appears that, as with HMA, CRM are typically regarded as isotropic. While a few studies have evaluated the validity of this assumption in HMA, as of the time of writing this article, no studies have specifically addressed this hypothesis for CRM materials.

However, the compaction process may result in a stress-dependent anisotropy in the material, as the aggregates are rearranged in a specific manner to reach the targeted void ratio. This anisotropic behavior observed in both HMA and CRM could impact the methodology and interpretation of laboratory testing, necessitating adjustments to accurately assess the material properties under realistic conditions.

7.2 Objectives

The main objective of this study is to evaluate the anisotropic behavior of a CIR material using the shear wave velocity (V_s) parameter obtained from both P-RAT and UPV techniques. Also, the relationship between the anisotropic behavior and the orientation of the aggregate obtained by 3D image analysis is evaluated. The final objective here is to link the wave velocity results with the complex modulus.

7.3 Background

Numerous studies have been carried out on CRM to improve the global knowledge, either to better understand compaction and mixing temperature (Sangiorgi, Tataranni, Simone, Vignali, Lantieri, & Dondi, 2017; Raschia et al., 2020; Orosa et al., 2022a) or to evaluate the influence of components on the mechanical behavior of the mix (Li et al., 2019; Raschia, Graziani, Carter, & Perraton, 2019; Kuchiishi et al., 2021). These studies use mechanical testing methods. As such, the complex modulus test (E^*) is used to evaluate the dynamic modulus, for both CRM (Diefenderfer et al., 2016; Kuchiishi et al., 2021; Nguyen et al., 2023) and HMA (Pham et al., 2015; Di Benedetto et al., 2016; Nguyen et al., 2020). These previous studies have focused specifically on the anisotropic behavior of HMA. However, pavement is often regarded as an isotropic material, implying that the mechanical properties of the material are identical in all directions.

In the field of geotechnical engineering, two types of anisotropy are generally considered (Santamarina et al., 2001; Nguyen et al., 2011). Inherent anisotropy is directly linked to the materials and the manner of their constitution (gravity, natural deposition, for instance). Induced anisotropy, on the other hand, is stress-dependent and related to external actions.

According to Masad et al. (2002), Underwood et al. (2005), Bhasin et al. (2011) and Alanazi et al. (2018) the two types of anisotropy exist in bituminous materials, as they are granular bound materials. The inherent anisotropy would be related to aggregates orientation, aggregate contacts and air voids distribution and orientation. The use of CT-Scan provides means to evaluate this anisotropy in HMA (Bhasin et al., 2011; Hassan et al., 2012; Alanazi et al., 2018; Huang et al., 2020) and granular material (Quinteros & Carraro, 2021). Aggregates orientation and distribution in HMA were evaluated by Hassan et al. (2012) and Huang et al. (2020), and a perpendicular orientation to compaction direction was observed. Quinteros & Carraro (2021) quantified anisotropy regarding the particles orientation. Bhasin et al. (2011) showed that bitumen mastic also presents a perpendicular orientation to compaction direction and that the addition of coarse aggregate tends to modify this preferential orientation. This would possibly

lead to induced compaction anisotropy. Alanazi et al. (2018) showed that anisotropy decrease while compacity increases, and that the compaction method influences anisotropy.

The induced anisotropy would be considered as a damaged-induced anisotropy, being the accumulation of damage modifying the structure of the specimen. This anisotropy occurs when tested under confinement pressure, for instance. Underwood et al. (2005) and Alanazi et al. (2018) showed that as the confinement pressure increases, the anisotropy evolves, as the air void and aggregates contacts are modified. Although in these studies, the anisotropy was evaluated by a ratio of radial and axial strains, and the deformation were found to be quite high and therefore away from the small strain domain.

Underwood et al. (2005) showed that HMA exhibits directionally dependent properties, especially in the case of compression tests. The testing temperature influences the anisotropic behavior. Alanazi et al. (2018) confirmed these findings and also showed that a greater nominal maximal aggregate size increases the anisotropy. Moreover, for a similar mixture, a greater air void ratio results in a more pronounced anisotropy. The following studies did not described anisotropy as inherent nor induced. Pham et al. (2015) investigated the behavior of HMA and warm mix containing RAP. They determined that complex Poisson ratio can be considered as transverse isotropic. Di Benedetto et al. (2016) studied the complex modulus and Poisson ratio in three dimensions of HMA. The modulus in the three directions exhibited a difference of up to 25%. With regard to the complex Poisson ratio, the difference could reach up to 100%, but the authors mentioned that this measurement is delicate. They concluded that the specimens can be considered as orthotropic. Nguyen et al. (2020) conducted E^* tests on specimens cored from a slab in three directions. This allowed them to compare E^* and v^* in these three directions. The 2S2P1D model for the three directions gave identical parameters, with exception of E_{00} , E_0 v_{00} and v_0 . Differences in the value of E^* and v^* in the three directions show anisotropy in the mix. The normalized curve of E^* and v^* can be considered as identical. Benedetto et al. (2011) highlighted that specimens compacted with a slab compactor and with a shear gyratory compactor (SGC), exhibited anisotropic behaviors, but with inverted characteristics. A wave-based method was employed to evaluate the compressive velocity (V_p)

in three directions. In considering the axis along which the compaction energy is applied (Z), the transverse axes (X and Y), and the compressive velocity (V_p _{axis}) in the aforementioned direction, it can be observed that for the cylinder specimen, V_pX and V_pY are equal and lower than V_pZ . In contrast, for the slab specimen, V_pX and V_pY remain equal but higher than V_pZ .

7.3.1 Wave-base methods

Wave-based methods are non-destructive and, for most of them, non-intrusive. These methods have been used to characterize various construction materials, such as concrete, soils, or bituminous materials. Mechanical wave-based methods employ compression or shear waves for testing. The ultrasonic pulse velocity (UPV) method, such as the PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester), is extensively used and primarily relies on compression waves, although shear waves may be used occasionally (Mounier et al., 2012). In this method, sensors are placed on opposite ends of the material being tested. These sensors transmit and receive signals that propagate through the material. By measuring the travel distance and flight time of the signals, the velocity of the waves can be determined. This method operates in the temporal domain.

To obtain the time of flight, the arrival time of the received signal is compared to a reference time of the emitted signal. However, there is no consensus regarding the precise method for obtaining this time of flight (Arulnathan, Boulanger, & Riemer, 1998; Brandenberg, Kutter, & Wilson, 2008). Indeed, one can choose to set the reference time of the emitted signal at the first arrival or at the maximum peak of it. As well, one can choose to set the arrival time of the received signal at the first arrival, first peak, maximum amplitude peak (Mounier et al., 2012; Abd Elhafeez et al., 2014; Larcher et al., 2013; Mounier et al., 2016; Zargar et al., 2019). Figure 7.1 shows an example of such dilemma. Depending on which of the precedent choices, the time of flight drastically changes, along with the wave velocity. Moreover, the near-field effect can occur when using S-Wave (Karray et al., 2015).

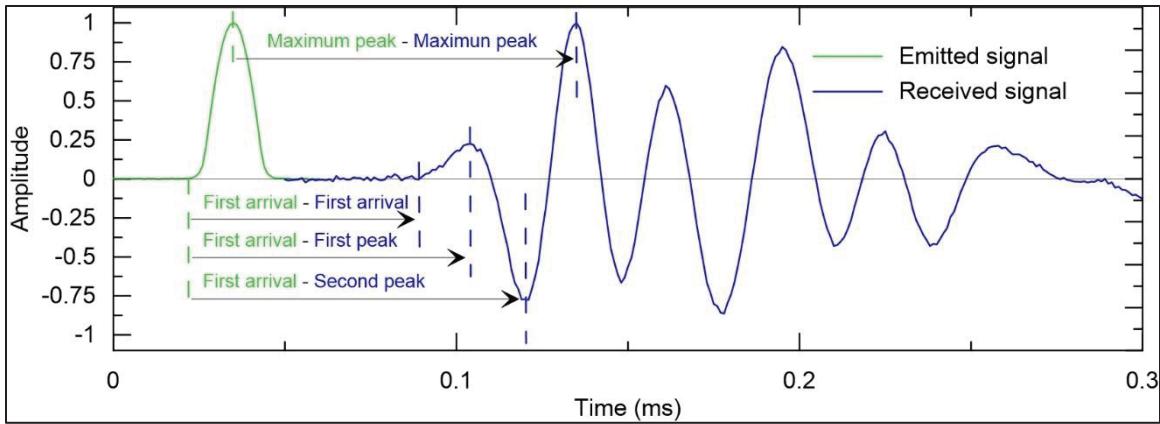


Figure 7.1 Example of input signal and received signal

Wave-based methods require signal processing, so time-domain methods such as UPV provide a straightforward and convenient solution, rendering them attractive as initial approximations. However, when it comes to characterizing materials and monitoring the evolution of mechanical parameters, the requisite level of precision may warrant the utilization of more intricate techniques, such as frequency domain methods.

Unlike time-domain methods that concentrate on analyzing temporal signals, frequency domain methods involve decomposing the signal into multiple harmonics using discrete Fourier transform. This decomposition allows for extracting valuable information such as the frequency spectrum, resonant frequency, and even the phase shift (Mounier et al., 2012; Karray et al., 2015; Tavassoti-Kheiry et al., 2016). Although these methods entail more calculations, their signal processing is objective and offers means of verification.

7.3.2 The P-RAT

The piezoelectric ring actuator technique (P-RAT) method, developed at Sherbrooke University, was initially used for geotechnical applications (Karray et al., 2015; Elbeggou et al., 2019). It is based on the cross-correlation method, which determines the shear wave velocity by comparing the emitted and received signal at different frequencies. The P-RAT method uses spectral analysis of elastic shear waves propagating in a specimen. Back calculations provide

the shear wave velocity V_s instead of the phase velocity V_{ph} , which is obtained via the cross-correlation method and correction of phase-shift produced by emitter-receiver sensors. Unlike the phase velocity, which varies with frequency, the shear wave velocity is an intrinsic material parameter that should remain constant irrespective of the frequency.

In the P-RAT configuration, piezoelectric transducers are used. They are composed of a metal cylinder fitted inside a piezoelectric ring using epoxy. The piezoelectric ring is welded on each side to a shield wire, which transfers the electrical pulses of varying forms and parameters to the ring. Due to the piezoelectric nature of the ring's material, these pulses induce radial deformation of the rings. This enables the generation of shear waves. Two transducers are used at a time, with one serving as emitter and the other as the receiver. The signals are analyzed with a dedicated Labview program, and the shear wave velocity (V_s) is obtained. Details may be found in Karray et al. (2015) and Lecuru et al. (2019; 2025).

P-RAT has been successfully used to characterize CIR material at young age (Lecuru et al., 2019; Lecuru et al., 2025), due to its use of mechanical shear waves that do not propagate into water. P-RAT appears to be suitable for such utilization. Moreover, P-RAT has been employed to characterize soils (Karray et al., 2015; Elbeggo et al., 2019) and concretes at an early age (Soliman et al., 2015; Naji et al., 2017; Naji et al., 2018). Elbeggo et al. (2019) demonstrated the robustness of the P-RAT in clays, by using different actuators and different set-ups in two distinct laboratories. Finally, the use of P-RAT focus on very small strain, allowing to consider the test as being done in the elastic domain (Mhenni et al, 2015). The P-RAT's transducers characteristics and the methodology of the test allows measuring V_s in different directions on a single specimen, if the shape of the specimen permits it.

7.4 Materials and methods

The study is composed of three different parts. The first part consists of V_s measurement in sections of a slab in three directions with the P-RAT and UPV techniques. The second part consists of conducting complex modulus tests on cylinders cored from these slab sections.

Finally, the third part consists of performing CT-Scan on the same cylinders to evaluate the aggregates orientation. Figure 7.2 displays a schematic representation of the experimental campaign, with a detailed description of each part in the subsequent sections.

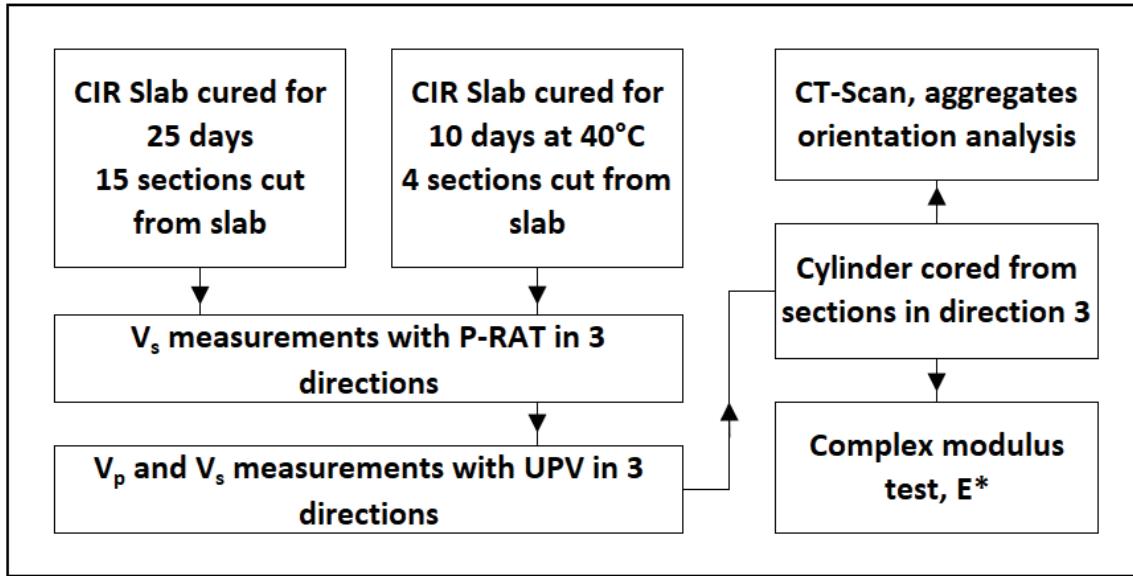


Figure 7.2 Schematic of the experimental campaign

7.4.1 Materials used and specimens

The tested specimens are two CIR materials slabs. The first one is composed of 100% RAP material (0-10 mm) with 2% added bitumen in the form of asphalt emulsion, 6% added water and 1% cement. The second slab is composed of 100% RAP material (0-20 mm) with 2% added bitumen in the form of asphalt emulsion (CSS-1, from McAsphalt) and 2% added water. All the mentioned percentages are related to the mass of RAP. The components were stored at room temperature and the RAP was not oven dried.

The slabs were compacted with a LPC French wheel compactor, following the procedure, although in the case of CIR materials, no metal wheel is used. The slab dimensions are 600*400*130 mm and 500*180*110 mm for slab 1 and slab 2, respectively. Slab 1 and slab 2 were cured in an oven at 40°C for 25 days and 10 days respectively. After curing, the slabs

were left in a freezer for 24 hours to facilitate the cutting process. The slabs were cut in 15 sections of 105*105*130 mm and 4 sections of 110*140*110 mm blocs for slab 1 and slab 2 respectively. Figure 7.3 A and 7.3 B present schematic views of slab 1 and slab 2, respectively.

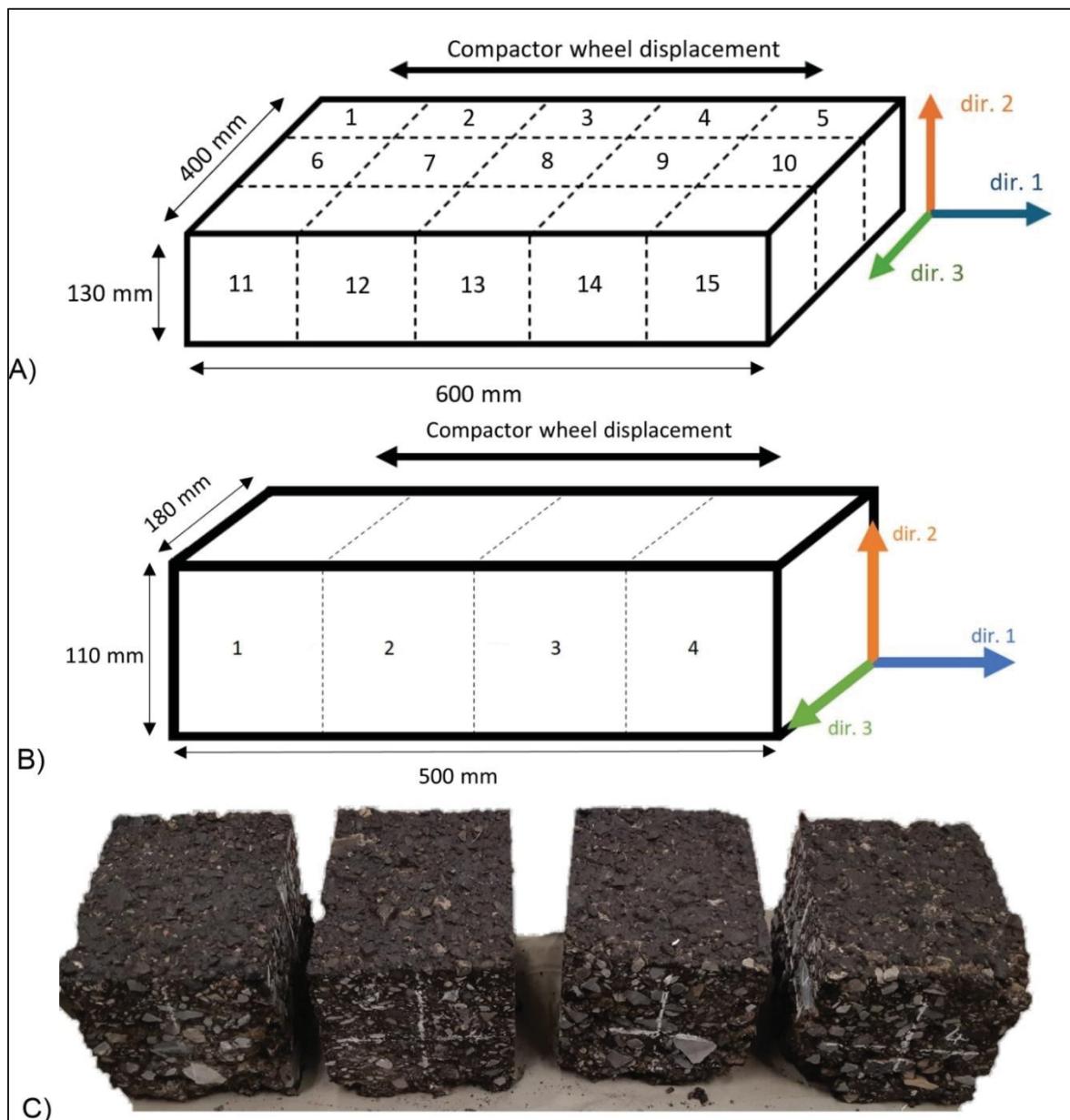


Figure 7.3 Schematic view of : A) slab 1, B) slab 2; C) real specimens after curing and cutting, slab 2

The sections are referred to by the name of the slab and the number of the section, according to Figure 7.3. Section 4 from slab 2 is referred to as Slab2_4, for instance. Some sections were also covered with a bitumen mastic on each side to assess the improvement of contact and its influence on the P-RAT measurement. The bitumen mastic was made of $\frac{1}{4}$ bitumen (PG 58S-28) for $\frac{3}{4}$ sand (concrete sand), by mass.

Four cylinders of diameter 75 mm were cored from the sections of slab 2 in direction 3, as E* tests are usually done with cylindrical specimens with a $\frac{1}{2}$ diameter to length ratio. The four cylinders are designated specimens Slab2_1C to C_Slab2_4C, according to the section from which they were cored from.

Slab 1 was compacted to a targeted void ratio of 20 %. The bulk density was calculated according to LC-26-040 (MTMD) by volumetric means due to the void ratio being larger than 10 %. There is a lack of materials on the edge of the sections / cylinders due to cutting process. Therefore, the bulk densities are underestimated, and the resulting air void ratio are overestimated. The 3D analysis provides the air void ratio, without considering the edges of the specimens. The bulk density of specimen Slab2_2 to Slab2_4, their estimated void ratio and calculated void ratio with 3D analysis are presented in Table 7.1.

Tableau 7.1 Information on sections of slab 2

Method	Specimen	Slab2_1C	Slab2_2C	Slab2_3C	Slab2_4C
LC 26-040	Volumetric bulk density (g.cm⁻³)	1.910	1.940	1.985	1.900
	Air void ratio (%)	24.1	22.9	21.1	24.5
3D analysis	Air void ratio (%)	n.a.	17.2	16.5	17.1
	Calculated bulk density (g.cm⁻³)	n.a.	2.084	2.102	2.086

7.4.2 P-RAT anisotropy measurements

The tests were conducted uniformly across all tested sections. The objective of the study is to evaluate the anisotropic behavior of the CIR material. To this end, each block was tested in 3 different directions (dir. 1, dir. 2 and dir. 3) according to Figure 7.3.

Different pairs of transducers were used in this study. As shown in Lecuru et al. (2025), the dimensions of the transducer do not influence the results significantly. Although, for smaller transducer size, wave diffraction can occur if the aggregate diameter exceeds the transducer wavelength (Naji et al., 2018). Still, three main different transducer pairs were used in this study for control purposes and to ensure reproducibility. The designation of the transducers refers to the Outer-Inner Diameter, namely 19-16mm, 26-22mm and 36-31mm. The inner stones of the transducers are made of a four quarters aluminum cylinders. Other transducers were used in the case of slab 1, mostly for testing newly made transducers or enhanced former transducers. Some of the transducers are encased in a plastic capsule which mitigate the stress on the transducer during testing.

Transducers are positioned with care, ensuring that they are correctly aligned with one another. One transducer, acting as the emitter, is connected to a signal generator, Handyscope HS3 100 MHz (TiePie Engineering). The second transducer, acting as the receiver, is connected to another entry of the same apparatus which also act as an oscilloscope. An amplifier, 7602M from Krohn-Hite, is used on the generator side. The Handyscope is operated by a personal computer on which one can observe the emission and the reception signals. The form, amplitude, and frequency of the input signal are selected on the computer.

A single pair of transducers was used at a time, a rubber band was used to hold the transducer onto the specimens. Each pair was positioned in the same location, at the center of the surface. If the contact at this spot is insufficient to ensure optimal signal quality, the transducers are repositioned a few millimeters away. For repeatability and control concerns, signals of different shapes and frequencies are used when testing the specimen with a given transducer

pair. To remove potential noise in an individual signal, the signals are sent eight times and stacked. Every specimen was tested at room temperature, and under the same conditions. Finally, these signals are then analyzed with a dedicated P-RAT software developed in LabView (National Instruments) with the aforementioned concept obtained from Sherbrooke University (Karray et al., 2015).

7.4.3 UPV

The PUNDIT PL-200 device (ScreeningEagle) is a device mainly employed in the monitoring of concrete materials via UPV. The Pundit device was used to monitor the P-wave and the S-wave in the tested specimens. To ensure good contact between the specimens and the sensors, coupling media was used as recommended by the PUNDIT supplier. The sensors used for the generation and reception of P-waves and S-waves have a resonant frequency of 54kHz and 250 kHz, respectively. Each sensor was manually held in place to ensure a sufficient contact with the tested specimen, and the sensors were kept aligned. The results have been analyzed in the Pundit software (PL-Link).

To obtain the S-wave flight time, one has to compare the received P-wave signal with the received S-wave. Indeed, even with a dedicated S-wave sensor, a weaker P-wave is generated. The following study investigates three different configurations regarding the arrival time of the received signal: first arrival, first peak and second peak. There is no information on the nature of the input signal generated by the Pundit PL-200 device. Therefore, the flight time of either the P-wave or the S-wave is taken as shown in Figure 7.1, as instructed by the Pundit method.

7.4.4 Complex modulus E*

The linear viscoelastic behavior of the cored cylinder was evaluated by dynamic tension-compression tests. Sinusoidal cyclic axial loads were applied with a hydraulic press (MTS) in a controlled deformation mode. The amplitude of the deformation was selected to be around

50µm/m. The cylinders were glued to metallic caps using epoxy and equipped with three extensometers of 50 micrometer in the axial direction and temperature probes.

Specimens Slab2_3C and Slab2_4C were tested at 1, 0.3, 0.1, 0.03, and 0.01 Hz at 40, 30, 20, 10, 0, -10, and, -20 °C; and 25, 15, 5, -5, -15, -25, and -35 °C for specimen Slab2_3C and with the last array of temperature for Slab2_4C.

The experimental results were analysed using the 2S2P1D model which is a linear viscoelastic model composed of two springs, two parabolic elements and one dashpot (Olard & Di Benedetto, 2003; Pham et al., 2015; Di Benedetto et al., 2016; Perraton et al., 2018; Nguyen et al., 2020). More details can be found in the mentioned references. The following equation is used to calculate the complex modulus E*:

$$E_{2S2P1D}^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau_E)^{-k} + (j\omega\tau_E)^{-h} + (j\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (7.1)$$

Where ω is the angular frequency; j is the imaginary unit; k, h, δ are constant ($0 < k < h < 1$); E_{00} is the static modulus, when ω tends to 0; E_0 the glassy modulus, when ω tends to infinite; β , parameter linked with η , the dynamic viscosity of the dashpot, $\eta = (E_0 - E_{00}) \beta \tau_E$; τ_E , the characteristic time values. The characteristic time values vary with the chosen temperature T and the shift factor a_T , $\tau_E(T) = a_T(T)^* \tau_{0E}$.

7.4.5 Computed Tomography Scan (CT-Scan)

CT-Scan were performed to assess any specific particles orientation in the mix. The XTH-225 device from Nikon was used for specimen Slab2_3C while a FF35 from Yxlon Comet was utilized for specimens Slab2_2C and Slab2_4C. CT-Scans were conducted with a voltage of 210 kV and a current of 210 µA for specimen Slab2-3C; and a voltage of 209 kV and a current of 108µA for specimens Slab2_2C and Slab2_4C. Two distinct scanning devices were utilized for availability concerns. The 3D specimens were analysed with Dragonfly software (Comet Technologies Canada Inc). The cubic voxel size was 68.63 µm for specimen Slab2_3C and 30.75 µm for specimens Slab2_2C and Slab2_4C.

The 3D images data set size was first reduced to remove parts affected by artefacts, such as cone beam artefacts at the upper and lower parts of the data set. Then the data set was filtered to ease the segmentation process. Mainly, a smoothing filter was applied to reduce noise within the images, and an RBF (radial basis function) filter was used to mitigate greyscale variation across the images due to beam hardening and the cylindrical shape of the specimens. Granular materials were segmented and labelled individually with the tools offered by Dragonfly software. During the segmentation process, some errors can be introduced, mostly due to the spatial and the contrast resolution of the voxels. For instance, a voxel can be labelled as “aggregate” though it could be “bitumen mastic”. But, in the present study, it does not impact the aggregate orientation as aggregates composed of few voxels were not considered in the final analysis.

The orientation of the longest axis of a labelled particle was evaluated with 2 parameters, Φ and θ angles, θ being the angle between the X axis and the projection of the longest axis in the X-Y plane; and Φ the angle between the longest axis and Z axis, as shown in Figure 7.4.

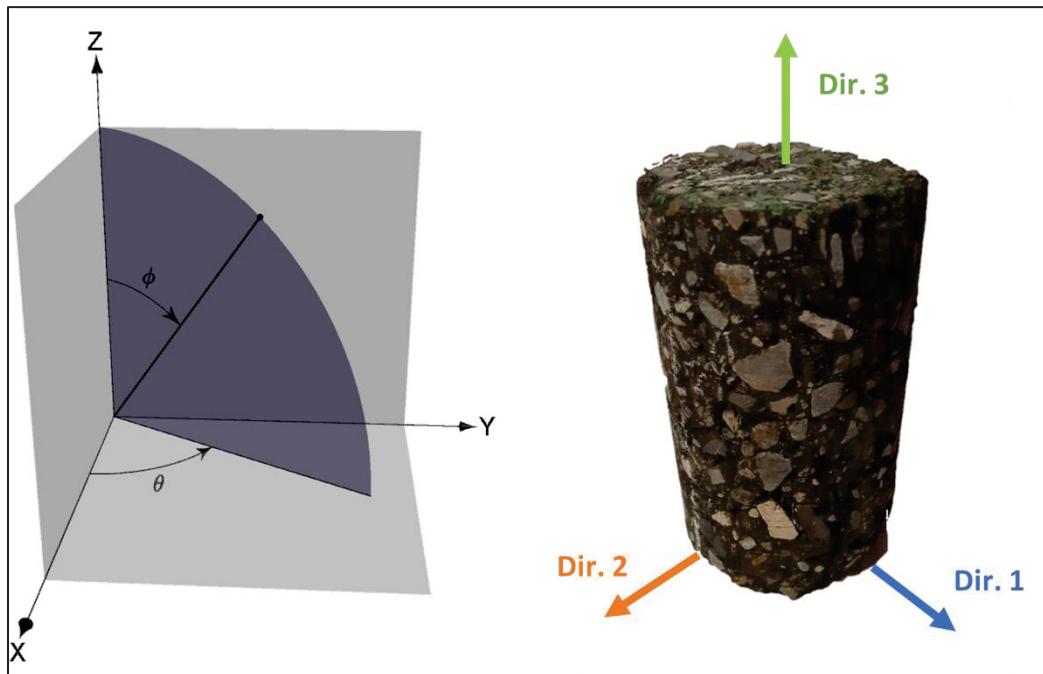


Figure 7.4 Parameters Φ and θ schematic definition, Dragonfly

Air voids were also segmented, in order to calculate the air void ratio of the tested specimens by comparing the labeled void voxel to the global voxel count. A CLAHE (Contrast-limited Adaptive Histogram Equalization) filter was applied to enhance the contrast in the data set, when required.

7.5 Results and analysis

In this section, the results concerning anisotropy are presented first. V_s results obtained with the P-RAT in the slabs are analysed and the particles orientation of aggregates is presented. UPV results are discussed. Afterward, the results of the complex modulus are presented, and a comparison with wave velocities is made.

7.5.1 P-RAT Shear wave velocity (V_s) results

Figure 7.5 illustrates the effects of bitumen mastic on two signals. In both cases, the presence of a P-wave is observed, but it is more pronounced in the case of the mastic interface. However, the signal is clearer. The P-RAT transducers are designed to generate mainly shear waves. Due to the size of the specimen and the quality of the contact, in order to obtain a signal at the receiver end, it is sometimes necessary to amplify the emitted signal, generating larger deformation of the piezoelectric ring. Such amplification tends to generate more P-wave. It has been observed that in the case of the bitumen interface, the P-wave amplitude is higher than the S-wave one compared to the case without mastic. The arrival time of the wave, calculated from the P-RAT V_s measurement are 0,294 ms and 0,309 ms for the signals with and without mastic, respectively. Figure 7.5 C and D display an example of the P-RAT analysis. See Karray et al. (2015) for more details.

The difference between V_s values in section Slab2_3 with and without mastic is 1.5, 2.7 and 1.3 % for directions 1, 2 and 3, respectively. It was more convenient to lay the same thickness of mastic on the ends of section 3 in directions 1 and 3 (2mm on each face) than in direction 2. Indeed, the upper part surface of the slab is uneven, resulting in a thicker layer of mastic. This explains the higher difference observed in direction 2. P-RAT testing with various pairs

of transducers have demonstrated that the mastic used to improve the interface gives V_s values of approximately 300 m.s^{-1} . In the case of a mastic interface, the S wave propagates slower in the mastic layer, reducing the overall V_s . The actual V_s of the specimen can be calculated as the thickness of the mastic layer and the V_s of the mastic used are known. In the following figures, V_s depicted as “with mastic” display the corrected V_s values.

Regarding slab 2, for direction 2, only section Slab2_1 was monitored with the 36-31 mm transducers pair. The surface of the three other sections were too rough to allow for a proper contact of this larger size of transducer. The same situation occurred for specimens of Slab 1, preventing the acquisition of V_s results in its direction 2. V_s measurements in the tested section of slab 1 and in the four sections of the slab 2 are presented in Figures 7.6 and 7.7. Each point represents the mean value of all measured signals. As mentioned in the P-RAT measurement section, several signals of various shape and frequencies were sent for repeatability and control issues. For example, “ V_s values in Direction 1 19-16 mm” is the mean value of all five treated signals (after stacking) for the 19-16 mm transducers pair in direction 1.

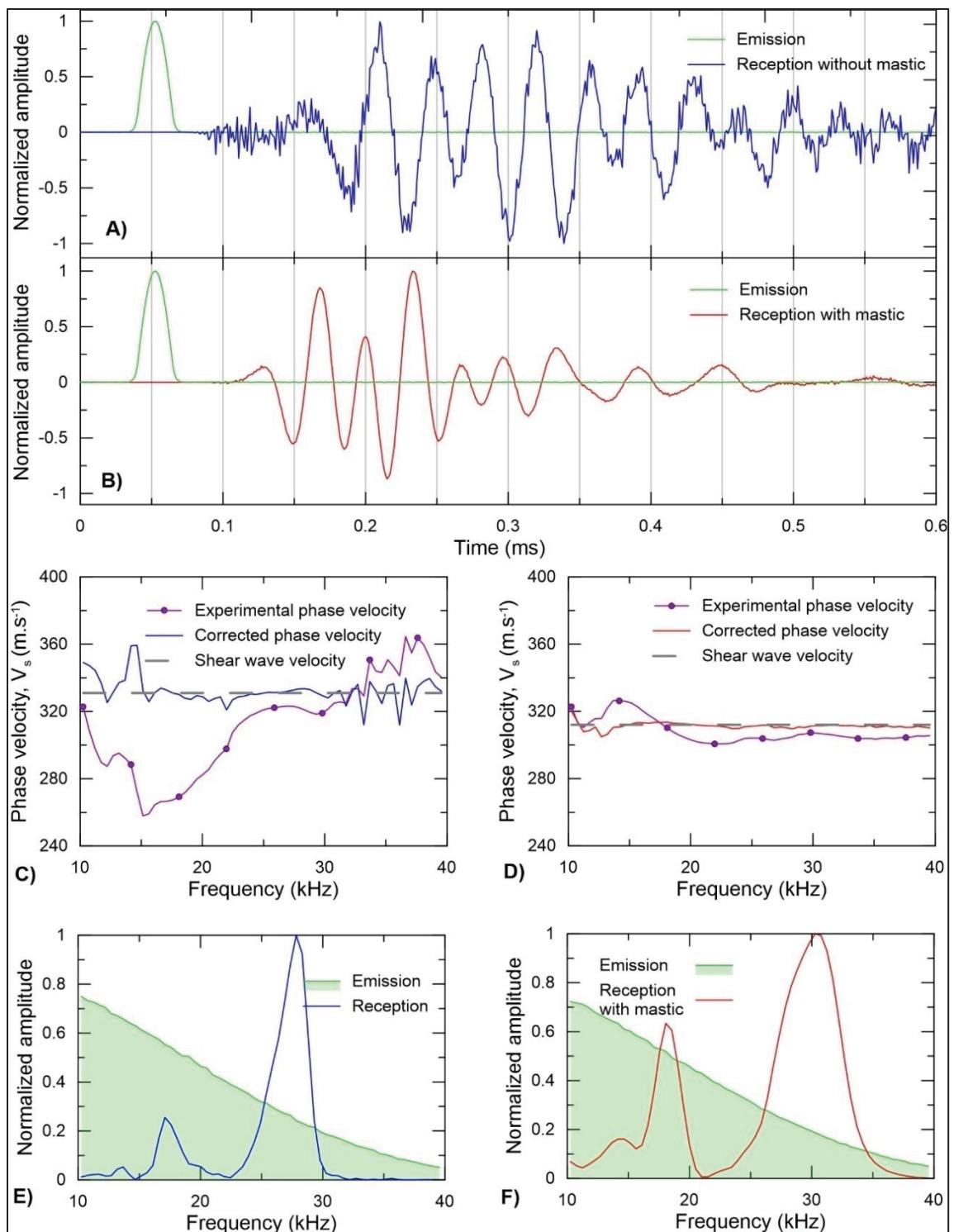


Figure 7.5 V_s measurements using P-RAT and influence of the bitumen mastic interface; Temporal signals A) and B); P-RAT analysis C) and D); Frequency decomposition E) and F) without and with bitumen mastic, respectively. Section Slab2_3, dir. 2, 26-22 mm transducers, DSA-10kHz-12V signal

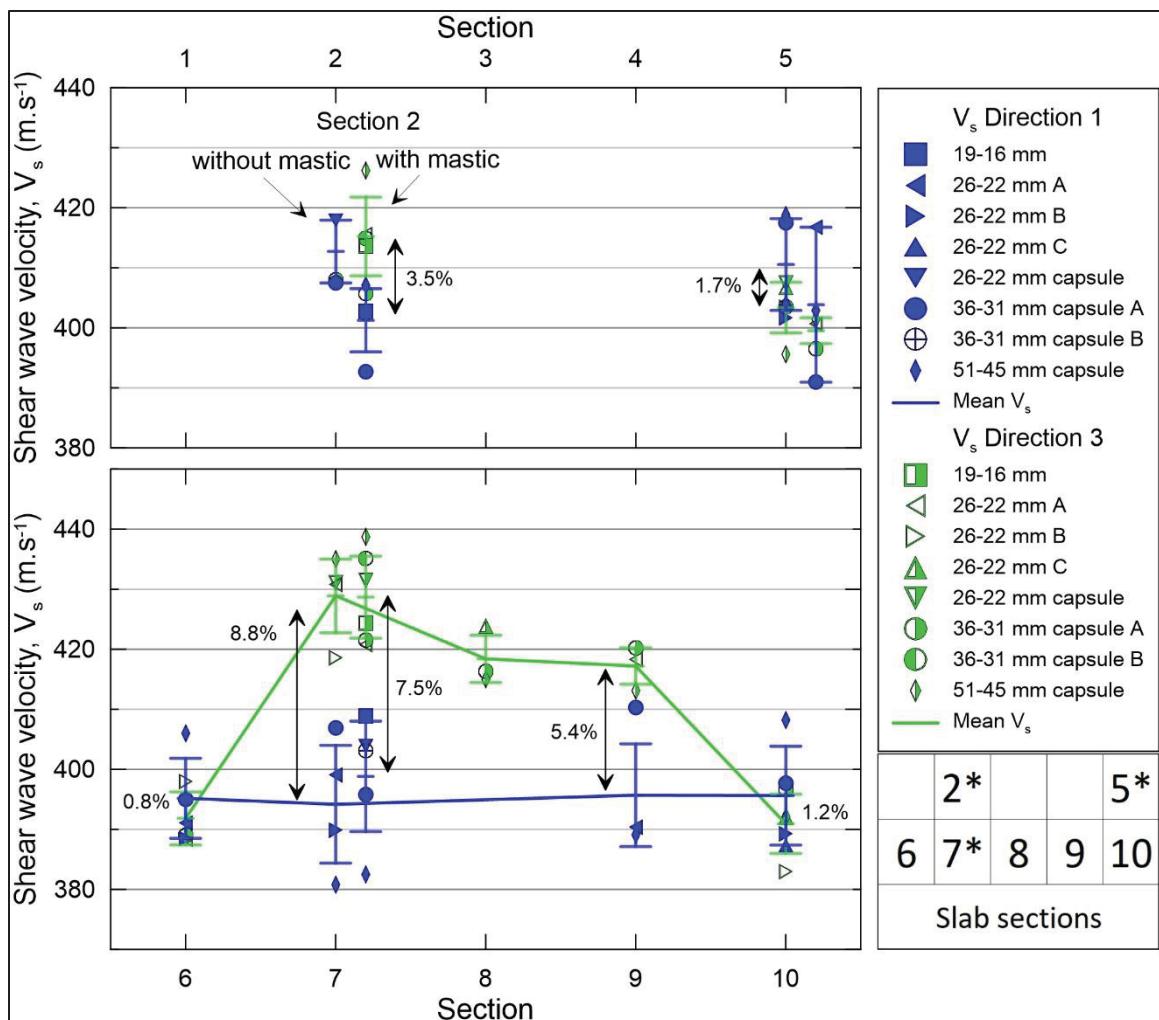


Figure 7.6 Shear wave velocity with respect to direction for tested sections of slab 1. Sections with * have also been tested with a bitumen mastic interface. The relative differences between mean V_s values are displayed

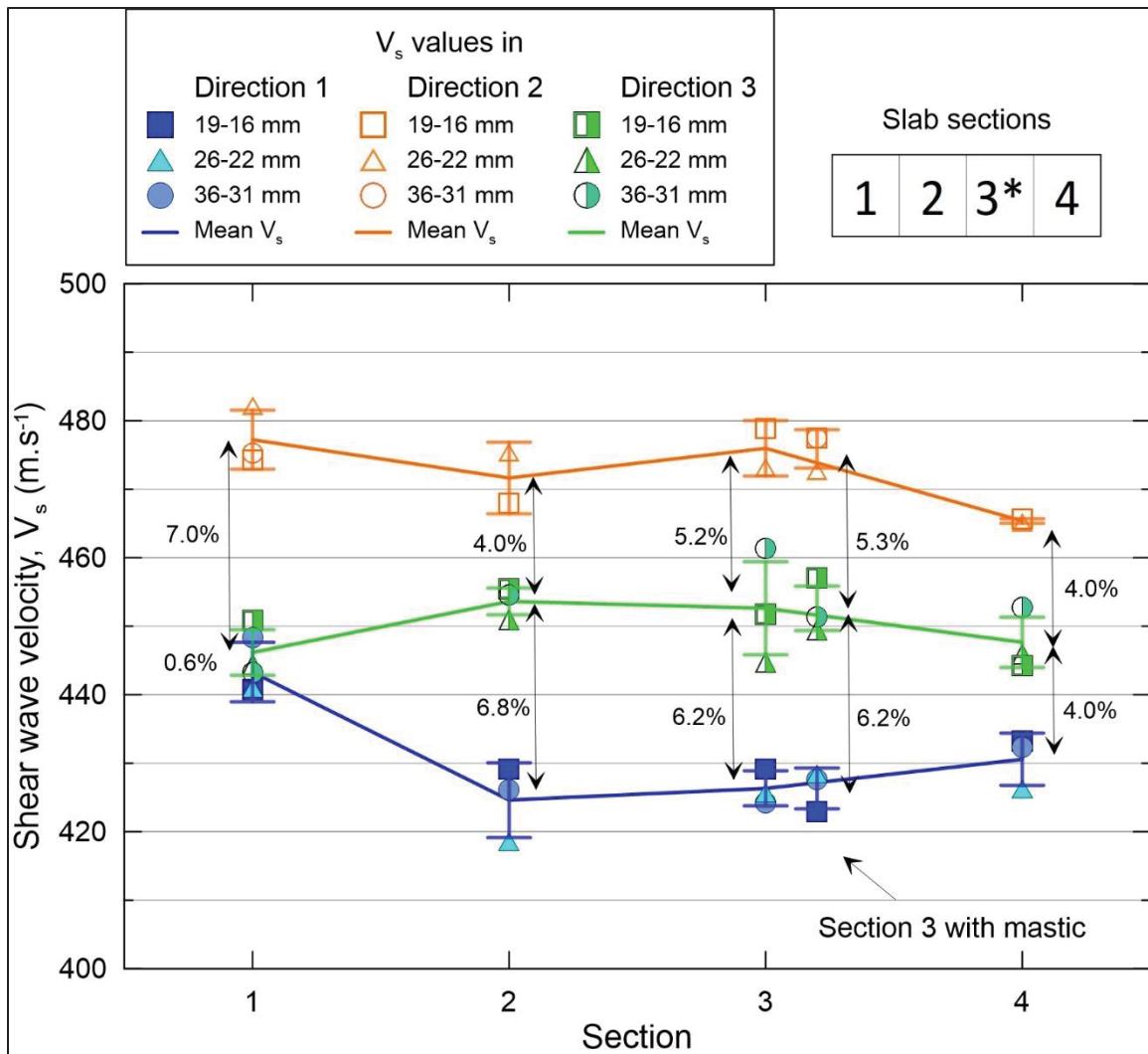


Figure 7.7 Shear wave velocity with respect to directions for each section of the slab 2. Sections with * has been tested with and without a bitumen mastic interface. The relative differences between mean V_s values is displayed

To simplify the text, V_s in direction 1,2 and 3 are referred to as V_{s1} , V_{s2} and V_{s3} respectively. Table 2 and 3 presents the relative standard deviation between the pairs of transducers for a single direction in a same section for slab 1 and slab 2, respectively. The maximum standard deviation in regard to the mean V_s values are 3.1 % and 1.8 % in slab 1 and slab 2, respectively. It shows good reproducibility of the measure. More transducer pairs were utilized to evaluate V_s in slab 1's sections, which explains the higher standard deviation in slab 1 compared to slab

2. As mentioned in Lecuru et al. (2019), the different sizes of actuators don't influence significantly the values, as shown by the low differences presented in Tables 7.2 and 7.3.

Tableau 7.2 Minimal V_s values, maximal V_s values and relative standard deviation ($\sigma\%$) for the pairs of transducers in slab 1

Section	$V_{s1} (\text{m.s}^{-1})$			$V_{s3} (\text{m.s}^{-1})$		
	Min.	Max.	$\sigma\%$	Min	Max	$\sigma\%$
Slab1_2	407.5	417.9	1.8%	408.0	408.0	n.a.
Slab1_2 mastic	388.4	401.9	1.4%	401.4	420.9	1.7%
Slab1_5	401.6	418.8	2.1%	395.6	407.4	1.2%
Slab1_5 mastic	387.2	411.7	3.1%	393.8	398.5	0.6%
Slab1_6	388.5	406.0	1.9%	388.4	398.1	1.4%
Slab1_7	380.8	406.9	2.9%	418.6	435.0	1.6%
Slab1_7 mastic	378.9	403.9	2.5%	415.8	432.7	1.7%
Slab1_8	n.a.	n.a.	n.a.	415.0	423.9	1.1%
Slab1_9	389.0	410.3	2.5%	413.1	420.3	0.9%
Slab1_10	387.3	408.2	2.4%	383.0	396.6	1.5%

Tableau 7.3 Mean V_s values and relative standard deviation ($\sigma\%$) among the three pairs of transducers in slab 2

Section	$V_{s1} (\text{m.s}^{-1})$			$V_{s2} (\text{m.s}^{-1})$			$V_{s3} (\text{m.s}^{-1})$		
	19-16	26-22	36-31	19-16	26-22	36-31	19-16	26-22	36-31
Slab2_1	440.7	440.9	448.3	474.3	482.2	475.2	450.8	444.5	443.2
	$\sigma\%$		1.0%	$\sigma\%$		0.9%	$\sigma\%$		0.9%
Slab2_2	429.1	418.5	426.2	467.9	475.4	n.a.	455.4	450.9	454.5
	$\sigma\%$		1.3%	$\sigma\%$		1.1%	$\sigma\%$		0.5%
Slab2_3	429.2	425.6	424.2	478.8	473.1	n.a.	451.8	444.8	461.3
	$\sigma\%$		0.6%	$\sigma\%$		0.8%	$\sigma\%$		1.8%
Slab2_3	417.0	422.2	421.4	465.6	461.2	465.6	450.3	443.2	445.0
mastic	$\sigma\%$		0.7%	$\sigma\%$		0.5%	$\sigma\%$		0.8%
Slab2_4	433.2	426.2	432.3	465.6	465.1	n.a.	444.3	446.0	452.8
	$\sigma\%$		0.9%	$\sigma\%$		0.1%	$\sigma\%$		1.0%

Naji et al. (2018), showed that the size of aggregates can generate wave diffraction, depending on the size of the P-RAT transducer used. Wave diffraction influences the propagation of shear waves in the tested specimen, therefore it influences the shear wave velocity. The results obtained herein using transducer of various dimensions do not demonstrate systematically higher or lower values of V_s , depending on the dimension of the transducer, compared with the average values.

A trend emerges from the curves of Figures 7.6 and 7.7. Especially away from the end of the slabs, V_{s2} values are systematically greater than V_{s3} and V_{s1} , and V_{s3} is greater than V_{s1} . In Figure 7.6 there is an axial symmetry relative to the middle tendency in the V_s values for sections Slab1_6-Slab1_7 and Slab1_9-Slab1_10. The same symmetry is observed in Figure 7.7, in V_s values for sections Slab2_2 and Slab2_3, and somewhat for sections Slab2_1 and Slab2_4. It is expected, as the tested specimens are pieces of a slab, that section Slab2_2 and Slab2_3 should be compacted in the same state, so do section Slab2_1 and Slab2_4.

V_{s1} and V_{s3} are higher in Slab1_5 than in Slab1_10. This may be because Slab1_5 is located at the corner of the sample. V_{s1} is higher in Slab1_2 and Slab1_5 than in Slab1_6 to 10. Slab1_1 to 5 are along the side of the sample. It can be assumed that the edges of the mold create a confinement in the materials during compaction. The confinement might induce a better aggregate contact, resulting in a higher V_s value. This confinement is greater in direction 3 than in direction 1, due to the dimension of the mold, which is smaller in direction 3 than in direction 1. This confinement becomes more homogeneous in sections Slab2_1, Slab2_4 and Slab1_5, which explains the closeness of V_{s1} and V_{s3} values in these sections. The difference between V_{s1} and V_{s3} values could also be explained by the nature of the S-waves and the way the slabs are compacted. The compacting wheel moves in direction 1, therefore the aggregates tend to move along. This movement can result in friction between the aggregate in a perpendicular direction, i.e., direction 3. In S-waves, the local displacement of matter is perpendicular to the direction of wave propagation.

The relative differences between mean V_s values in the different direction are presented in Figures 7.6 and 7.7. Concerning slab 2, the maximum relative differences are 7.6, 11.1, 11.6, and 8.1 % for sections Slab2_1, Slab2_2, Slab2_3, and Slab2_4 respectively. In order to compare these values with the literature, equation 7.2 is used to estimate the equivalent modulus (Mounier et al., 2012):

$$V_s = \frac{1}{\cos(\frac{\phi}{2})} \sqrt{\frac{|E^*|}{2\rho(1+\nu)}} \quad (7.2)$$

With the phase angle ϕ , the bulk density ρ (kg.m^{-3}), the Poisson ratio ν , V_s the shear wave velocity (m.s^{-1}) and E^* the complex modulus (Pa).

The maximum relative differences in modulus for the aforementioned specimens are 15.9, 23.4, 24.6, and 16.8 % respectively. The relative differences values observed in the literature for HMA range from 10 to 50 % (Di Benedetto et al., 2016; Nguyen et al., 2020; Lin, Hu, Guan, Easa, & Jiang, 2021). As explained earlier, the anisotropy is influenced by many parameters which explained the wide array of values in the literature.

The maximum value always appears between V_{s2} and V_{s1} , and the symmetric trend is respected. Although no analysis of variance was performed, it can be assumed that the V_s values in the 3 directions are different in each section, except for V_{s1} and V_{s3} in sections Slab2_1, Slab1_5, Slab1_6 and Slab1_10. The symmetry of the results demonstrates the consistency of the results, and the systematic differences observed implies anisotropy in the tested CIR.

7.5.2 UPV test results

The results of UPV tests are presented in Figures 7.8 for the P-wave. Although the choice of arrival time configuration is not obvious, the first peak one (bold line in Figure 7.8) tend to depict a similar behavior to what observed in P-RAT test results (Figure 7.7). A trend emerges

among the sections monitored with P-wave. The axial symmetry relative to the middle observed for P-RAT analysis occurs here as well. For sections Slab2_2 and Slab2_3 (i.e. in the middle of the slab), V_p in dir.2 is higher than in the other two directions. The opposite happens in sections Slab2_1 and Slab2_4. The relative difference between V_p values in a same section are displayed in Figure 8. The difference between V_p values can reach up to 12.8 % in the case of section Slab2_3. The relative differences are lower in sections Slab2_1 and Slab2_4, for every arrival time setup. This reduction of relative difference between the edges of the slab and the inner parts was also observed in V_s values obtained with P-RAT. The boundaries conditions applied by the metallic mold in the outer sections of the slab may impact the compaction of the mix and may cause anisotropy.

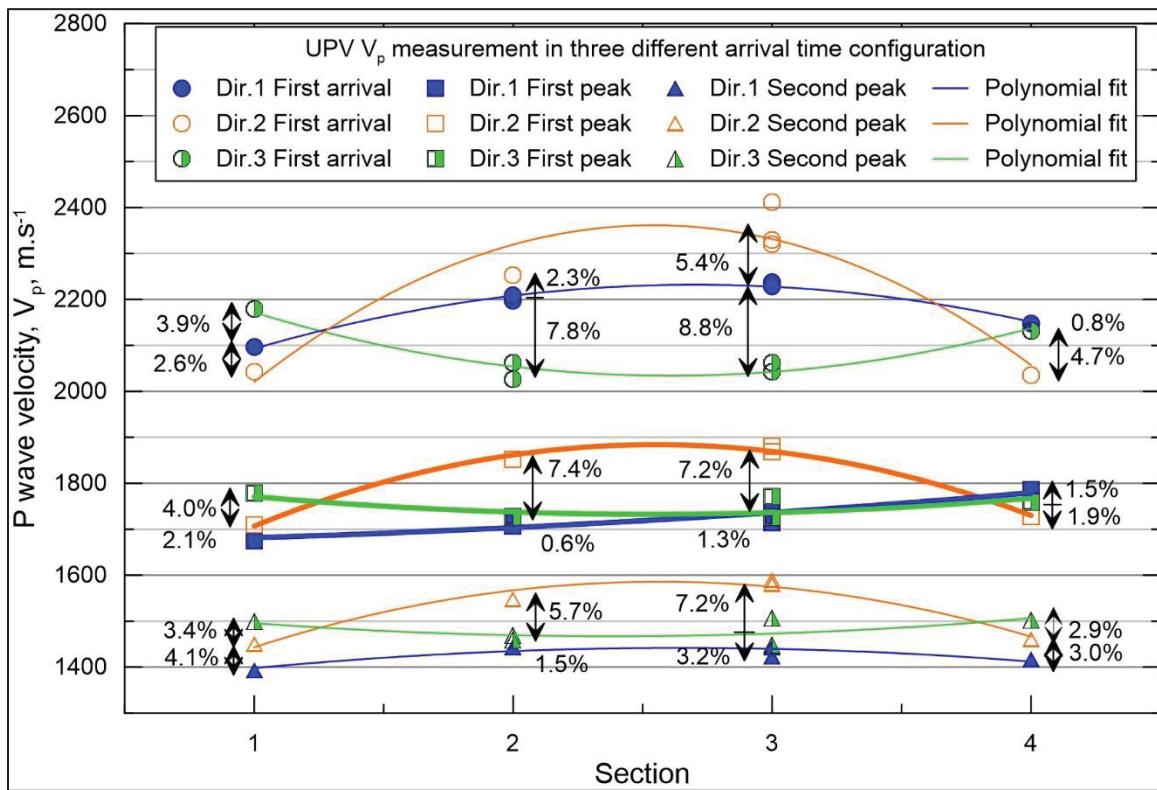


Figure 7.8 PUNDIT P-wave results in three directions for each section of slab 2 in three arrival time setups. The relative difference between mean V_p values is displayed

The analysis of the UPV S-wave is more difficult. As mentioned earlier, to get the S-wave flight time, one must compare the received P-wave signal with the received S-wave. In the

tested sections, the distinction between the P-wave and the S-wave was not readily apparent, therefore it can lead to erroneous assumptions regarding the location of the 1st and 2nd peaks. It was almost impossible to determine where the first arrival of the S wave was. Figure 7.9 presents examples of P and S waves signals to illustrate the difficulties mentioned before. In the case of section Slab2_4 in direction 3, two different S-wave signals give different results. Due to these erratic results, and their inconstancy even for a same specimen in the same direction, S-wave UPV results are reported as supplementary materials.

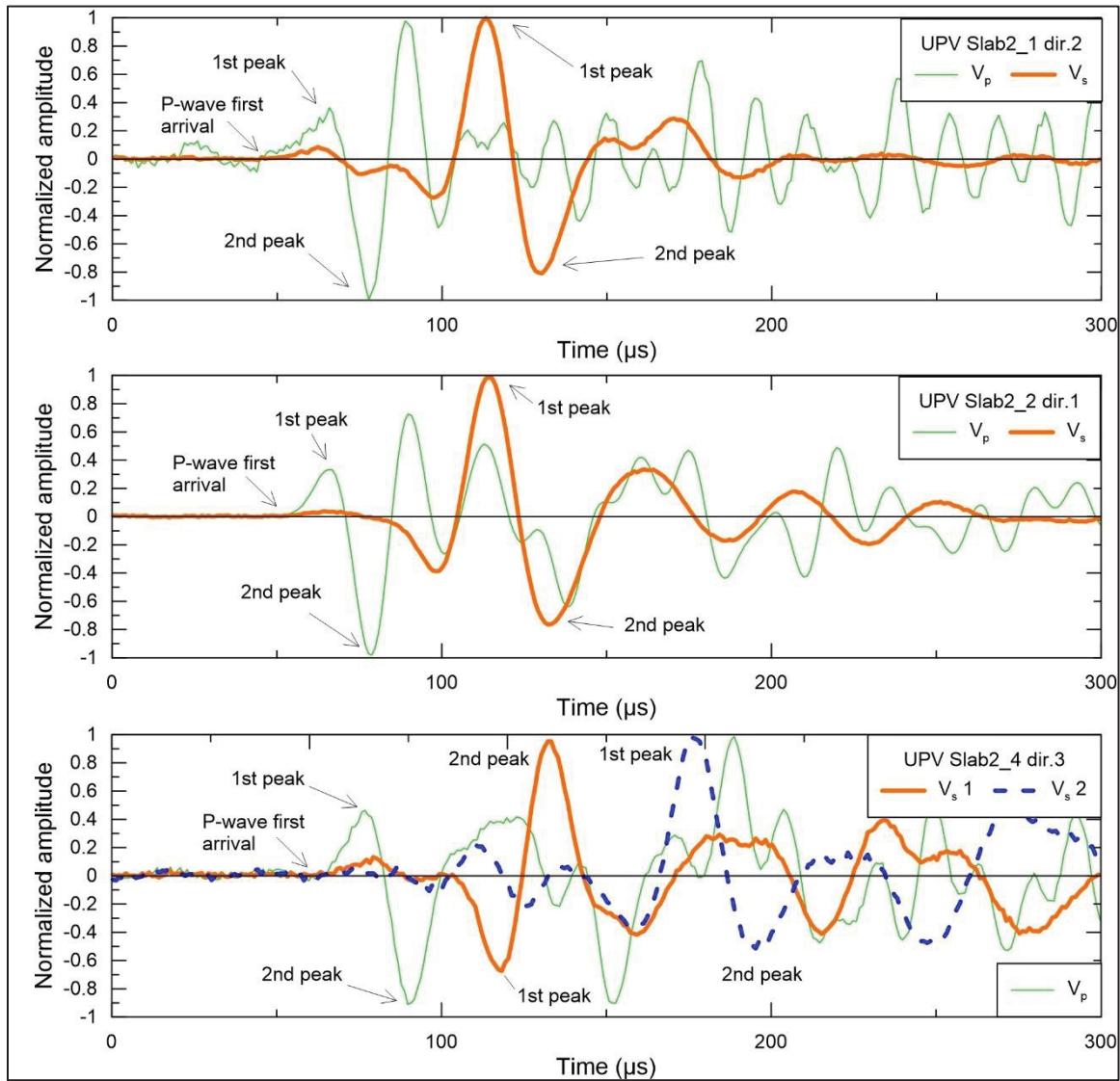


Figure 7.9 UPV P and S waves signals comparison in different directions and sections of slab 2

7.5.3 Complex modulus

This section presents the results of the complex modulus measurements. It should be noted that specimen Slab2_3C have been tested twice. The master curves of specimen Slab2_3C 1 and 2, and Slab2_4C are plotted in Figure 7.10. Table 7.4 compiles the 2S2P1D parameter used for the analysis of the experimental results.

Tableau 7.4 2S2P1D parameters

	E_{00} MPa	E_0 MPa	v_{00}	v_0	k	H	δ	T (T _{ref})	β	C1	C2
Slab2_3C 1	20	7500	/	/	0.170	0.475	2.56	0.2 (10.93)	5000	20.00	159.12
Slab2_3C 2	32	7200	/	/	0.170	0.490	2.69	1.1 (4.96)	5000	24.02	158.55
Slab2_4C	22	7675	/	/	0.161	0.450	2.85	1.1 (4.96)	5000	23.47	159.08

The specimens were equipped with a chain to measure radial deformations, but the results obtained were erratic and did not follow the usual trends that appear in the literature. It is assumed that the applied strain was too small to get enough amplitude in the transverse direction. The strain measured by the chain was mainly noise, rather than actual displacement. The results are not presented for this reason.

It appears that there is a reduction in the modulus for specimen Slab2_3C when performing the second tension-compression test. Although the strain amplitude was small, some damage can be induced to the specimen.

The results from UPV testing were converted into modulus, with the following equation (Mounier et al., 2012):

$$V_p = \frac{1}{\cos(\frac{\phi}{2})} \sqrt{\frac{|E^*|(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (7.3)$$

and considering the following parameters: the phase angle $\phi = 20^\circ$ (from E^* tests), the bulk density $\rho = 2000 \text{ kg.m}^{-3}$ (from measurements) and the Poisson ratio $\nu = 0.3$ (assumed). Theirs $|E^*|$ modulus are plotted along the master curve, at a reference temperature of 20°C , considering the frequency of the UPV sensor used, 50kHz for P-wave. The modulus for the different arrival time setups, i.e. first arrival of the signal, 1st peak and 2nd peak (see Figure 7.1) are plotted. The relative difference between the experimental $|E^*|$ modulus and the UPV modulus calculated from the aforementioned arrival time configurations are 35, 2, and 30 %, respectively. It appears that the 1st peak arrival time configuration of P-wave, fits the master curve.

Mounier et al. (2012) and Larcher et al. (2013) observed differences between UPV modulus and 2S2P1D model, considering the arrival of the wave at the first arrival of the signal, from 5 up to 30 % and 12 %, respectively. Both studies point out the importance of accuracy in measuring the arrival time of the wave.

Mean P-RAT V_s value in dir.3 for section 3 and 4 are 452.6 and 447.7 m.s^{-1} respectively. Their equivalent $|E^*|$ modulus considering $\phi = 20^\circ$, $\nu = 0.3$ and ρ presented in Table 7.1 are 1057 and 990 MPa for sections Slab2_3 and Slab2_4 respectively. These moduli come from a group shear wave velocity and therefore are not bound to frequency. Therefore, these moduli cannot be plotted in the master curve. In a previous study by Lecuru et al. (2025), modulus calculated from V_s results obtained with P-RAT tests were compared with Indirect Tensile Strength Modulus (ITSM) test results. They were demonstrated consistent, for a similar CRM mix.

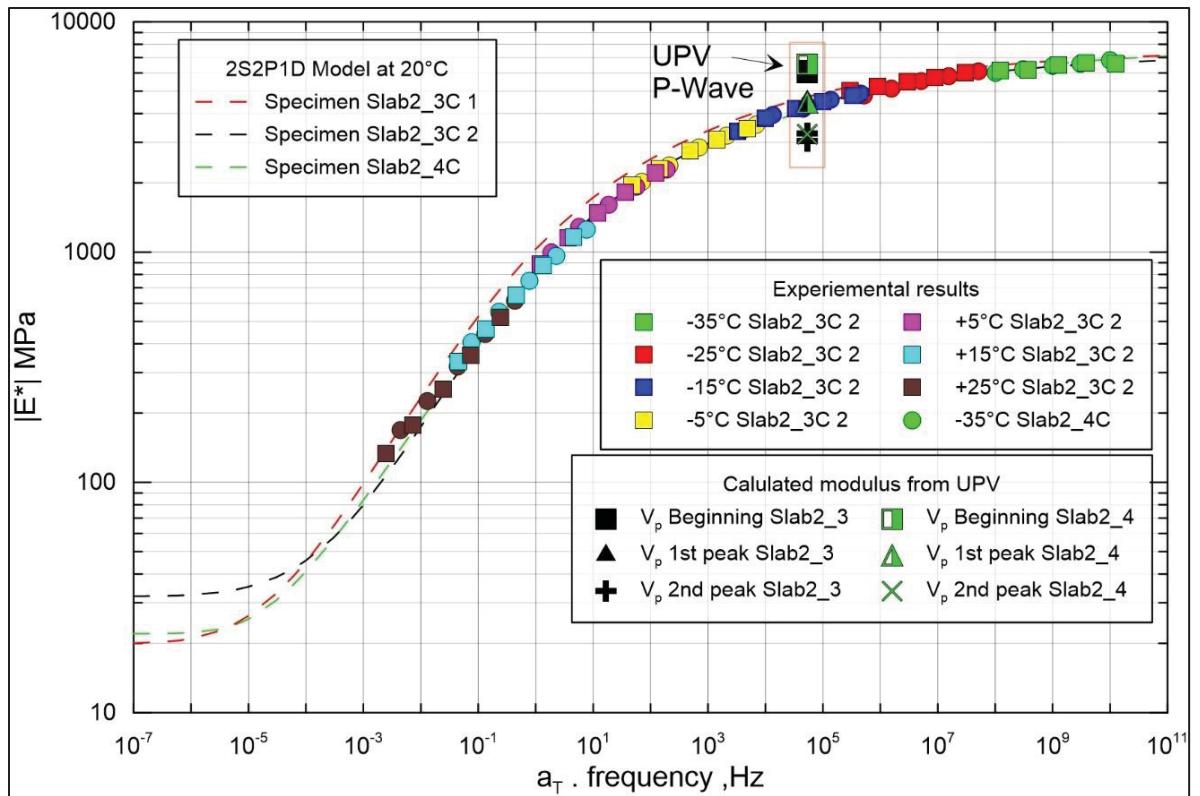


Figure 7.10 Master curve of cylinder cored in direction 3 for section Slab2_3 and Slab2_4 at a reference temperature of 20°C. The calculated complex modulus from UPV tests are also plotted

For V_p , the first peak arrival time configuration appears to be the one to consider. It was mentioned earlier that V_p results obtained with this particular configuration showed a similar trend to the one observed for P-RAT V_s results. This gives greater confidence regarding anisotropic results in the mix.

7.5.4 3D image analysis results

For the analysis of the 3D images, the particles were segmented and then individually labelled, as shown in Figure 7.11. Among all labelled particles, the ones larger than 1mm^3 were selected for analysis according to the Dragonfly analysis, corresponding to 6778, 4698 and 4364 particles in specimen Slab2_2C, Slab2_3C and Slab2_4C respectively. It appears that smaller labelled particles tend to be spherical, and the analysis attribute to them arbitrary values of phi

and theta angle of 0° or 90°. Specimen Slab2_1C was destroyed during a tension compression test and was not scanned.

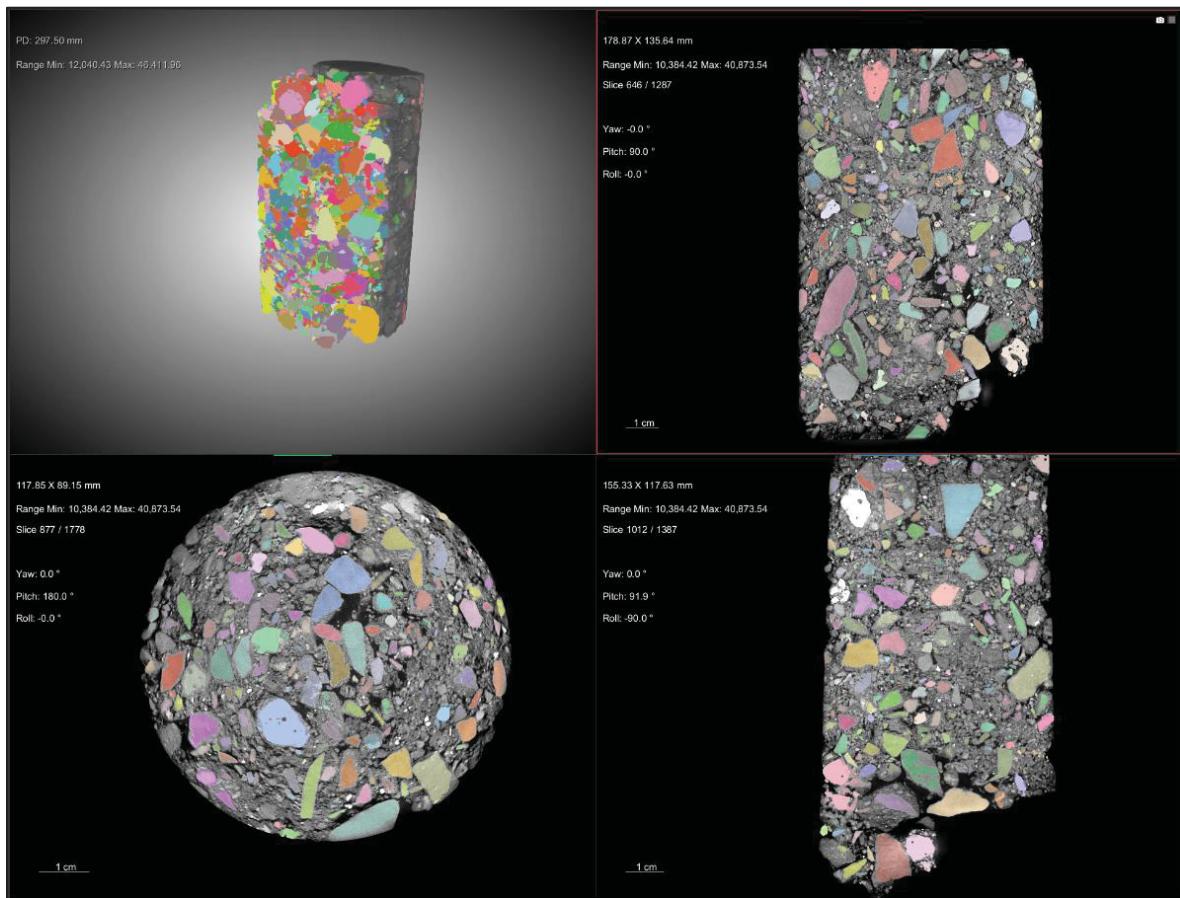


Figure 7.11 Individually labelled particles bigger than 1 mm³, specimen Slab2_3C, ORS Dragonfly

Figures 7.12 A, B and C present the results of the angular orientation analysis for specimens Slab2_2C, Slab_3C and Slab2_4C respectively. The axis systems in Figure 7.12 are the same as that presented in Figure 7.3.

In each specimen, the particles tend to be oriented in the dir.1 dir.2 plane rather than the dir. 3 axis (Phi values) as 48.4, 52.3 and 49.8 % of the aggregates are enclosed in the 60° to 90° range for specimens Slab2_2C, Slab2_3C and Slab2_4C respectively.

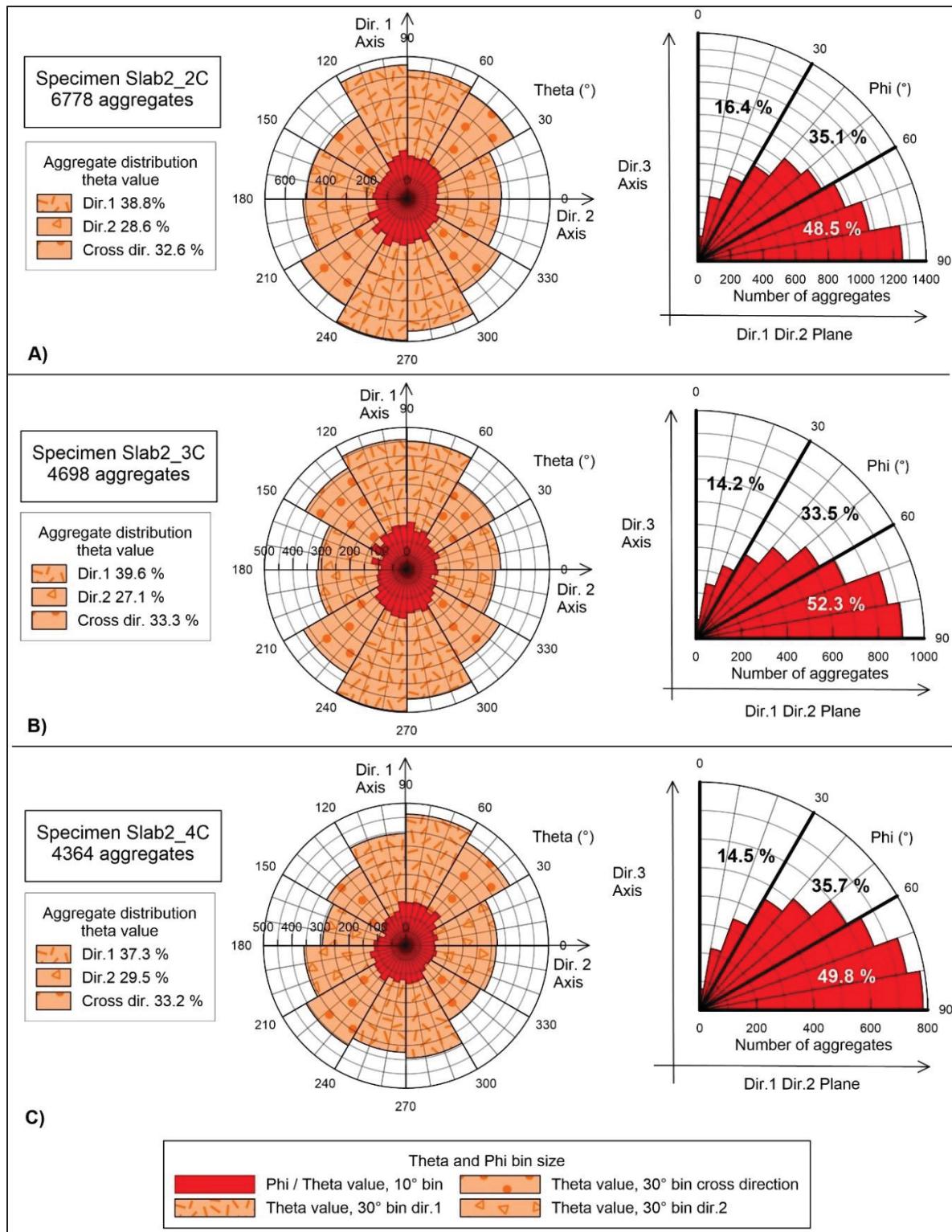


Figure 7.12 Particles orientation in specimen Slab2_2C (A), Slab2_3C (B), and Slab2_4C (C). Phi and Theta values

For the theta analysis, i.e., the orientation in the dir. 1 dir. 2 plan, three sets of data are considered and are represented in Figure 7.12 A, B, and C. The aggregates aligned with dir.1, are enclosed in the bins from 60 to 120° plus 240 to 300° (orange dashes); the aggregates aligned with dir.2 are which are enclosed in the bins from 330 to 30° plus 150 to 210° (orange triangles); the rest is considered as the cross direction (orange dots).

For each specimen, the aggregates tend to be more oriented in dir.1 than in dir.2. As the compactor wheel is moving along dir.1 axis, it is expected that aggregates would be more aligned in this direction. However, a non-negligible part of the aggregates is aligned in the dir.2 axis and in a cross direction of dir.1 and dir.2 axes.

The Phi and Theta angles are bound to the axis system of Dragonfly software. An axis swap enables to evaluate the orientation of aggregates from different perspectives. Figure 7.13 presents the results of Phi and Theta angle analysis in, according to Dragonfly, XZY (Y and Z axis swapped) and YZX configuration. The default configuration (XYZ) is presented in Figure 7.12 B.

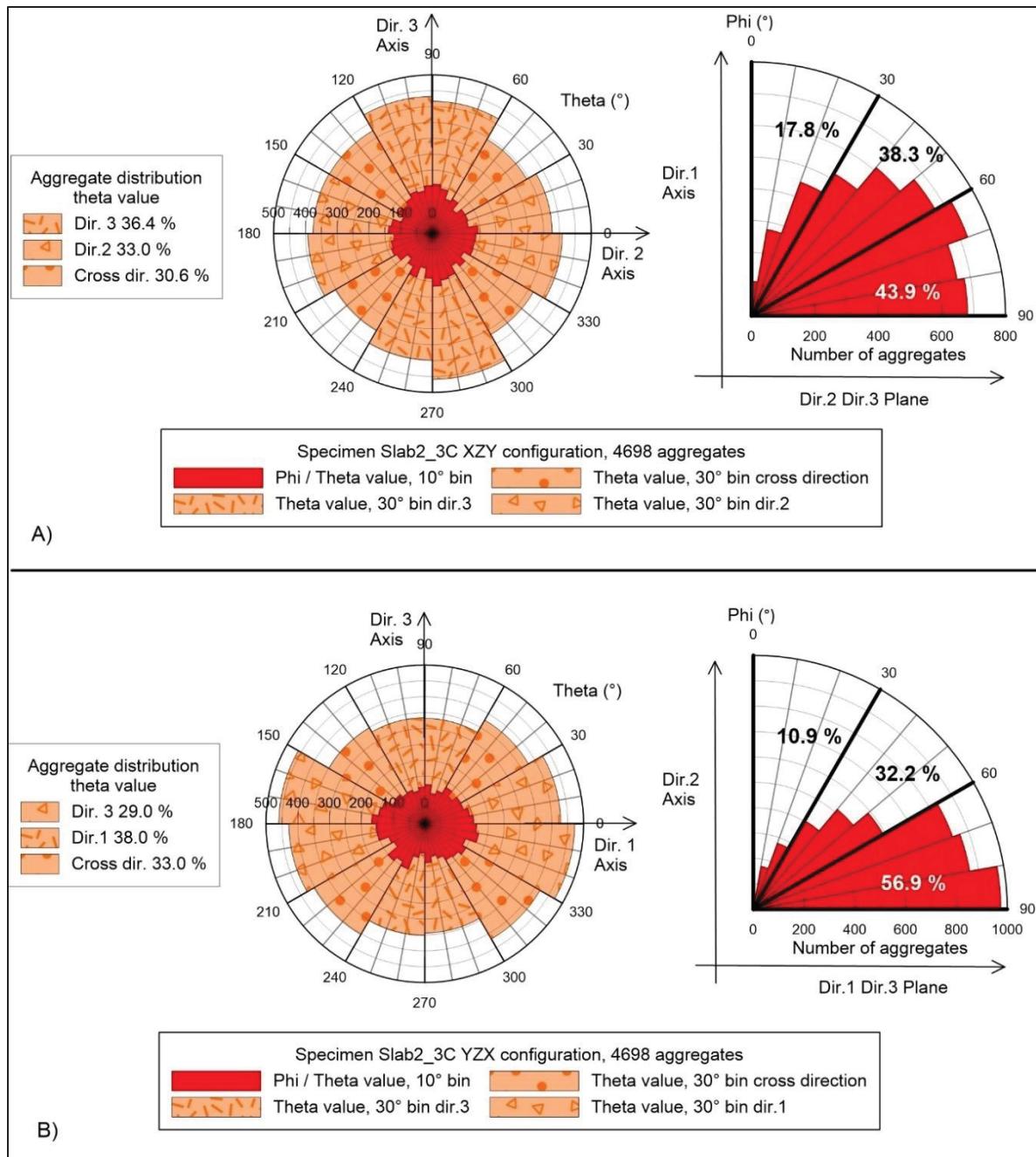


Figure 7.13 Particles orientation in specimens Slab2_3C for 2 configurations; A) XZY, phi calculated regarding dir.1 axis; B) YZX, phi calculated regarding dir.2 axis

In Figure 7.12 B, the particles tend to be oriented in dir.1 dir.2 plane rather than dir.3 (Phi values) and more aligned in dir.1 (Theta values).

In Figure 7.13, view a), the particular orientation is not as straightforward. Considering the Phi values, more aggregates are enclosed in the 30 to 60° area and less in the 60 to 90° area, compared to views a) and c). There is a slight increase in the 0 to 30° area, but not as much as expected if we consider a preferential orientation of the aggregates in dir.1. Regarding the Theta values, there is no particular orientation in dir.2, dir.3, nor in the cross direction.

In Figure 7.13, view b), particles tend to be oriented in dir.1 dir.3 plane rather than dir.2 and more aligned in dir.1.

Displaying 3D orientation in a 2D representation has always been challenging. However, the results indicate that the aggregates in the three tested specimens tend to be aligned in dir.1, which corresponds to the direction of the compacting wheel. However, the different point of views for specimen Slab2_3C confirm that a non negligible portion of the aggregates are aligned in dir.2 and dir.3. This preferential orientation shows that compaction has induced anisotropy in the tested CIR.

In the case of clays, V_s is higher when propagating in the direction of the main axis orientation of particles (Pennington et al., 1997; Nguyen et al., 2011). The same phenomenon can be observed in granular materials such as micas (Santamarina et al., 2001). This is the results of inherent anisotropy. But, clays and micas are characterized by their flat and elongated geometry, which is not the case of the aggregates composing a CIR mix.

In the case of the tested CIR, V_s is higher in dir.2, followed by dir.3, then dir.1. Although the preferential orientation tends to be in dir.1, V_{s1} is the smallest. It can be assumed that compaction induce inherent anisotropy and that induced anisotropy, as defined in the background section, is not relevant in the case of wave propagation where strains are small, although the compaction generates some confinement due to the edges of the mold which then become the inherent (natural) state of the material after unmolding. Wave propagation is, as mentioned earlier, impacted by the orientation of particles, but also by the contacts between them. However, in HMA and CIR mixes, the bitumen mastic plays a role in the stiffness of the material and therefor, the alignment of aggregate alone is not sufficient to fully understand the

differences in the measured V_s in the three directions. Finally, the air voids orientation and distribution could also provide useful information, although it has not been evaluated in this study.

7.6 Conclusion

A nondestructive method using shear wave velocity was used in the study. The P-RAT was used to measure V_s in the 3 directions of a CIR slabs cut in sections. For comparison purposes, UPV measurements were also performed. Cylinders cored from the section in direction 3 were tested by dynamic tension compression test to evaluate the complex modulus. Finally, CT-Scan were done on the cylinders to evaluate the orientation of the aggregates. Anisotropy was witnessed for both approaches.

- V_s measurements with P-RAT show a systematic anisotropy in the two tested slab. Different sizes of P-RAT transducers were used and the variability was low. V_s in the direction of compaction is higher than V_s in the orthogonal direction of displacement of the compacting wheel, which is higher than V_s in the direction of the compacting wheel; $V_{s2} > V_{s3} > V_{s1}$. Differences between V_s values range from 0.6% to 11.6%. V_s values on the outer sections of the slabs tend to be closer to one another compared to the middle section. The difference in wave velocities is explained by the compaction method and the dimensions of the mold, which generate uneven confinement in the mix.
- UPV results with PUNDIT also show anisotropy. UPV V_p values are different in every direction, and the same axial symmetry relative to the middle of the slab was observed as in P-RAT results. V_s values from UPV were trickier to get, as the arrival time of the wave is hard to determine. Various setups of arrival time were then tested. V_s from P-RAT and V_p from UPV results are consistent one with each other.
- E^* results are consistent in the tested specimens, and they were modelized with the 2S2P1D model. Modulus from UPV were plotted in the master curve and the proper arrival time setup were determined to be the first peak for P-wave.

- CT-Scans highlighted a preferential orientation of the aggregate in the direction of the movement of the compacting wheel, dir.1. However, a non-negligible part of the aggregates is oriented in the two other directions.
- Both inherent and induced anisotropy were witnessed. The former with the CT-Scan and the aggregates orientation. The latter with dynamic testing and V_s obtained with P-RAT, backed with V_p obtained through UPV.

This study was focused on a two CIR mixes with a single method of compaction. Future work should focus on determining the influence of the degree of compaction as well as the method of compaction, such as SGC and slab compactor, on the anisotropy of CIR materials. V_s measurements would benefit from the analysis of contacts between aggregates.

Author Contributions: Conceptualization, Q.L., Y.E. and A.C.; methodology, Q.L.; software, Y.E. and M.K.; validation Q.L., Y.E. and A.C. ; formal analysis, Q.L.; investigation, Q.L.; writing—original draft preparation, Q.L.; writing—review and editing, Q.L., Y.E., A.C. and M.K.; visualization, Q.L.; supervision, Y.E. and A.C.; funding acquisition, Y.E. and A.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Mitacs, grant number MITACS: FR25581

Data Availability Statement: The date supporting the findings of this study are available within the article

Acknowledgements: Author would like to acknowledge Professor Vladimir Brailovski for the provision of the XTH-225 and the FF35 CT-Scan devices and Salah Eddine Brika for the assistance in scanning the specimens. Authors would like to acknowledge Géowave inc..

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process: During the preparation of this work the authors used DeepL Write in order to improve language. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

7.7 Supplementary files

Voir Figure-A VI-1 et Tableau-A VI-1.

7.8 Données expérimentales

Section non présente dans l'article original.

Les données expérimentales utilisées dans le Chapitre 7 sont présentées aux Appendices G et H. Des données supplémentaires concernant la section 7.5.3 sont présentées aux Figure-A VI-2, VI-3 et VI-4.

CHAPITRE 8

ANALYSE GÉNÉRALE

8.1 Introduction

Les articles présentés dans les chapitres précédents mettent en avant les résultats des travaux de recherche sur l'utilisation de V_s afin de caractériser les ERF en très jeune âge d'une part, et d'évaluer le caractère anisotrope des ERF d'autre part. Des hypothèses ont été posées quant aux liens entre les paramètres étudiés et leurs influences, des conclusions ont été formulées lorsque les résultats étaient suffisants et finalement, des recommandations ont été proposées afin de poursuivre et approfondir les travaux.

Les travaux de recherches présentés font partie d'un projet global. En effet, les articles ont exploré la caractérisation des ERF au moyen de V_s , mais ils ont également permis de tester les limites du P-RAT et donc d'étendre le spectre de son usage. Le présent chapitre vise à approfondir l'analyse des résultats en considérant tous les travaux, le cas échéant.

8.2 La caractérisation des ERF au moyen de V_s

Le caractère évolutif des ERF ne permet pas l'utilisation des méthodes d'essais classiques lorsqu'il s'agit du jeune âge, c'est-à-dire juste après le compactage. En effet, comme présenté à la section 1.3, ces méthodes pour la plupart destructives ne sont pas adaptées à la caractérisation des ERF en très jeune âge. L'utilisation du paramètre V_s au moyen du P-RAT, technique basée sur l'analyse fréquentielle des ondes de cisaillement, a été proposée.

8.2.1 Évolution de V_s

Les résultats présentés aux Figures 3.6 A, 3.7 A, 3.9 B, 3.9 C, 5.9, 5.10 et 5.11 montrent que les valeurs de V_s évoluent rapidement avec le temps de cure en très jeune âge, juste après le compactage, pour se stabiliser par la suite et atteindre une valeur asymptotique. Ce constat est

fait pour des spécimens de formats différents, de compositions différentes et de teneur en vide différentes, dans le cas des cylindres. Le Tableau 8.1 regroupe les valeurs initiales et finales de V_s pour chaque spécimen dont l'évolution a été surveillée. De plus, les délais relatifs à la première mesure de V_s ainsi que la durée totale de cure sont affichés.

Tableau 8.1 Valeurs initiales et finales de l'évolution de V_s en relation avec le temps de première mesure et la durée de la cure

Spécimen	V_s initiale, $m.s^{-1}$	V_s finale, $m.s^{-1}$	Délai entre fin de compactage et première mesure, minute	Durée de la cure, jour
Plaque 1	253	370	90	17
Plaque 2	262	368	90	37
C-12	330	578	10	30
C-15	308	502	12	30
C-17	287	456	10	30

L'évolution de V_s dans les ERF peut être modélisée avec le modèle Michaelis-Menten comme présenté dans les Figures 4.1 A, 4.2 A, 5.12 et 5.13. Celui-ci a été modifié comme indiqué à la section 2.6.3 afin de prendre en compte le délai entre la fin du compactage et les premières mesures de V_s . Les paramètres relatifs aux modèles MM appliqués sur les spécimens sont rassemblés dans le Tableau 8.2.

Tableau 8.2 Paramètres du modèle MM associés à l'évolution de V_s
dans les spécimens testés

Spécimen	Couple de transducteurs	A (m.s^{-1})	B (m.s^{-1})	C (jour)	R^2
Plaque 1	22-16 mm	246,8	121,6	0,37	0,95
	38-34 mm	247,7	115,5	0,49	0,99
	51-45 mm	215,2	152,3	0,27	0,99
Plaque 1	Moyenne	256,7	111,7	0,47	0,97
Plaque 2	38-34 mm	262,1	116,3	0,55	0,97
	51-45 mm	261,1	105,8	0,56	0,98
Plaque 2	Moyenne	273,8	101,9	0,67	0,97
C-12 Moyenne	19-16 mm	331,1	231,5	0,254	0,98
	26-22 mm A				
	36-31 mm				
C-15 Moyenne	19-16 mm	299,5	197,3	0,233	0,98
	26-22 mm A				
	26-22 mm B				
	36-31 mm				
C-17 Moyenne	19-16 mm	295,6	156,6	0,415	0,98
	26-22 mm A				
	36-31 mm				
Control-17_3 Moyenne	19-16 mm	278,1	163,4	0,18	0,98
	26-22 mm A				
	36-31 mm				

Le modèle MM paraît être un bon outil pour modéliser l'évolution de V_s comme le démontrent les valeurs du coefficient de corrélation, R^2 , proche de 1. Le modèle permet de quantifier la rapidité de l'évolution de V_s avec le paramètre C. En effet, ce paramètre indique le temps nécessaire pour atteindre la moitié de la valeur maximale de V_s . Ainsi, une valeur de C plus faible indique une montée en rigidité plus rapide. Cependant, comme le montrent les Figures

4.1 A, 4.2 A, 5.12 et 5.13 le modèle MM décrit une tendance générale de l'évolution de V_s et tend à sous-estimer les valeurs finales. De plus, le phénomène de plateau mis en évidence lors des premières heures de cure dans les cylindres C-12, C-15 et C-17 (section 5.5.2) ne peut pas être représenté avec le modèle MM.

Dans la littérature, le modèle MM a été utilisé pour modéliser l'évolution de l'ITS et de l'ITSM en fonction du temps de cure dans des spécimens d'ERF en laboratoire (Graziani et al., 2017; Graziani et al., 2018; Raschia et al., 2020) et sur le terrain (Ferroti, Grilli, Mignini et Graziani, 2020). L'ITS et l'ITSM sont des paramètres mécaniques couramment utilisés pour caractériser les EBC et les ERF. Ainsi, les évolutions de l'ITS, de l'ITSM et de V_s dans des ERF suivent les mêmes tendances. Cela conforte l'utilisation de V_s afin de caractériser les ERF. Des différences apparaissent tout de même, en raison des mélanges étudiés et des conditions de cure.

Finalement, les enseignements des essais présentés au Chapitre 3 ont permis d'apporter des modifications afin de faire passer la première mesure de V_s de 90 minutes à 10 minutes après le compactage. Dans un cas comme dans l'autre, une mesure aussi tôt est impossible dans le cas de l'ITS et de l'ITSM, comme évoqué à la section 1.3. Le constat est le même pour les autres techniques de caractérisation présentées à la section 1.3, avec une exception pour l'essai triaxial qui est réalisable, mais nécessite une durée d'essai trop importante pour quantifier l'évolution du matériau en très jeune âge. De plus, la prise de mesure plus tôt et en quantité plus importante en jeune âge permet de mettre en évidence la présence d'un plateau dans l'évolution de V_s , comme le montrent les Figures 5.9 à 5.11.

Il apparaît dans le présent doctorat et dans les données issues de la littérature que l'évolution de V_s au sein des spécimens (et plus généralement l'évolution du paramètre mécanique utilisé) concorde avec la disparition de l'eau dans le spécimen. Cela coïncide avec les informations disponibles dans la littérature (voir section 1.4).

8.2.2 Eau et cure

La présence d'eau dans les ERF est obligatoire, comme présenté à la section 1.4. L'évolution de la quantité d'eau dans les spécimens testés a donc été mesurée. Il apparaît que la perte d'eau évolue rapidement en jeune âge, puis se stabilise à mesure que la cure avance, comme présenté dans les Figures 3.4, 3.9 A, 5.5 et 5.6. Comme évoqué à la section précédente, l'évolution de V_s concorde avec l'évolution de la perte d'eau. Tout comme V_s , la perte d'eau a été modélisée avec le modèle MM. Le Tableau 8.3 présente les paramètres des modèles MM appliqués aux pertes d'eau.

Tableau 8.3 Paramètres du modèle MM associés à l'évolution de la perte d'eau dans les spécimens testés

Spécimen	A (g)	B (g)	C (jour)	R ²
Plaque 1	-50,9	554,1	0,60	0,99
Plaque 2	-28,7	654,6	0,95	0,99
C-12	0,7	36,4	0,43	0,99
C-15	0,9	30,1	0,25	0,98
C-17	1,2	32,8	0,67	0,98
C-17 (8 jours)	0,1	29,4	0,41	0,99
Control17_1	3,0	46,0	0,11	0,95
Control17_2	2,5	50,6	0,11	0,96
Control17_3	-1,1	47,6	0,13	0,98

Similaire à l'évolution de V_s , le modèle MM est adapté pour modéliser l'évolution de la perte d'eau. Globalement, les éléments mis en avant dans la section précédente sont transposables pour l'évolution de la perte d'eau, à savoir :

- Coefficient de corrélation proche de 1
- Tendance à sous-estimer les valeurs en fin de cure
- Similitudes observées dans la littérature (Graziani et al., 2017; Graziani et al., 2018; Ferroti et al., 2020; Raschia et al., 2020).

De plus, un lien intéressant entre l'évolution de la température de surface et l'évolution de la perte d'eau est mis en avant à la section 5.5.1. Les propriétés géométriques des spécimens testés ainsi que les conditions de cure (à l'air libre ou bien dans une étuve) semblent également avoir de l'influence sur la disparition de l'eau et donc sur l'évolution de V_s (Tableau 5.3).

8.2.3 Lien entre V_s et l'eau

L'évolution de V_s en fonction de la perte d'eau est présentée aux Figures 3.6 B et 3.7 B pour les spécimens plaque 1 et 2 respectivement. Dans la section 3.5.2., la relation entre V_s et la perte d'eau sur toute la durée de la cure est considérée comme linéaire avec une divergence pour les premiers points (mesures en très jeune âge). Ces deux paramètres étant modélisés par un modèle MM, l'évolution de l'un en fonction de l'autre est aussi modélisable par un MM. Or, avec les modélisations MM réalisées à la section 4.2, il apparaît que les coefficients C de l'évolution de V_s et de la perte d'eau sont différents pour chaque plaque (voir Tableaux 8.2 et 8.3). Ainsi, V_s en fonction de la perte d'eau ne devrait pas être linéaire, car c'est le cas seulement si les paramètres C sont égaux ou extrêmement proches (voir Annexe V). Les Figures 4.4 et 4.5 présentent cette modélisation.

L'évolution de V_s en fonction de la perte d'eau dans les spécimens cylindriques C-17, C-15 et C-12 est présentée à la Figure 5.15. Cette évolution est modélisable par un MM, comme attendu. À la vue des résultats présentés au Chapitre 5, l'hypothèse évoquée au Chapitre 4 concernant la nécessité d'avoir plus de points de mesure en très jeune âge pour une meilleure modélisation a été vérifiée.

Là encore, le modèle MM ne prend pas en compte les microphénomènes tels que les plateaux observés aux Figures 5.9 à 5.11. Ainsi l'utilisation du MM pour décrire la relation entre V_s et la disparition de l'eau correspond à l'aspect global de la cure. La concavité des courbes de V_s en fonction de la perte d'eau indique que le paramètre V_s évolue plus rapidement que la disparition de l'eau dans les spécimens. Il y a donc création de liens bitumineux entre les granulats et une montée en rigidité subséquente malgré la présence d'eau. Au fur et à mesure

que l'eau disparait, la rigidité évolue. Une valeur du paramètre C (en grammes, et donc à relativiser vis-à-vis de la masse totale du spécimen) plus faible induira une montée plus rapide de V_s . Au contraire, plus C devient grand, plus la relation entre V_s et la perte d'eau tendra vers une relation linéaire.

La présence et la disparition de l'eau influencent aussi la montée en rigidité du matériau. Celle-ci est impactée par les paramètres de la cure avec notamment la température et la géométrie des spécimens, comme expliqué au Chapitre 5. Les hypothèses ont été formulées à la section 5.5.2.

8.2.4 Pertinence du modèle Michaelis-Menten

Bien que présentant des limites, le modèle MM est utilisé avec succès pour modéliser les paramètres à l'étude dans la caractérisation des ERF, comme rappelé dans les sections 8.2.1 à 8.2.3. Les paramètres du modèle obtenus (A, B et C, dans le cas de ce doctorat) permettent de comparer les évolutions des grandeurs mesurées les unes aux autres et donc de quantifier l'impact d'une cure différente, par exemple. Le paramètre C permet, dans le cas de l'évolution de V_s en fonction du temps, de savoir en combien de temps V_s atteindra une valeur visée. Si on pose $\%_{V_s}$, le pourcentage de la valeur maximale de V_s à atteindre (de 0 à 100 %) on a :

$$\text{temps\%} = \frac{C * \frac{\%_{V_s}}{100}}{1 - \frac{\%_{V_s}}{100}} \quad (8.1)$$

Avec temps% la durée nécessaire pour atteindre la valeur de V_s visée, unité homogène à C.

Ainsi, en connaissant les conditions de cure d'une chaussée réhabilitée au moyen d'un ERF de type 1, il est possible de réaliser des mesures de V_s en laboratoire et ainsi de déterminer les paramètres du modèle MM. Si on définit un critère de réouverture de la route à $V_s = X\%$ de V_s max, on peut déterminer le temps nécessaire à la réouverture grâce à l'équation 8.1. Ainsi, la

réouverture de la chaussée serait basée sur une valeur de rigidité et non sur une valeur temporelle arbitraire.

8.2.5 Retour sur la notion de jeune âge

Comme expliqué à la section 2.1, la notion de très jeune âge utilisée dans ce doctorat couvre les premières minutes de cure du spécimen, et le jeune âge les premières heures de cure. Cependant, définir un critère temporel fixe n'est pas cohérent avec certains éléments qui apparaissent dans la littérature et dans les travaux réalisés dans ce doctorat. En effet, les conditions de la cure influencent celle-ci et donc l'évolution de la rigidité, par exemple. Ainsi, il est probable que sous différentes conditions de cure, une temporalité fixe ne décrit pas les mêmes phénomènes.

Il a été montré que le paramètre C du modèle MM est influencé par les conditions de cure. En se basant sur ce qui est proposé à la section 8.2.4, il serait envisageable de lier les différentes phases de la cure des ERF à l'évolution des grandeurs mesurables (V_s et perte d'eau), notamment en utilisant le paramètre C. De plus, le taux d'évolution des paramètres peut être obtenu en dérivant l'équation du modèle MM, apportant une grandeur supplémentaire par rapport à laquelle se baser. Pour un modèle MM modifié (voir section 2.6.3), la dérivée est :

$$y'(t) = \frac{BC}{(C + t)^2} \quad (8.2)$$

Avec $y(t)$ le paramètre modélisé en fonction du temps, B une constante homogène à $y(t)$ et C la constante de Michaelis homogène à t.

À $t = 0$, la valeur de ce taux est maximale :

$$y'(0) = \frac{B}{C} = y'_{max} = taux_{max} \quad (8.3)$$

Soit $\%_{taux}$, le pourcentage de la valeur maximale du taux ($taux_{max}$) à atteindre (de 0 à 100 %) on a :

$$temps_{\%taux} = C \left(\sqrt{\frac{100}{\%_{taux}}} - 1 \right) \quad (8.4)$$

Avec $temps_{\%taux}$ le temps nécessaire pour atteindre la valeur de $taux_{max}$ visée, unité homogène à C.

Par exemple, si on définit le très jeune âge comme étant la période où le taux d'évolution de V_s est supérieur à 50 % du $taux_{max}$, alors le jeune âge correspondrait à un temps de cure de 0,41C, soit 2,5 heures pour le spécimen C-12 ($C = 0.25$). Dans le cas où la cure serait plus lente ($C=1$), le très jeune âge correspondrait à un temps de cure de 10 heures.

La figure 8.1 présente plusieurs exemples d'évolution de V_s normalisée et du taux d'évolution de V_s normalisé pour des valeurs de C différentes et dans deux configurations de paramètre A et B. Du fait de la normalisation des valeurs, les paramètres A et B n'ont aucune influence sur l'évolution des grandeurs.

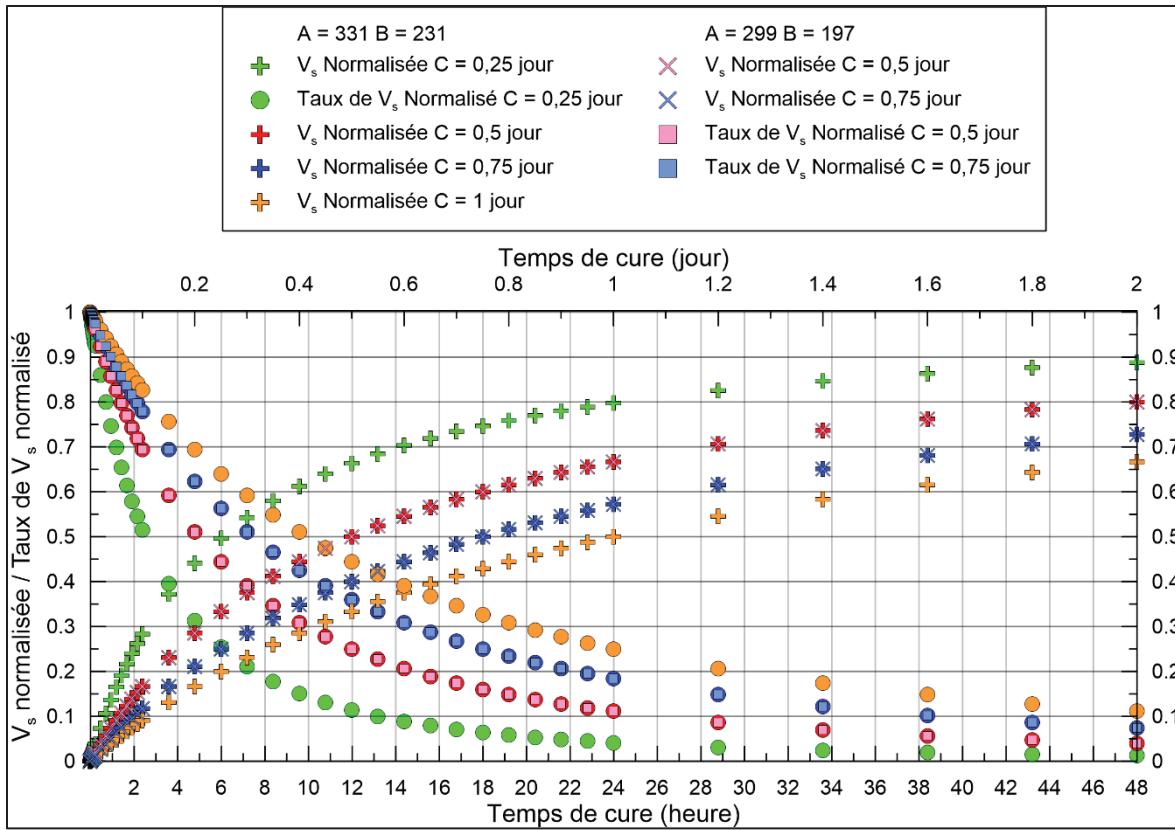


Figure 8.1 Évolution de V_s et du taux d'évolution de V_s en fonction du paramètre C

8.2.6 Réflexion sur les valeurs obtenues et lien avec la littérature

Les valeurs de V_s mesurées pour les différents spécimens couvrent des mélanges obtenus avec des moyens de compactage différents et présentant des propriétés volumétriques différentes. Les trois GBR utilisés possèdent des caractéristiques similaires (densité maximale et bitume résiduel) et seul change la granulométrie et les proportions du mélange. La Figure 8.2 présente les valeurs de V_s mesurées dans le sens vertical (dir. 2) pour chaque spécimen caractérisé en lien avec la teneur en vide. Les valeurs de V_s pour les plaques 1 et 2 sont calculées en prenant en considérant une épaisseur de mastic de 4 mm et une valeur de V_s de 300 m.s^{-1} pour le mastic (voir section 6.3). Les parties inférieures et supérieures de la Figure présentent les valeurs de V_s avant et après la cure, respectivement.

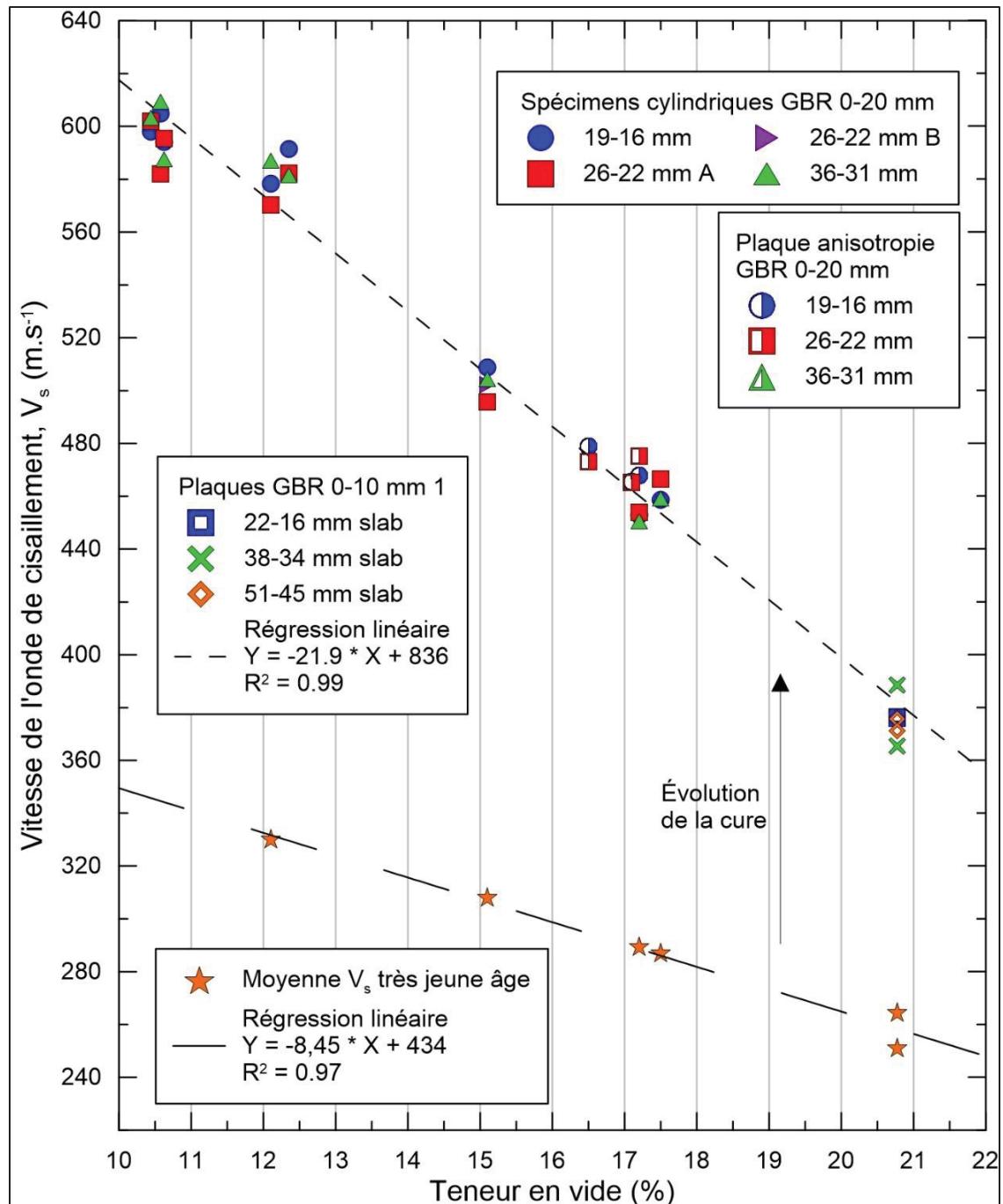


Figure 8.2 Valeurs moyennes de V_s pour les différents couples de transducteurs en fonction de la teneur en vide du spécimen testé, avant et après la cure.
Les mesures de V_s pour la plaque anisotropie correspondent à V_s dir. 2

Comme observé à la section 5.5.2 (Figure 5.14), la valeur de V_s diminue avec l'augmentation de la teneur en vide et les valeurs de V_s des essais réalisés aux Chapitres 3 (article 1) et 7

(article 3) s'intègrent bien à la tendance linéaire. De plus, si on regarde les valeurs de module équivalent calculées avec V_s des plaques 1 et 2 (20,7 % de vide), on obtient environ 800 MPa pour une température de 22 °C. Or, Oroza et al. (2022a) ont obtenus pour un ERF à 21,6 % de vide (GBR 0-10 mm, mix 100 % RAP, 2 % bitume, 1,92 % d'eau) des valeurs d'ITSM de 843 MPa pour une température de 20 °C (avec un écart type de 17 %). Le mélange est différent, mais l'ordre de grandeur est respecté.

Un lien similaire entre la valeur de module obtenue via V_s pour le spécimen C-12 et un spécimen de composition et de compacité semblables (Oroza et al., 2022a) a été établi à la section 5.5.2. De plus, une tendance linéaire entre les valeurs d'ITS et la teneur en vide est également observée dans les travaux de Oroza et al. (2022a).

La partie inférieure de la Figure 8.2 présente les premières valeurs de V_s mesurées dans les spécimens testés, c'est-à-dire après le compactage. Cela correspond à 15 minutes pour les spécimens cylindriques et 1,5 heure pour les plaques. La cure étant plus rapide dans les cylindres que dans les plaques, cela semble cohérent de les traiter de façon similaire.

Une tendance linéaire est observée et les valeurs de V_s pour les plaques s'y intègrent bien. La pente est plus faible (en valeur absolue) pour le jeune âge que pour les spécimens après la cure. Bien que la rupture de l'émulsion et donc la création des premiers liens bitumineux débutent dès l'insertion de l'émulsion bitumineuse dans le mélange, celle-ci n'est pas encore optimale, en raison de la présence de l'eau. Mais des liens bitumineux sont tout de même créés, comme rappelé à la section 8.2.3. Ainsi, on peut estimer que l'influence de la compacité est représentée par la droite inférieure et la création des liens bitumineux par celle supérieure. Lorsque la compacité est plus grande, les liens bitumineux sont plus efficaces et plus nombreux en raison de la meilleure proximité des granulats, expliquant la pente de la courbe supérieure.

8.3 Choix du transducteur et reproductibilité de la mesure

Dans les travaux présentés aux Chapitres 3, 5 et 7, plusieurs couples de transducteurs sont utilisés. La variation principale réside dans la taille de l'anneau piézoélectrique.

Initialement, dans les articles utilisant le P-RAT dans les argiles, une seule taille de transducteur était utilisée (Ethier, 2009; Karray et al., 2015; Elbeggo et al., 2019). Afin d'adapter le P-RAT pour tester les ERF, il a été choisi d'utiliser des transducteurs de taille différente afin de pallier une potentielle influence de la taille des granulats sur les résultats de V_s . L'écart type entre les valeurs de V_s pour les différents couples de transducteurs utilisés dans les Chapitres 3 et 5 est présenté dans le Tableau 8.4. Le Tableau 8.5 présente la même chose pour les sections des plaques 1 et 2 du Chapitre 7.

Tableau 8.4 Écart type entre les valeurs moyennes de V_s pour les différents couples de transducteur utilisés dans les spécimens d'ERF testés.

Spécimen (nombre de mesures)	Écart type min	Écart type max	Écart type moyen
Plaque 1 (23)	0,23 %	3,29 %	1,50 %
Plaque 2 (17)	0,20 %	3,59 %	1,54 %
C-12 (36)	0,13 %	5,77 %	2,10 %
C-15 (42)	0,00 %	3,49 %	1,83 %
C-17 (28)	0,66 %	4,70 %	2,27 %
Contrôle10_1			0,72 %
Contrôle10_2			0,46 %
Contrôle10_3			2,45 %
Contrôle12			0,95 %
Contrôle17_3			0,40 %

Tableau 8.5 Écart type relatif entre les valeurs moyennes de V_s pour les différents couples de transducteur utilisés dans les sections des plaques 1 et 2 du Chapitre 7

Section	Écart type relative, σ%		
	Direction 1	Direction 2	Direction 3
Plaque1_2	1,79 %		n.a.
Plaque1_2 mastic	1,44 %		1,69 %
Plaque1_5	2,15 %		1,17 %
Plaque1_5 mastic	3,06 %		0,64 %
Plaque1_6	1,95 %		1,38 %
Plaque1_7	2,87 %		1,65 %
Plaque1_7 mastic	2,47 %		1,67 %
Plaque1_8	n.a.		1,15 %
Plaque1_9	2,50 %		0,89 %
Plaque1_10	2,40 %		1,46 %
Plaque2_1	0,98 %	0,91 %	0,91 %
Plaque2_2	1,29 %	1,11 %	0,53 %
Plaque2_3	0,60 %	0,85 %	1,84 %
Plaque2_3 mastic	0,66 %	0,55 %	0,84 %
Plaque2_4	0,89 %	0,07 %	1,01 %

Des différences dans les valeurs de V_s existent, comme le montrent les écarts types présentés aux Tableaux 8.4 et 8.5. Comme indiqué à la section 1.6.4, Naji et al. (2018) ont mis en évidence que la taille des granulats peut influencer les valeurs de V_s . En effet, lorsque la longueur d'onde du transducteur utilisé est plus petite que la taille du granulat, une diffraction de l'onde peut apparaître. Il en résulte une variation de la valeur de V_s . Cependant, une modification de la taille des granulats pourrait aussi influencer la rigidité du mélange, et ainsi augmenter V_s . On peut supposer que l'utilisation d'une seule taille de transducteur, suffisamment grande par exemple le 36-31 mm suffirait afin de caractériser les ERF au moyen du P-RAT.

Comme le montrent les Figures 3.6, 3.7, 5.9, 5.10, 5.11, 7.6 et 7.7 ainsi que les valeurs présentées aux Tableaux 8.4 et 8.5, certaines valeurs de V_s pour un couple de transducteurs spécifique sont écartées des autres. Cependant, dans la mesure suivante, il se peut qu'un autre couple de transducteurs se distingue des autres (Figures 3.6, 3.7, 5.9, 5.10 et 5.11). Il est supposé que les surfaces sur lesquelles les transducteurs sont placés s'abiment à force de remplacer les transducteurs. Il en résulte une surface différente à chaque essai qui peut donc influencer les valeurs de V_s . De plus, les ERFs n'étant pas homogènes, des transducteurs de taille différente, bien que placés au même endroit, ne reposent pas exactement sur le même matériau.

Il apparaît donc que l'utilisation de plusieurs tailles de transducteur est bénéfique. En effet, plusieurs transducteurs permettent une répétabilité de la mesure de V_s et donc une meilleure fiabilité des valeurs de V_s obtenues. Finalement, lors de l'analyse, l'interprétation des signaux issus d'un couple de transducteurs peut permettre une meilleure analyse de ceux venant d'un autre couple, notamment si la qualité du signal n'est pas optimale, pour une raison quelconque.

Enfin, la différence entre les valeurs de V_s mesurées avec un même couple de transducteurs (tableau 5.4) montre une variabilité de l'ordre de 2 %. L'émission et la réception de signaux de forme et de fréquence différentes donnent donc les mêmes résultats, prouvant la robustesse de la mesure P-RAT.

8.4 Utilisation du CT-Scan

Des résultats obtenus via le CT-Scan sont utilisés dans le deuxième article, présenté au Chapitre 5 (Alvarez et al., 2012; Alvarez-Lugo et al., 2014) et dans la revue de la littérature (Goa et al., 2015) concernant la taille et la répartition des pores dans des ERF. Jian et al. (2023) ont utilisé le CT-Scan pour évaluer la migration de l'eau dans des ERF.

Une des hypothèses avancées pour expliquer la présence d'un plateau dans l'évolution de V_s en fonction du temps de cure (voir Figure 5.9 à 5.11 de la section 5.5.2), est en lien avec la tension superficielle au sein du mélange, et donc de la présence ou non d'eau ainsi que de la

taille des pores saturés ou non. L'usage du CT-Scan apporterait des informations utiles, notamment de savoir si la compacité influence la taille des pores de vide et donc la tension superficielle qui en découlerait. Cependant, la réalisation d'un balayage suffisamment précis nécessite plus de temps (de 1 à 3 heures). Or, les phénomènes observés se déroulent dans un laps de temps de quelques heures.

Les essais CT-Scan réalisés sur les spécimens au Chapitre 7 ont permis de quantifier l'orientation des granulats dans ceux-ci. Deux méthodes de segmentation ont été utilisées, comme présenté à la section 2.8.4. La méthode par apprentissage automatique (*deep learning*) requiert plus de temps de mise en place, mais lorsque le modèle est robuste, la segmentation est plus rapide, car automatisée. Ainsi, si de nombreux spécimens sont balayés dans des conditions identiques, cela permet une comparaison fiable des données obtenues.

Comme mentionné plus haut, le CT-Scan permet de segmenter les vides dans les spécimens. La Figure 8.3 présente les résultats de l'évolution de la teneur en vide dans les 3 directions pour les spécimens Slab2_2 à 4. La Figure 8.4 présente la plaque Slab2 après démoulage. L'évolution de la teneur en vide dans la direction 3 (Figure 8.3 A) est cohérente dans les trois sections testées. La ségrégation de granulats visible dans la Figure 8.4 est mise en avant dans la Figure 8.3 A par le fait que la teneur en vide est plus élevée vers l'arrière qu'à l'avant de la plaque Slab2. Dans la direction 2 (Figure 8.3 B), la teneur en vide semble augmenter du sommet vers le fond. Dans la direction 1, la teneur en vide reste constante, si la partie gauche de la section Slab2_2 n'est pas prise en compte. Enfin, la ségrégation observée sur les bords de la plaque Slab2 (Figure 8.4) est visible dans la Figure 8.3.

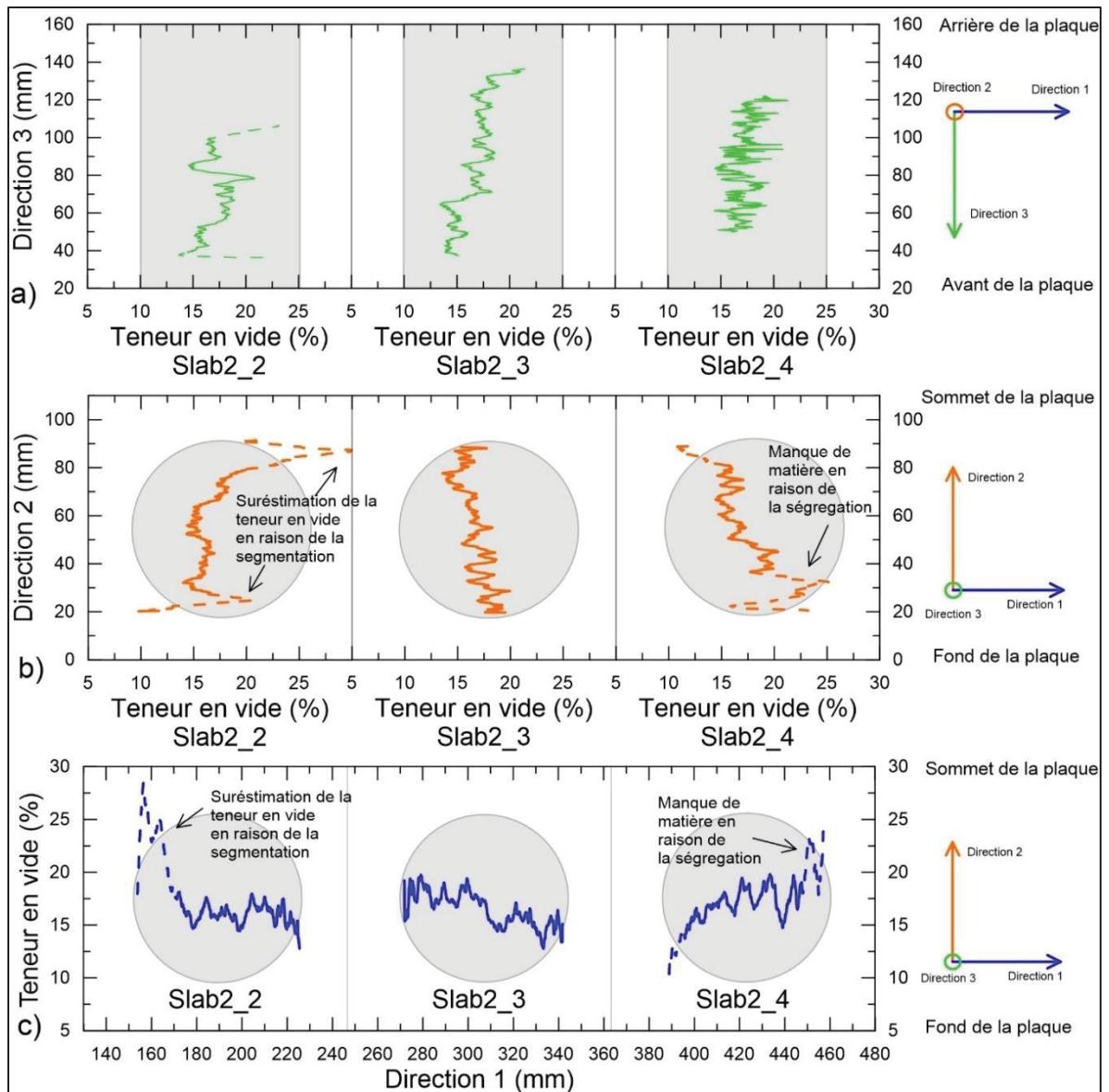


Figure 8.3 Teneur en vide dans les 3 directions dans les spécimens de Slab2; a) selon l'axe de la direction 3, 20 mm représente la partie avant de la plaque; b) selon la direction 2, 0 mm représente le fond de la plaque; c) selon la direction 1. Les formes grises représentent les cylindres balayés

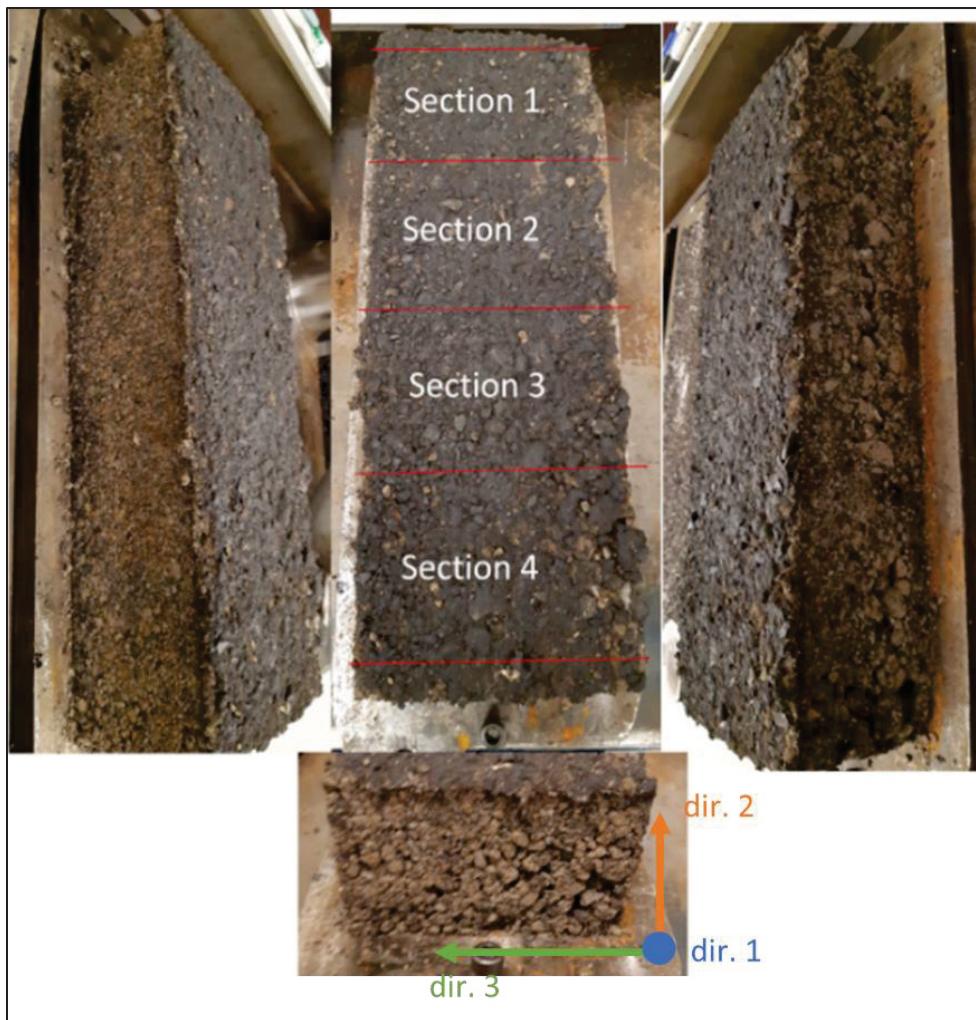


Figure 8.4 Plaque Slab2 (Chapitre 7) après démoulage; de gauche à droite : Avant, Sommet, Arrière et Vue de côté de la plaque

Enfin, lors de la segmentation des granulats et des vides, des erreurs peuvent se produire, comme mentionné aux sections 2.8.4 et 7.4.5, principalement en raison de la résolution spatiale et du contraste des voxels. Par conséquent, la teneur en vide calculée et affichée dans la Figure 8.3 peut différer en fonction de la méthode de filtrage utilisée. En outre, des rotations ont été appliquées aux ensembles de données des échantillons Slab2_2C et Slab2_4C pour ajuster l'orientation des axes, car les axes dir.1 et dir.2 n'étaient pas alignés sur les axes X et Y dans le logiciel Dragonfly. Lors d'une rotation, certains voxels sont approximés, ce qui peut influencer la distribution graphique de la teneur en vide.

Dans la section Slab2_2, directions 1 et 2 (Figure 8.3 B et C), on observe une surestimation des vides dans la reconstruction 3D, qui peut être attribuée à une inhomogénéité de l'échelle d'intensité des gris à travers l'échantillon. La Figure 8.5 illustre ce problème : non seulement les voxels sombres sont segmentés comme des vides, mais aussi des parties du mastic bitumineux (gris bleuté sur l'image). L'image apparaît floue en raison du filtre gaussien utilisé pour améliorer la segmentation, comme expliqué dans les sections 2.8.4 et 7.4.5.

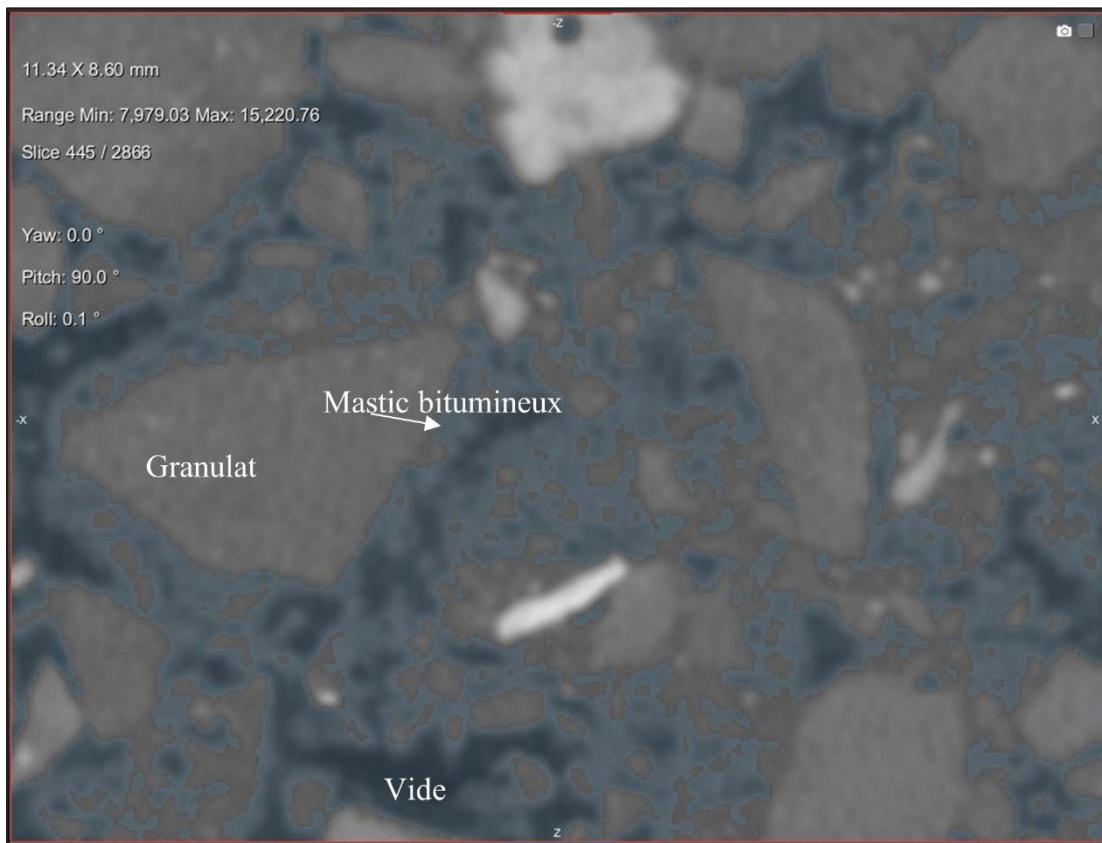


Figure 8.5 Surestimation des voxels de vide dans le spécimen Slab2_2C, dir.1.
Les parties bleutées sont les particules considérées comme du vide

L'usage du CT-Scan est d'intérêt dans l'étude des ERF, notamment à jeune âge. Cependant, il faudrait adapter la cure et le conditionnement des spécimens testés pour que le balayage soit représentatif d'un instant donné de la cure du spécimen., i.e. que les caractéristiques du spécimen n'évoluent pas ou très peu pendant la durée du balayage.

8.5 **V_s et P-RAT pour caractériser les ERF**

Le P-RAT, en tant que technique non destructive, permet de réaliser des mesures de V_s sur un même spécimen dans des configurations temporelles et spatiales différentes. Cette continuité dans la prise de mesure permet de considérablement réduire le nombre de spécimens utilisés.

La mise en place des transducteurs est rapide et permet donc de débuter les mesures 10-15 minutes après le compactage d'un spécimen d'ERF, avec la préparation adéquate. La prise de mesure est également rapide. Ces mesures permettent d'obtenir V_s à très jeune âge et donc d'accéder à des informations inédites quant au comportement des ERF à cet âge. Les valeurs de V_s peuvent être converties en modules qui sont comparés à des modules obtenus via d'autres méthodes d'essai. La section 8.2.6 montre que les valeurs de V_s obtenues sont cohérentes avec ce qui apparaît dans la littérature. L'interprétation des résultats dépend cependant de la qualité des signaux reçus et peut prendre du temps.

Autre méthode basée sur les ondes, l'UPV est utilisée dans le cadre de cette étude à des fins de comparaison. Comme décrit à la section 1.5.2, cette méthode temporelle est rapide et facile à utiliser. Cependant, les résultats de la section 7.5.2 montrent que l'identification de l'onde de cisaillement est compliquée et approximative (voir Figure 7.9). Les valeurs présentées au Tableau-A VI-1 de l'Annexe VI (données supplémentaires de l'article présenté au Chapitre 7) montrent un écart-type élevé entre les valeurs de V_s obtenus avec l'UPV pour un même spécimen dans une même direction. La Figure-A VI-1 présente les résultats de V_s obtenus par UPV et démontre la difficulté à discerner une quelconque différence entre les valeurs de V_s dans les trois directions à l'étude.

De plus, la comparaison entre les résultats de module complexe et les modules équivalents obtenus via V_p montre que l'onde P arriverait au premier pic et non à la première variation de l'onde, qui est couramment utilisée (voir section 7.5.3 et Figure 7.10). Les valeurs obtenues avec l'UPV en onde P ont cependant confirmé le comportement anisotrope des sections de

plaques testées. On note néanmoins que la configuration d'arrivée d'onde choisie influence la hiérarchisation des directions de mesure.

Ainsi, comme évoqué à la section 1.5.2, l'UPV permet d'obtenir une première approche des vitesses des ondes P, et d'ondes S lorsqu'elles sont identifiables. Des comparaisons entre ces vitesses permettent de faire ressortir des phénomènes tels que l'anisotropie.

CONCLUSION

Les ERF présentent un intérêt considérable dans le domaine de la construction routière, aussi bien pour les gains économiques que ces matériaux peuvent apporter, que sur le plan écologique. Malgré ces avantages considérables, ces matériaux sont, comme leurs descendants bitumineux, des matériaux complexes. En effet, un ERF va évoluer d'un état presque granulaire humide en très jeune âge, à un état lié au fur et à mesure que la cure s'effectue. Il apparaît ainsi que, nonobstant les efforts, les techniques classiques de caractérisation des matériaux bitumineux ne sont pas adaptées pour évaluer les ERF en très jeune âge. Le présent doctorat explore donc l'utilisation de la vitesse de l'onde de cisaillement (V_s) afin de caractériser les ERF. La technique P-RAT est utilisée. L'objectif principal est de démontrer la pertinence du paramètre V_s afin de caractériser les ERF et ainsi permettre son usage dans des applications futures. Les trois articles présentés dans ce document apportent des contributions permettant de remplir cet objectif.

Le premier article présenté au Chapitre 3 met en évidence la faisabilité de l'utilisation de V_s afin de caractériser l'évolution des propriétés mécaniques dans des plaques d'ERF. Les premières mesures sont réalisées 90 minutes après le compactage des plaques d'ERF et trois couples de transducteurs ont été utilisés. Les mesures mettent en évidence l'évolution rapide de V_s ainsi que la disparition de l'eau dans les spécimens testés en jeune âge, suivie d'un ralentissement pour atteindre des valeurs asymptotiques. Cela démontre une augmentation de la rigidité du mélange. Les mesures se sont étalées sur 16 et 37 jours de cure pour les plaques 1 et 2, respectivement. Ces travaux se basent sur un programme expérimental où un total de 2173 signaux a été collecté. Un lien entre la disparition de l'eau et l'évolution de V_s ainsi qu'avec l'amplitude des signaux reçus est mis en avant.

Le modèle Michaelis-Menten a été appliqué aux données du Chapitre 3. Le modèle MM est adapté pour modéliser l'évolution de V_s , de la disparition de l'eau dans le spécimen ainsi que l'évolution de l'amplitude des signaux reçus. L'expression d'un de ces paramètres en fonction de l'autre suit un modèle MM. Cela permet d'évaluer quel paramètre évolue plus rapidement

que l'autre et par la suite d'identifier les phénomènes en cause. Cependant, étant donné le manque de mesure en très jeune âge et la non-régularité de celles-ci, les relations liant les paramètres manquent de précision.

Le Chapitre 5 présente le deuxième article qui poursuit les travaux présentés au Chapitre 3, en suivant les recommandations formulées au Chapitre 4. Dix spécimens cylindriques d'un même mélange, compactés à la PCG à des teneurs en vide allant de 10,5 à 17,5 % sont étudiés. Pour 3 d'entre eux, V_s , la masse d'eau perdue ainsi que la température de surface ont été mesurées tout au long de la cure. Les mesures de V_s ont débuté entre 10 et 15 minutes après la fin du compactage. Un total de 49 mesures de V_s avec au moins 3 couples de transducteurs a été réalisé sur les 30 jours de cure, parmi lesquelles 28 le premier jour dont 9 la première heure de cure. Pour ces 3 spécimens, un total de 4752 signaux a été collecté. V_s ainsi que la perte d'eau dans le spécimen évoluent rapidement en très jeune âge. Un plateau apparaît dans l'évolution de V_s après quelques heures de cure, au même moment où la température de surface atteint un minimum. Ce minimum dans la température s'accompagne d'un ralentissement de l'évaporation de l'eau dans le spécimen. La présence du plateau met en évidence l'enchaînement de plusieurs régimes de cure.

Le modèle MM permet de modéliser l'évolution de V_s et de la perte d'eau. Cependant, le modèle MM ne prend pas en considération le phénomène de plateau observé en jeune âge. Les valeurs de V_s augmentent de façon linéaire avec l'augmentation de la compacité. Les modules équivalents aux valeurs finales de V_s sont cohérents avec des modules obtenus pour un mélange similaire avec des essais d'ITSM.

Le 6^{ème} Chapitre introduit les essais réalisés avec le P-RAT sur des spécimens de mastic bitumineux utilisés pendant le doctorat et notamment au Chapitre 7. De nouveaux transducteurs ont pu être essayés ainsi qu'une nouvelle configuration où le transducteur est inséré dans une capsule. Il ressort des essais que le mastic utilisé possède un V_s de 300 m.s^{-1} environ.

Le 3^{ème} article est présenté au Chapitre 7. V_s est mesurée avec le P-RAT dans trois directions différentes dans des sections de plaques d'ERF. Les valeurs de V_s sont différentes dans chaque direction, et ce de façon systématique, ce qui prouve le comportement anisotropique des ERF testés. En effet, il apparaît que les valeurs de V_s dans la direction 2 sont supérieures à celles dans la direction 3, elles-mêmes supérieures à celles dans la direction 1. Des mesures d'UPV en onde P ont également mis en avant le caractère anisotrope de l'ERF, avec des valeurs de V_p différentes dans les 3 directions. Il apparaît que la configuration d'arrivée de l'onde P au premier pic révèle des mesures de V_p cohérentes avec les résultats de V_s . La différence entre les valeurs de V_s est dépendante de la position de la mesure dans la plaque, avec un aspect symétrique et une influence des bords du moule. En effet, les dimensions du moule engendrent un confinement différent dans les directions observées. Cette symétrie et l'influence des bords du moule sont également présentes dans les mesures de V_p . Des essais de module complexe réalisés sur des spécimens cylindriques prélevés dans la direction 3 confirment que la configuration d'arrivée de l'onde au premier pic est celle à considérer, pour les résultats de V_p .

Finalement, l'analyse de l'orientation des granulats obtenue par tomodensitométrie montre un alignement préférentiel systématique dans la direction 1, qui correspond à la direction de la roue lors du compactage. L'orientation des particules démontre la présence d'une anisotropie inhérente, mais l'analyse du contact entre les granulats permettrait de lier les résultats des essais dynamiques à cette anisotropie.

Enfin, il ressort des travaux que le paramètre V_s obtenu via le P-RAT est adapté à la caractérisation des ERF, aussi bien après le compactage que lorsque le matériau a subi une cure. Les valeurs de V_s obtenues sont cohérentes entre elles, en considérant les paramètres de cure associés, et avec les résultats observés dans la littérature. Le modèle Michaelis-Menten est efficace pour modéliser l'évolution des paramètres V_s et la perte d'eau. Ce modèle permet de comparer simplement leurs évolutions et de distinguer les facteurs d'influence.

En ce qui concerne le P-RAT, les écarts types entre les différents couples de transducteurs montrent globalement une bonne reproductibilité de la mesure. Comparativement à l'UPV, le

P-RAT offre de meilleurs résultats, même si dans le cadre des travaux présentés, de nombreux signaux ont été collectés et analysés, augmentant le temps d'analyse.

RECOMMANDATIONS

Comme le montrent les essais et la littérature, la température et l'humidité influencent la cure des ERF. Ainsi, il serait intéressant de réaliser les essais présentés aux Chapitres 3 et 5, mais dans des conditions de cures différentes. La réalisation des essais et de la cure dans une chambre environnementale est à préconiser, afin de contrôler avec précision les conditions de cure. Ces températures et humidités relatives de cure devraient être représentatives des conditions de cure observées au Québec lors de la réalisation d'une couche d'ERF, comme dans les travaux de Ben Yahya, Lamothe, & Lachance-Tremblay (2025). Enfin, ces essais permettraient d'obtenir les évolutions de V_s et de la perte d'eau limite, qui agiraient comme plage observable.

La température de surface et la disparition de l'eau sont liées. La mesure de la température au cœur des spécimens testés apporterait des données utiles pour mieux comprendre la cure du spécimen. L'insertion de capteurs thermiques filaires ne semble pas adaptée dans le cas de spécimens réalisés à la PCG. En effet, il faudrait que ceux-ci soient insérés pendant le compactage et les fils risqueraient d'être endommagés. Des capteurs sans fils existent, cependant la taille de ceux-ci ainsi que leur résistance devraient être examinées.

En parallèle de ces essais, et grâce aux données collectées dans ce doctorat, dans les travaux à venir et dans la littérature, des modélisations devraient être réalisées. En effet, dans le domaine de la géotechnique, des modèles hygrothermiques existent et sont utilisés pour faire le lien entre les conditions environnementales et l'évolution de la teneur en eau des sols (Jalili, Ouahbi, Eig, Taibi, & Hamrouni, 2024). Les ERF étant des matériaux granulaires, ces modèles semblent adaptés aux ERF et leur utilisation devrait être explorée.

La disparition de l'eau dans les ERF est associée à l'évaporation de celle-ci. Or l'évaporation est un phénomène thermodynamique et donc une modélisation du comportement thermique de la couche d'ERF pourrait permettre la modélisation de la perte d'eau.

L'instrumentation d'une couche d'ERF représentative en chantier, avec des instruments mesurant la température et la teneur en eau en différents endroits de la couche d'ERF, permettraient l'acquisition de données qui viendraient valider et améliorer les modélisations. Ces modélisations permettraient d'évaluer la perte d'eau, aussi bien en très jeune âge que sur le long terme. Les hypothèses quant à l'apparition du plateau dans l'évolution de V_s dans les travaux présentés au Chapitre 5 pourraient être rediscutées. Concernant la cure à long terme, le lien entre la montée en rigidité via le paramètre V_s et la perte d'eau et donc la limite de la prépondérance de la création de liens bitumineux décrite au Chapitre 5 pourraient être déterminés.

Dans l'état actuel des choses, le P-RAT n'est pas utilisable en chantier. Or, le paramètre V_s est efficace pour caractériser les ERF. Bien que d'autres approches existent pour mesurer V_s en chantier, si l'évolution de la perte d'eau dans l'ERF est modélisable, si le lien entre l'évolution de V_s et la perte d'eau est connu, alors la seule connaissance en chantier des conditions environnementales et de la température au sein de l'ERF permettrait d'estimer V_s et donc la rigidité de l'ERF.

Concernant l'évaluation de l'anisotropie, la littérature fait état de différents comportements en fonction de la méthode de compactage (compacteur de plaque et PCG) pour des EBC. Seuls des spécimens issus de plaques ont été testés dans ce doctorat. En réalisant des spécimens à la PCG de diamètre 150 mm et en sciant les bords pour obtenir un prisme à base carré, il est possible de mesurer V_s dans trois directions. On peut même imaginer réaliser un prisme à base octogonale afin d'effectuer des mesures dans deux directions supplémentaires. La réalisation de cube permettrait de supprimer la part de l'anisotropie dictée par le moule, aussi bien lors de la réalisation de cylindres que de plaques. L'influence de la compacité sur le comportement anisotropique des ERF devrait aussi être évaluée, les ERF possédant une teneur en vide plus élevée que les EBC.

Des mesures de V_s dans le GBR seul, dans le granulat seul et dans le bitume seul permettraient de quantifier l'impact des composants sur la valeur de V_s . Enfin, des mesures de V_s dans un mélange de GBR sans le bitume d'apport permettraient d'obtenir une valeur pallier.

ANNEXE I

INFORMATIONS ADDITIONNELLES SUR LES TRANSDUCTEURS



Figure-A I-1 Vue arrière du transducteur 26-22 mm B

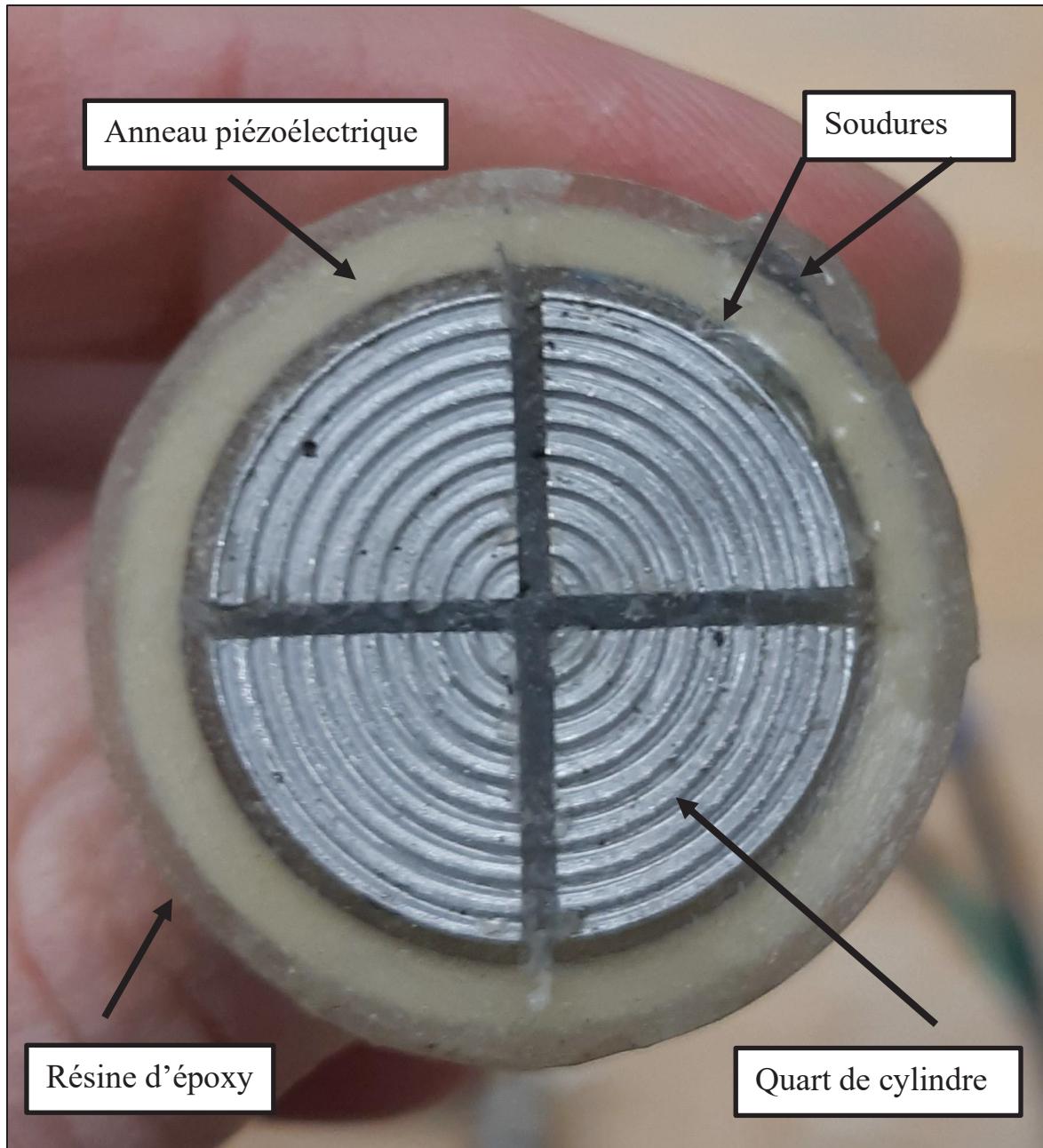


Figure-A I-2 Vue de face du transducteur 26-22 mm B

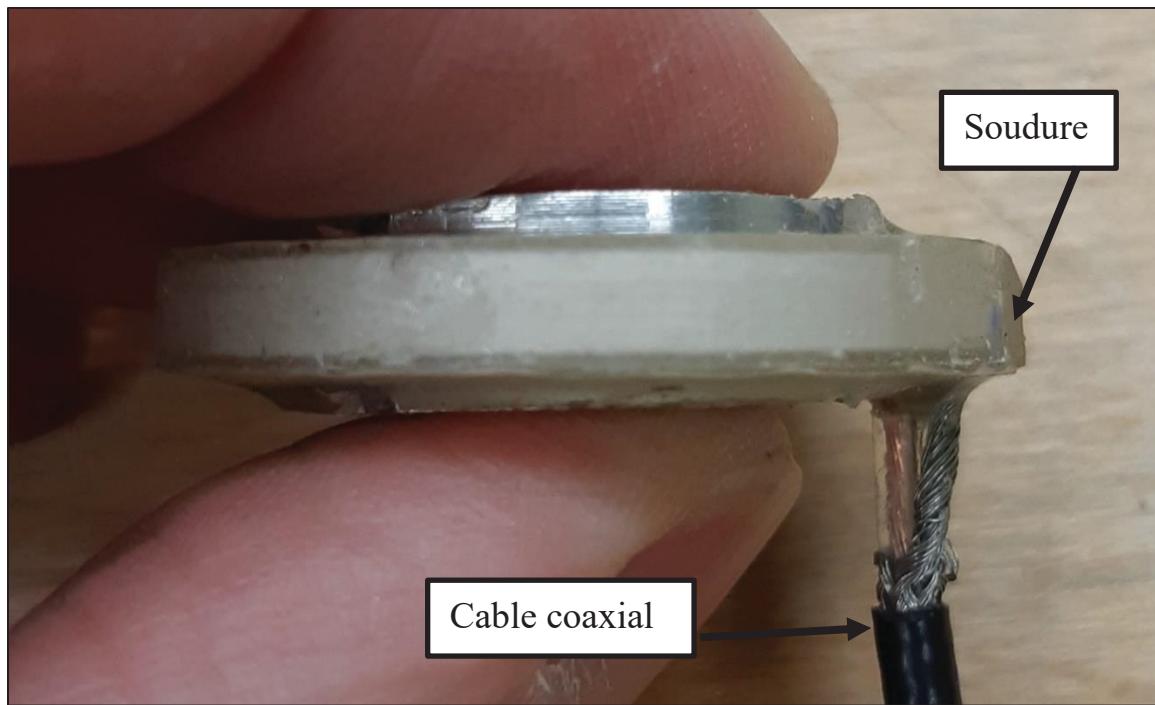


Figure-A I-3 Vue du côté du transducteur 26

ANNEXE II

DÉTAILS SUR LES PARAMÈTRES DES SIGNAUX ÉMIS AVEC LA MÉTHODE P-RAT

Tableau-A II-1 Paramètre des signaux émis

Paramètre	Valeur	Commentaire
Fréquence d'émission	3 kHz à 25 kHz	À faire varier pour encadrer la fréquence de résonance du transducteur
Amplitude	12 V	Toujours fixe, influence l'amplitude du signal émis
Gain	14 dB, 28 dB et 42 dB	À augmenter si l'amplitude du signal reçu est trop faible

Exemple de signaux collectés pour l'essai 40, spécimen C-15, transducteurs 26-22 mm :

Début 2023-03-14 00H34

SA-3kHz-12V-28dB

SA-5kHz-12V-28dB

SA-10kHz-12V-28dB

SA-15kHz-12V-28dB

GAU-5kHz-12V-28dB

GAU-10kHz-12V-28dB

GAU-15kHz-12V-28dB

GAU-25kHz-12V-28dB

DSA-5kHz-12V-28dB

DSA-10kHz-12V-28dB

DSA-15kHz-12V-28dB

O-5kHz-12V-28dB

O-10kHz-12V-28dB

Fin 2023-03-14 00H36

ANNEXE III

EXEMPLES D'INTERPRÉTATION DE SIGNAUX AVEC LA MÉTHODE P-RAT

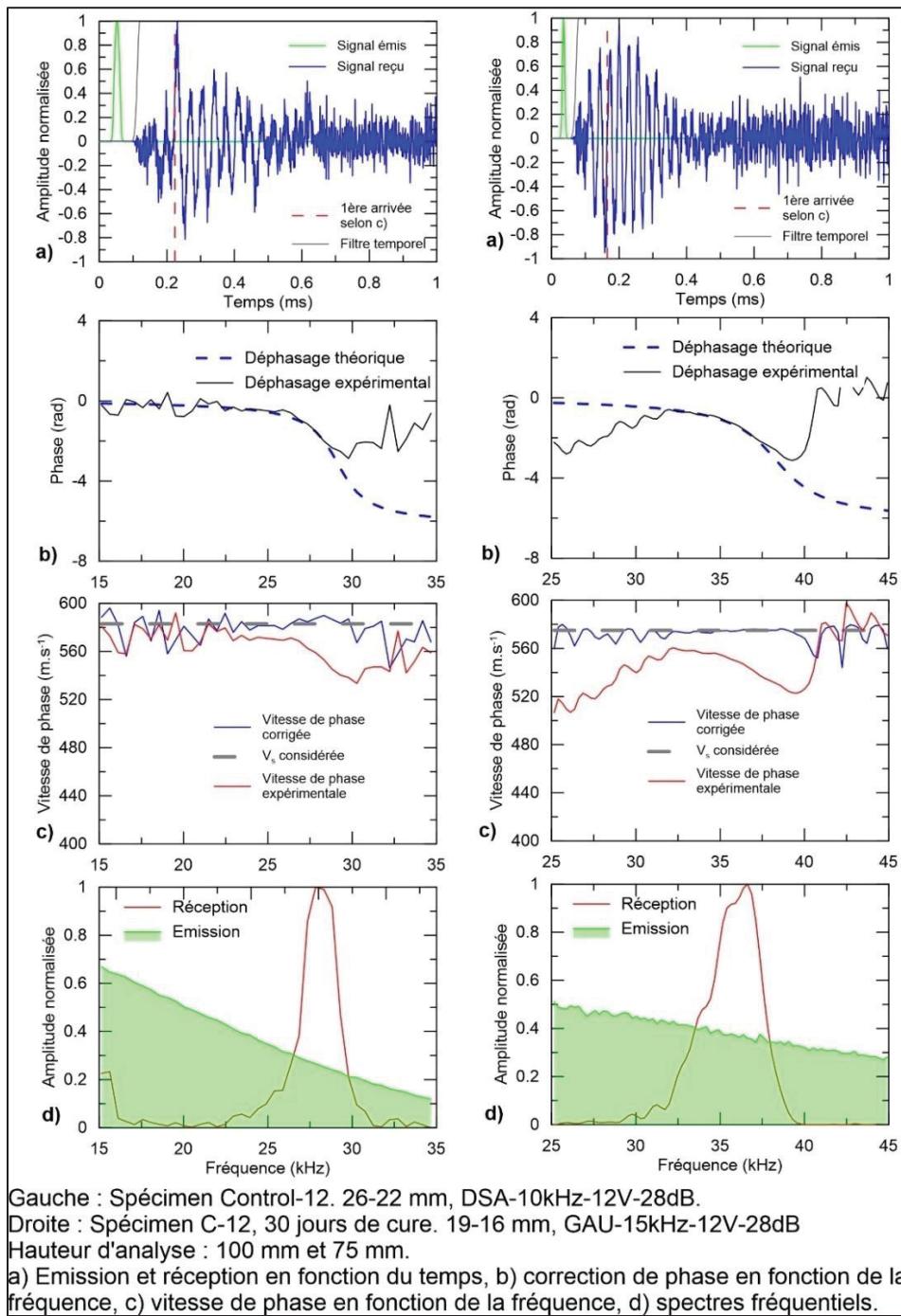


Figure-A III-1 Exemple 1

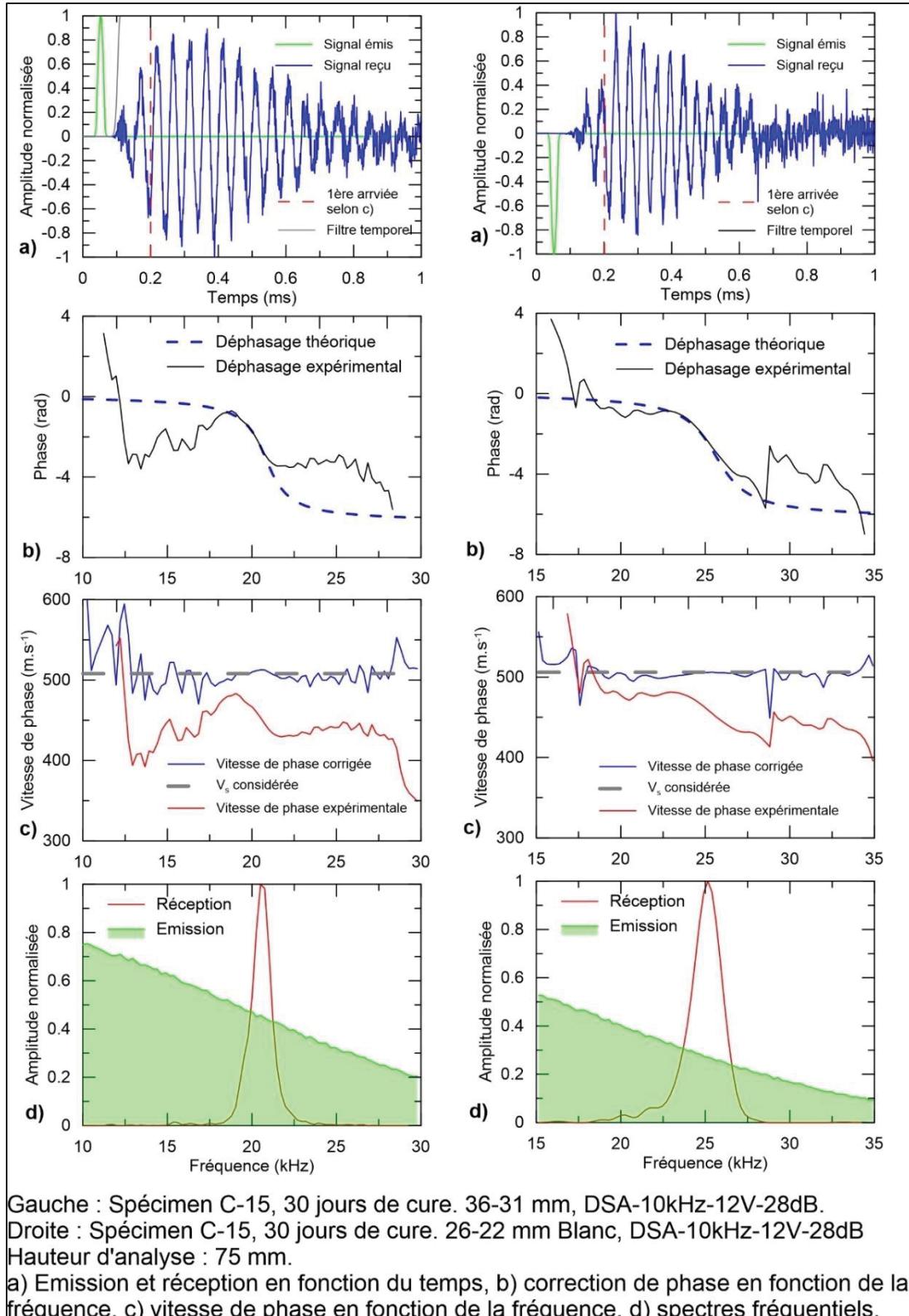


Figure-A III-2 Exemple 2

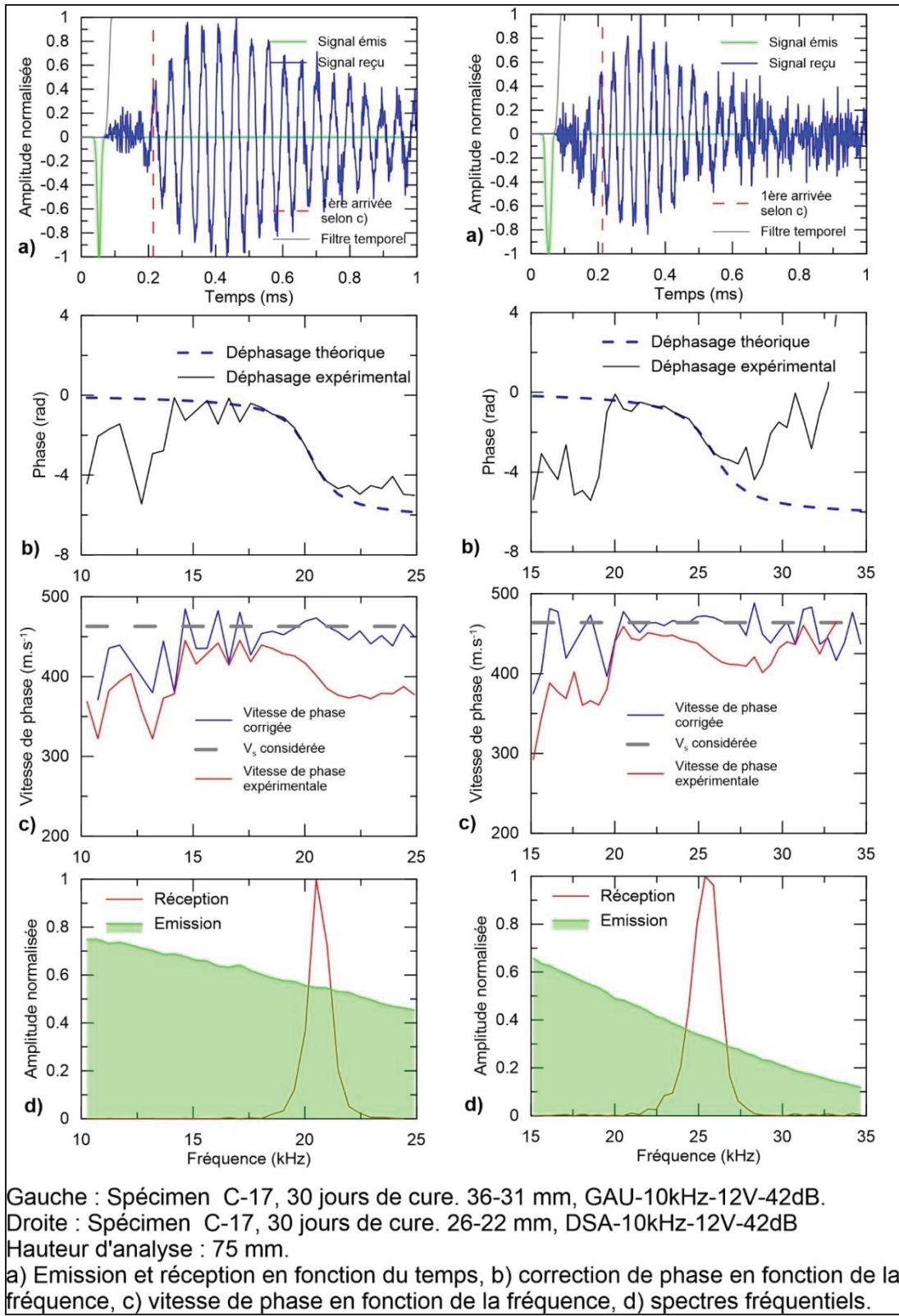


Figure-A III-3 Exemple 3

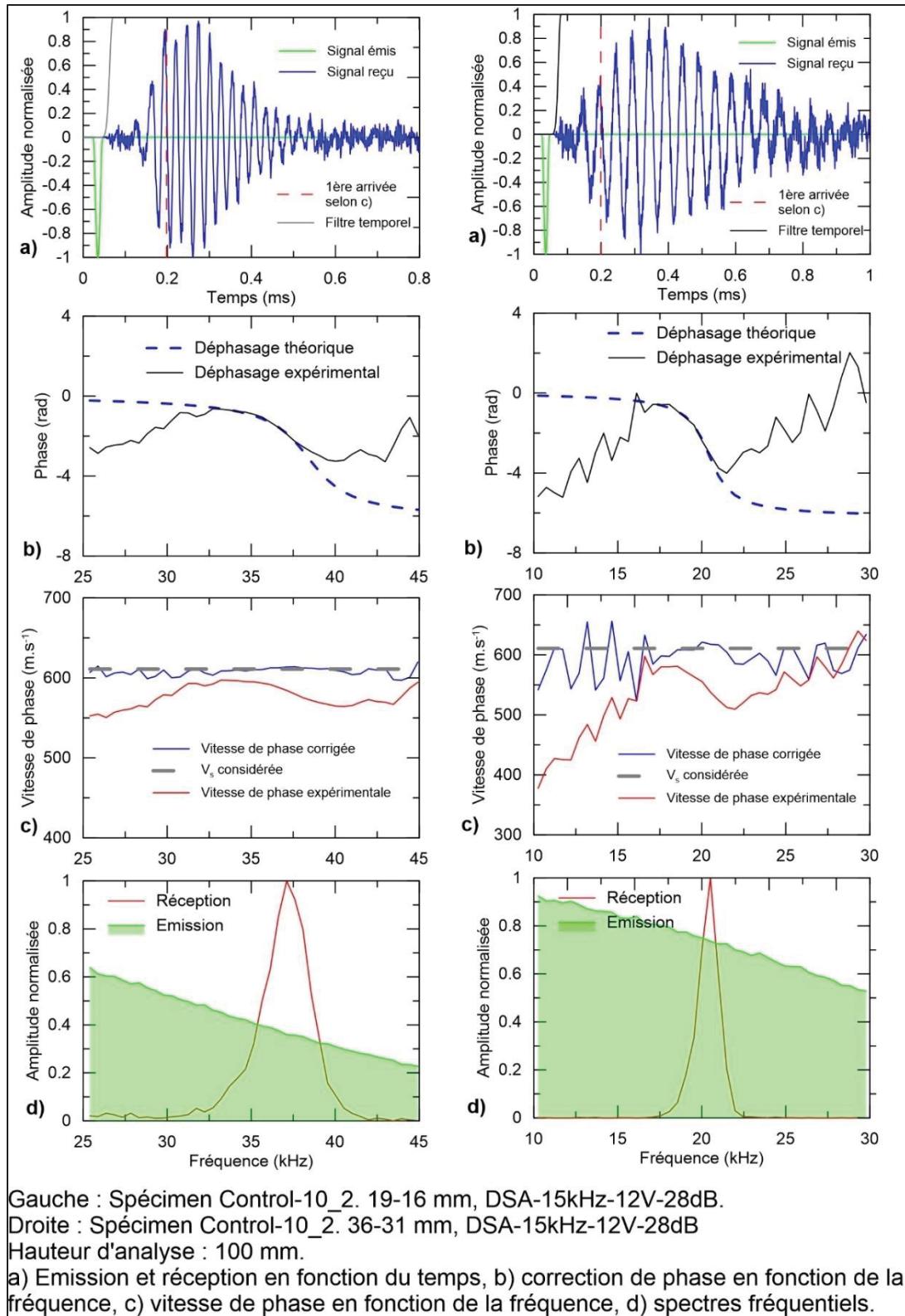


Figure-A III-4 Exemple 4

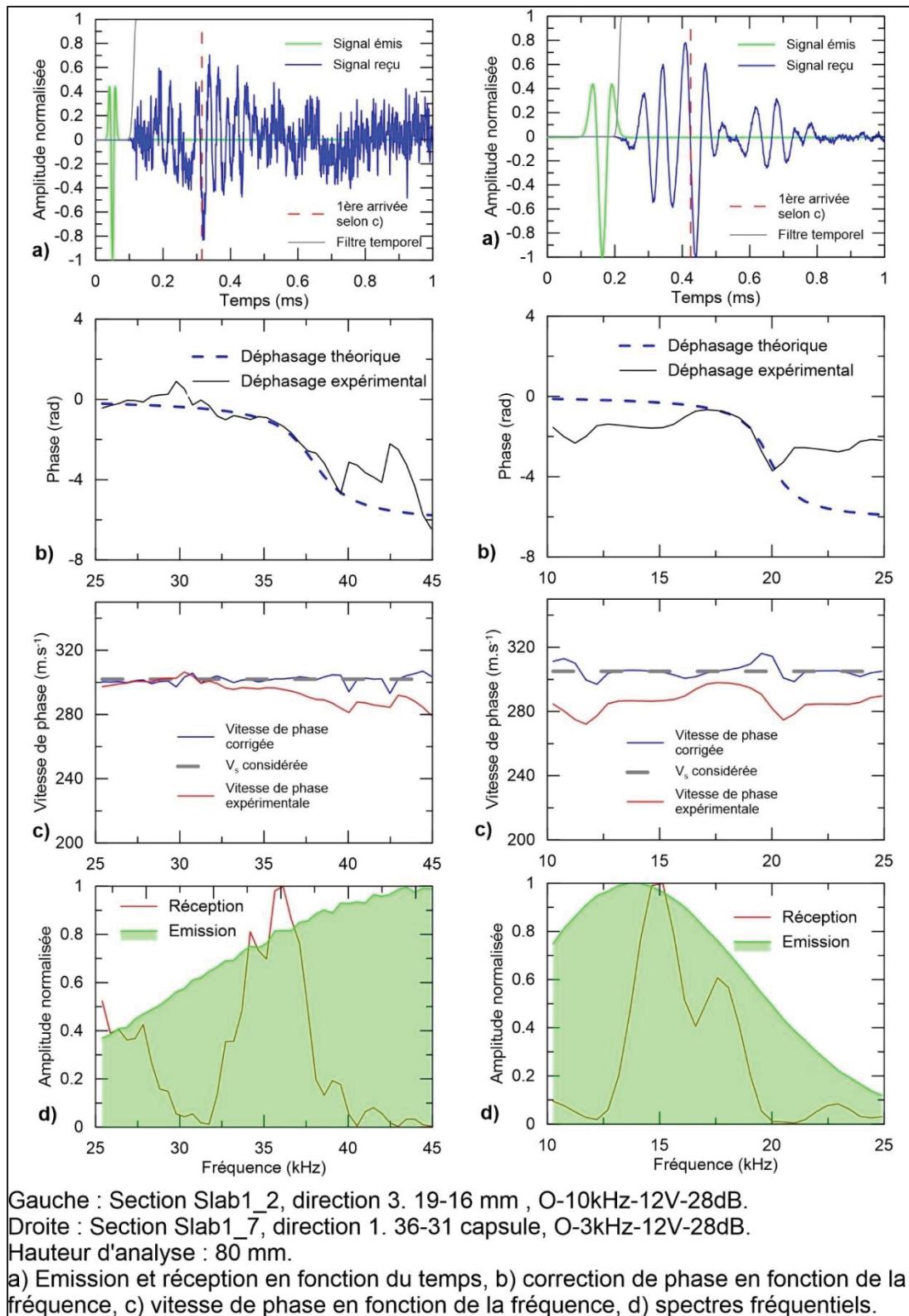


Figure-A III-5 Exemple 5

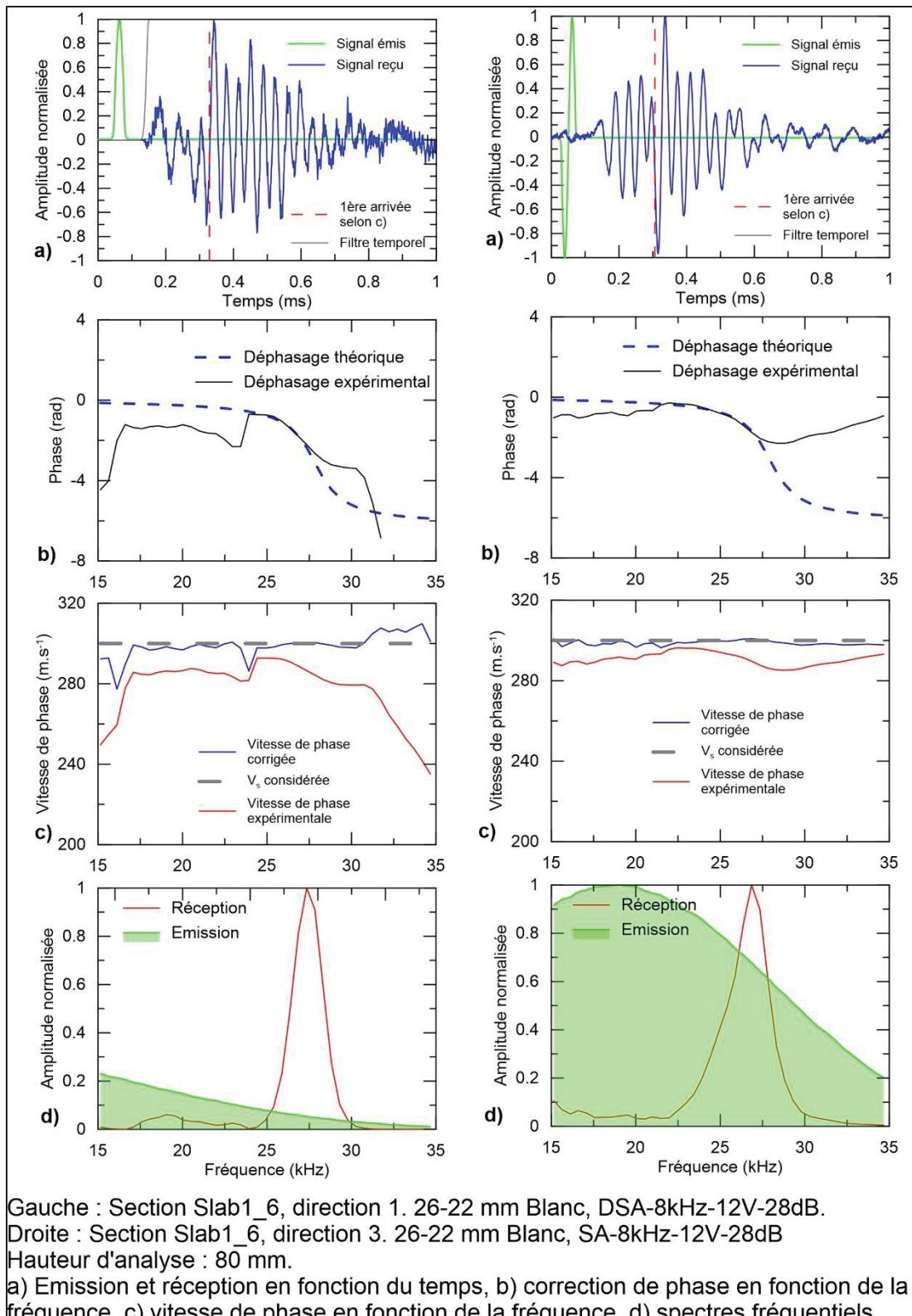


Figure-A III-6 Exemple 6

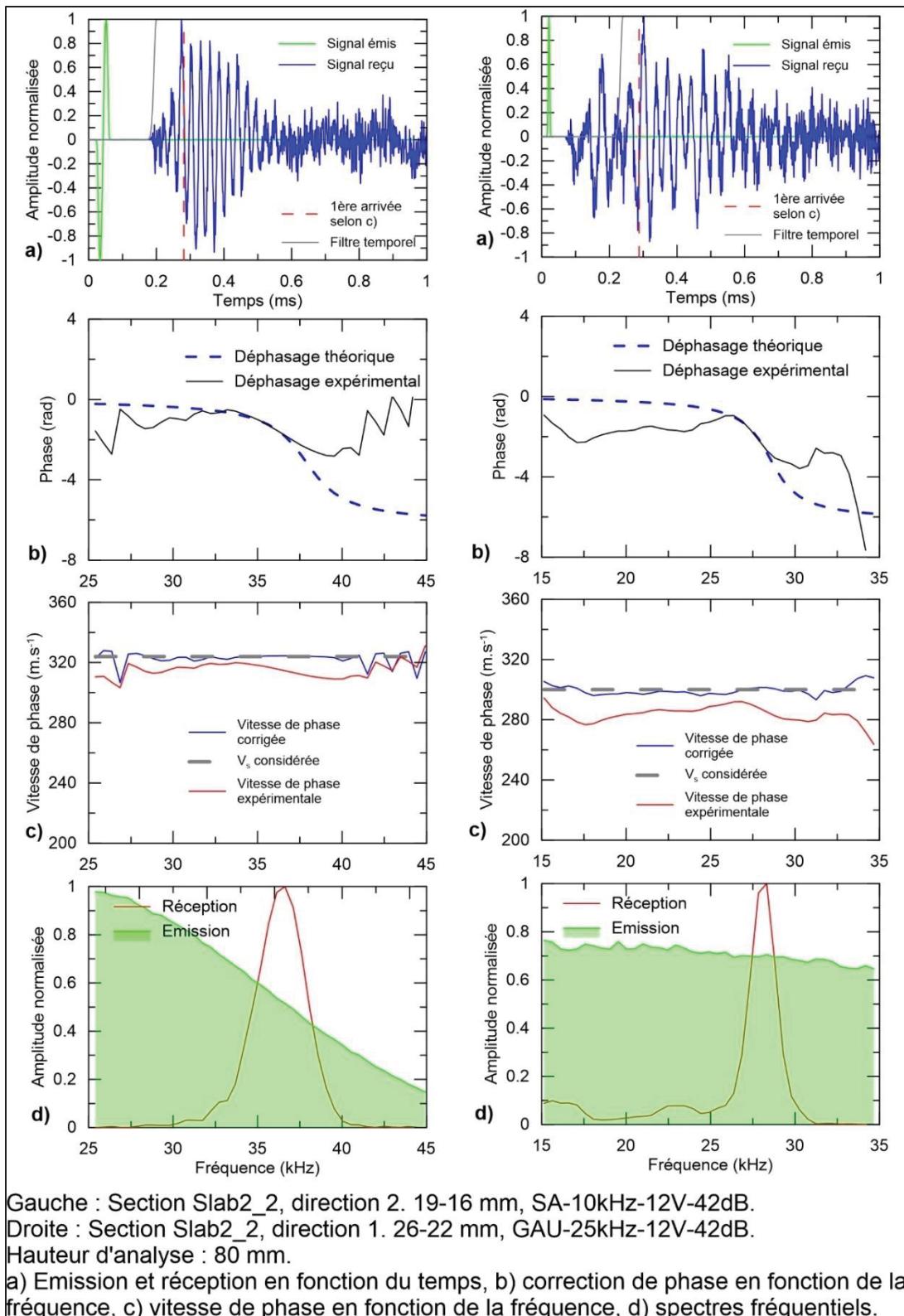


Figure-A III-7 Exemple 7

ANNEXE IV

PLANIFICATION DES ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS C-12, C-15 ET C-17

Tableau-A IV-1 Planification des essais pour le spécimen C-17

Fin de compactage estimée : 19:00									
Jour	Mesure	Temps estimé	Temps de cure (heure)	Temps de cure (jour)	Jour	Mesure	Temps estimé	Temps de cure (heure)	Temps de cure (jour)
J1	1	19:10	0,17	0,01	J2	23	5:10	10,17	0,42
	2	19:15	0,25	0,01		24	9:10	14,17	0,59
	3	19:20	0,33	0,01		25	13:10	18,17	0,76
	4	19:25	0,42	0,02		26	17:10	22,17	0,92
	5	19:30	0,50	0,02		27	20:10	25,17	1,05
	6	19:35	0,58	0,02	J3	28	0:10	29,17	1,22
	7	19:40	0,67	0,03		29	9:10	38,17	1,59
	8	19:50	0,83	0,03		30	15:10	44,17	1,84
	9	20:00	1,00	0,04		31	21:10	50,17	2,09
	10	20:10	1,17	0,05	J4	32	7:10	60,17	2,51
	11	20:25	1,42	0,06		33	19:10	72,17	3,01
	12	20:40	1,67	0,07		34	7:10	84,17	3,51
	13	20:55	1,92	0,08	J5	35	19:10	96,17	4,01
	14	21:10	2,17	0,09		36	19:10	120,17	5,01
	15	21:30	2,50	0,10		37	19:10	144,17	6,01
	16	21:50	2,83	0,12	J6	38	19:10	192,17	8,01
	17	22:10	3,17	0,13		39	19:10	240,17	10,01
	18	22:40	3,67	0,15		40	19:10	312,17	13,01
	19	23:10	4,17	0,17	J7	41	19:10	384,17	16,01
J2	20	0:10	5,17	0,22		42	19:10	480,17	20,01
	21	1:10	6,17	0,26		43	19:10	576,17	24,01
	22	3:10	8,17	0,34		44	19:10	720,07	30,00

Tableau-A IV-2 Planification des essais pour le spécimen C-15

Fin de compactage estimée : 19:00									
Jour	Mesure	Temps estimé	Temps de cure (heure)	Temps de cure (jour)	Jour	Mesure	Temps estimé	Temps de cure (heure)	Temps de cure (jour)
J1	1	19:10	0,17	0,01	J2	26	9:40	14,67	0,61
	2	19:15	0,25	0,01		27	12:40	17,67	0,74
	3	19:20	0,33	0,01		28	16:40	21,67	0,90
	4	19:25	0,42	0,02		29	20:40	25,67	1,07
	5	19:30	0,50	0,02	J3	30	0:40	29,67	1,24
	6	19:35	0,58	0,02		31	7:40	36,67	1,53
	7	19:40	0,67	0,03		32	13:20	42,33	1,76
	8	19:50	0,83	0,03		33	19:00	48,00	2,00
	9	20:00	1,00	0,04	J4	34	1:00	54,00	2,25
	10	20:10	1,17	0,05		35	9:00	62,00	2,58
	11	20:25	1,42	0,06		36	17:00	70,00	2,92
	12	20:40	1,67	0,07	J5	37	0:30	77,50	3,23
	13	20:55	1,92	0,08		38	8:30	85,50	3,56
	14	21:10	2,17	0,09		39	16:30	93,50	3,90
	15	21:30	2,50	0,10	J6	40	0:25	101,42	4,23
	16	21:50	2,83	0,12		41	16:25	117,42	4,89
	17	22:10	3,17	0,13	J7	42	16:25	141,42	5,89
	18	22:40	3,67	0,15		43	16:25	189,42	7,89
	19	23:10	4,17	0,17	J11	44	16:25	237,42	9,89
	20	23:55	4,92	0,20		45	16:25	309,42	12,89
J2	21	0:40	5,67	0,24	J17	46	16:25	381,42	15,89
	22	1:40	6,67	0,28	J21	47	16:25	477,42	19,89
	23	2:40	7,67	0,32	J25	48	16:25	573,42	23,89
	24	4:40	9,67	0,40	J31	49	16:25	717,42	29,89
	25	6:40	11,67	0,49					

Tableau-A IV-3 Planification des essais pour le spécimen C-12

Fin de compactage estimée : 19:00									
Jour	Mesure	Temps estimé	Temps de cure (heure)	Temps de cure (jour)	Jour	Mesure	Temps estimé	Temps de cure (heure)	Temps de cure (jour)
J1	1	19:10	0,17	0,01	J2	26	9:40	14,67	0,61
	2	19:15	0,25	0,01		27	12:40	17,67	0,74
	3	19:20	0,33	0,01		28	16:40	21,67	0,90
	4	19:25	0,42	0,02		29	20:40	25,67	1,07
	5	19:30	0,50	0,02	J3	30	0:40	29,67	1,24
	6	19:35	0,58	0,02		31	6:40	35,67	1,49
	7	19:40	0,67	0,03		32	12:40	41,67	1,74
	8	19:50	0,83	0,03		33	18:25	47,42	1,98
	9	20:00	1,00	0,04	J4	34	0:15	53,25	2,22
	10	20:10	1,17	0,05		35	8:15	61,25	2,55
	11	20:25	1,42	0,06		36	16:15	69,25	2,89
	12	20:40	1,67	0,07	J5	37	0:15	77,25	3,22
	13	20:55	1,92	0,08		38	10:15	87,25	3,64
	14	21:10	2,17	0,09		39	20:15	97,25	4,05
	15	21:30	2,50	0,10	J6	40	8:15	109,25	4,55
	16	21:50	2,83	0,12		41	19:15	120,25	5,01
	17	22:10	3,17	0,13	J7	42	16:15	141,25	5,89
	18	22:40	3,67	0,15	J9	43	16:15	189,25	7,89
	19	23:10	4,17	0,17	J11	44	16:15	237,25	9,89
	20	23:55	4,92	0,20	J14	45	16:15	309,25	12,89
J2	21	0:40	5,67	0,24	J17	46	16:15	381,25	15,89
	22	1:40	6,67	0,28	J21	47	16:15	477,25	19,89
	23	2:40	7,67	0,32	J25	48	16:15	573,25	23,89
	24	4:40	9,67	0,40	J31	49	16:15	717,25	29,89
	25	6:40	11,67	0,49					

ANNEXE V

MODÈLE MICHAELIS-MENTEN, DÉTAIL DES CALCULS

Dans le cas où 2 paramètres $Y_1 = f(X)$ et $Y_2 = f(X)$ suivent un modèle Michaelis-Menten tel que décrit à la section 1.4.4, il est possible d'exprimer Y_1 en fonction de Y_2 , et vice-versa.

On a :

$$Y_1 = \frac{B_1 * X}{C_1 + X} \quad (\text{A V-1})$$

$$Y_2 = \frac{B_2 * X}{C_2 + X} \quad (\text{A V-2})$$

Avec B_1 et B_2 des constantes positives homogènes à Y_1 et Y_2 respectivement, et C_1 et C_2 des constantes positives homogènes à X .

Donc,

$$Y_2 * (C_2 + X) = B_2 * X \Leftrightarrow X = \frac{Y_2 * C_2}{B_2 - Y_2} \quad (\text{A V-3})$$

$$Y_1 = \frac{\frac{B_1 Y_2 C_2}{B_2 - Y_2}}{C_1 + \frac{Y_2 C_2}{B_2 - Y_2}} \Leftrightarrow Y_1 = \frac{B_1 C_2 Y_2}{C_1 B_2 + Y_2 (C_2 - C_1)} \quad (\text{A V-4})$$

Si on pose $B = B_1 C_2$, $C = C_1 B_2$ et $D = C_2 - C_1$, on obtient :

$$Y_1 = \frac{B Y_2}{C + D Y_2} \Leftrightarrow Y_1 = \frac{\frac{B}{D} Y_2}{\frac{C}{D} + Y_2} \quad (\text{A V-5})$$

Dans le cas où $C_1 = C_2$, Y_1 en fonction de Y_2 est linéaire. Si $C_2 > C_1$, Y_1 évolue plus rapidement que Y_2 . Si $C_2 < C_1$, Y_2 évolue plus rapidement que Y_1 .

Ces évolutions peuvent être caractérisées par la courbure de la courbe. La courbure est définie comme étant la dérivé seconde de la courbe, soit :

$$\text{Courbure}_{Y_1} = \frac{d^2 Y_1}{d Y_2^2} \quad (\text{A V-6})$$

$$Y'_1(Y_2) = \frac{\frac{B}{D} * \left(\frac{C}{D} + Y_2\right) - \frac{B}{D} * Y_2}{\left(\frac{C}{D} + Y_2\right)^2} = \frac{\frac{B * C}{D^2}}{\left(\frac{C}{D} + Y_2\right)^2} \quad (\text{A V-7})$$

$$Y''_1(Y_2) = \frac{-\frac{B * C}{D^2} * 2 * (Y_2 + \frac{C}{D})}{\left(\frac{C}{D} + Y_2\right)^4} = \frac{-2 * \frac{B * C}{D^2}}{\left(\frac{C}{D} + Y_2\right)^3} \quad (\text{A V-8})$$

Donc :

$$\text{Courbure}_{Y_1} = \frac{-2 * \frac{B * C}{D^2}}{\left(\frac{C}{D} + Y_2\right)^3} \quad (\text{A V-9})$$

B et C étant positifs, le signe de la courbure va dépendre du signe de D. Si D est positif ($C_2 > C_1$), alors la courbure est négative, et la courbe est concave. La courbe va évoluer pour atteindre une valeur asymptotique.

Si D est négatif ($C_2 < C_1$), alors la courbure est positive et la courbe est convexe, jusqu'à ce que $C/D + Y_2$ tend vers 0 est la courbe atteint une limite et tend vers l'infini.

Avec le modèle MM modifié, présenté à la section 2.5.3, on a :

$$Y_1 = A_1 + \frac{B_1 * X}{C_1 + X} \Leftrightarrow Y_1 - A_1 = \frac{B_1 * X}{C_1 + X} \quad (\text{A V-10})$$

$$Y_2 = A_2 + \frac{B_2 * X}{C_2 + X} \Leftrightarrow Y_2 - A_2 = \frac{B_2 * X}{C_2 + X} \quad (\text{A V-11})$$

Donc :

$$Y_1 - A_1 = \frac{B(Y_2 - A_2)}{C + D(Y_2 - A_2)} \Leftrightarrow Y_1 = A_1 + \frac{\frac{B}{D}(Y_2 - A_2)}{\frac{C}{D} + (Y_2 - A_2)} \quad (\text{A V-12})$$

La courbure de la courbe s'exprime par :

$$\text{Courbure}_{Y_1} = Y_1''(Y_2) = \frac{-2 * \frac{B * C}{D^2}}{\left(\frac{C}{D} + Y_2 - A_2\right)^3} \quad (\text{A V-12})$$

La même analyse s'applique.

ANNEXE VI

ÉLÉMÉNTS SUPPLÉMENTAIRES ARTICLE 3 - CHAPITRE 7

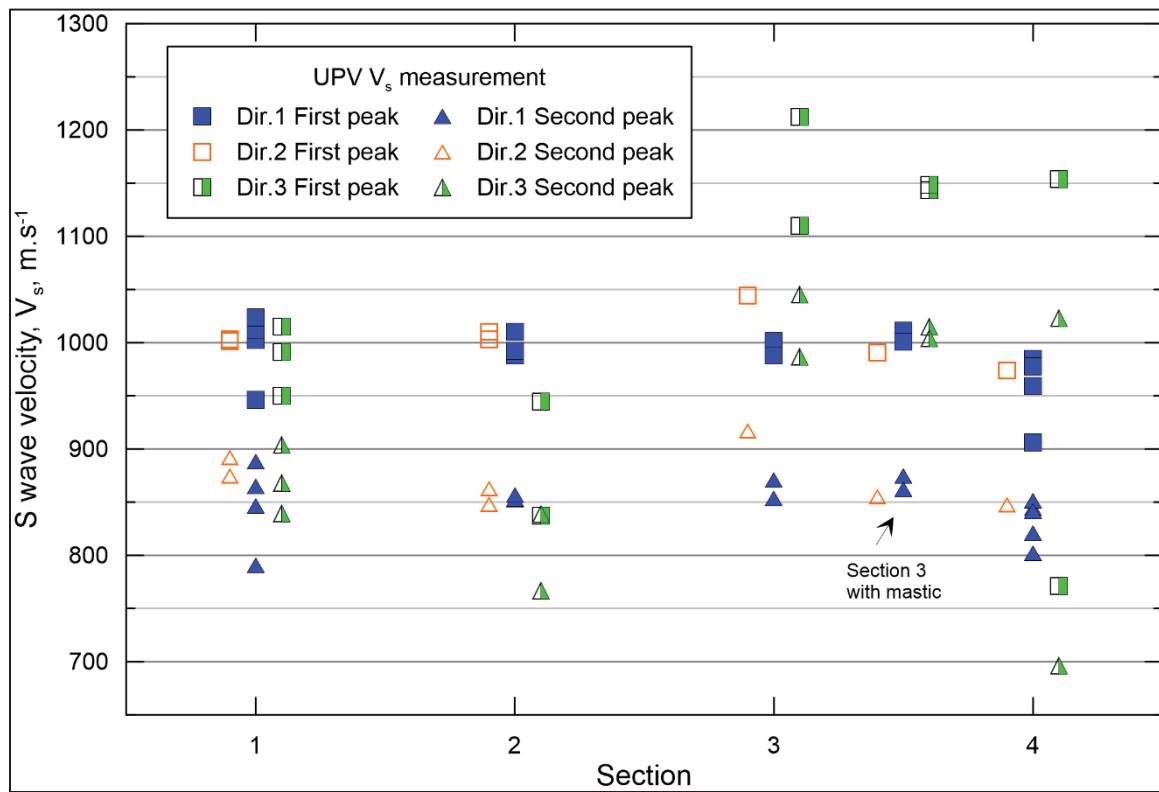


Figure-A VI-1 PUNDIT S-wave results in 3 directions for each section of slab 2

Tableau-A VI-1 Standard deviation of UPV V_s values in each direction
for every section of Slab 2

	Standard deviation σ (number of signals)					
	1 st pic			2 nd pic		
	V_s dir. 1	V_s dir. 2	V_s dir. 3	V_s dir. 1	V_s dir. 2	V_s dir. 3
Slab2_1	3.5 % (4)	0.1 % (2)	3.3 % (3)	4.9 % (4)	1.4 % (2)	3.7 % (3)
Slab2_2	1.2 % (3)	0.5 % (2)	8.5 % (2)	0.3 % (3)	1.2 % (2)	6.4 % (2)
Slab2_3	1.0 % (2)	n.a.	6.2 % (2)	1.4 % (2)	n.a.	4.1 % (2)
Slab2_4	3.4 % (5)	n.a.	28.1 % (2)	2.4 % (5)	n.a.	26.9 % (2)
Slab2_3 Mastic	0.7 % (2)	n.a.	0.3 % (2)	1.0 % (2)	n.a.	0.8 % (2)

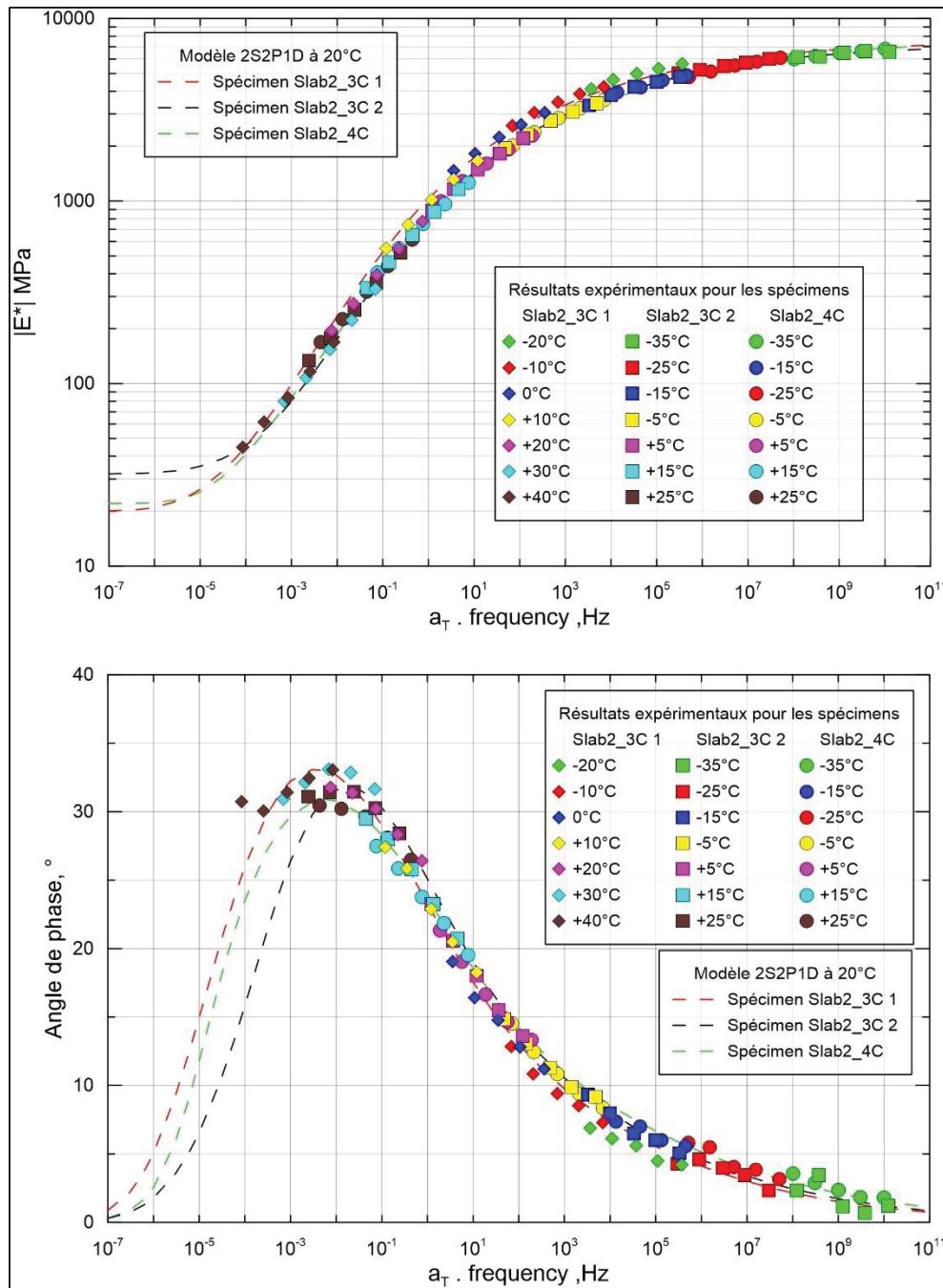


Figure-A VI-2 Courbes maîtresses de $|E^*|$ (A), et de l'angle de phase (B)
à une température de référence de 20°C

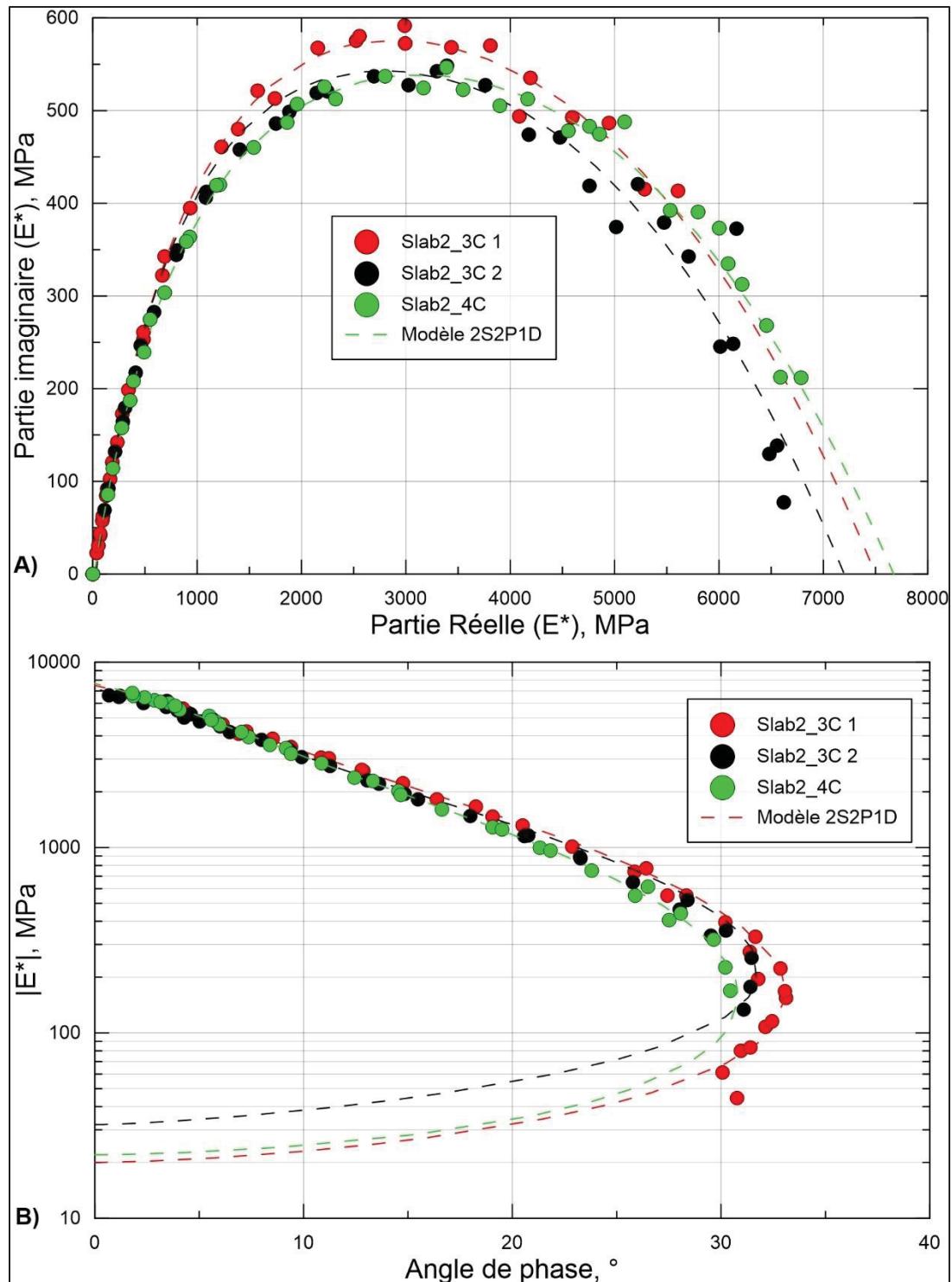


Figure-A VI-3 Module complexe E^* dans le plan Cole-Cole (A) et dans le diagramme de Black (B)

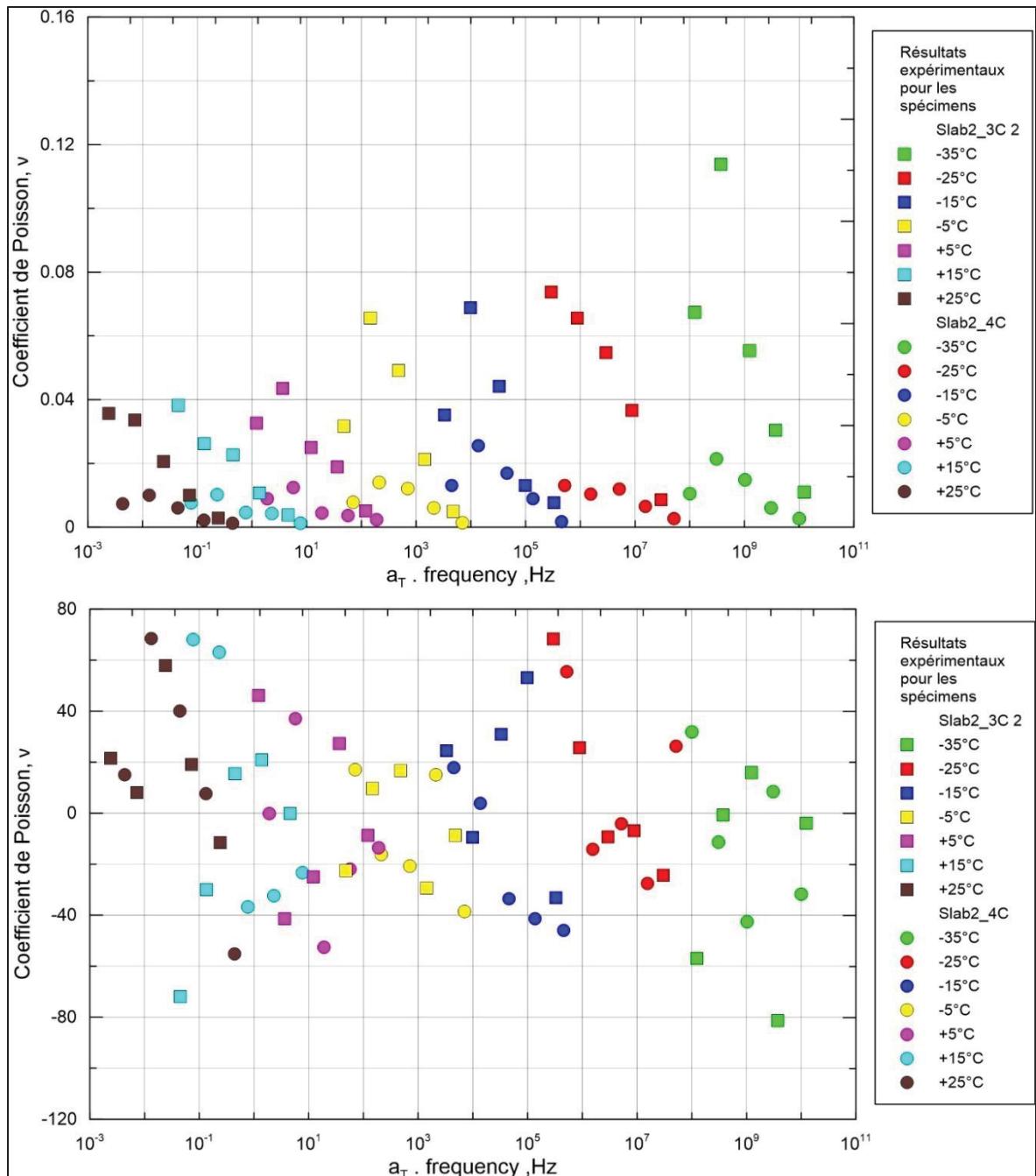


Figure-A VI-4 Courbes maitresses du coefficient de Poisson (A), et de l'angle de phase (B)
à une température de référence de 20°C

APPENDICE A

DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES PLAQUES 1 ET 2 – CHAPITRE 3

Sont présentées : les données de la mesure de la perte d'eau, de la mesure de la température de surface, et les données de V_s considérées pour tracer les graphiques des Chapitres 3 et 4.

Tableau-A A-1 Récapitulatif des données de perte d'eau et de la température de surface en fonction du temps, Plaque 1

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température de surface (°C)
			Minute	Heure	Jour		
1	1	15:00	75	1,25	0,05	0	18,3
1	2	15:53	128	2,13	0,09	29	
1	3	16:35	170	2,83	0,12	42	
1	4	17:05	200	3,33	0,14	51	18,2
1	6	18:00	255	4,25	0,18	68	17,8
1	7	18:05	260	4,33	0,18	69	
1	8	18:52	307	5,12	0,21	83	17,7
1	9	19:33	348	5,80	0,24	95	
1	10	19:35	350	5,83	0,24	96	
2	12	08:29	1124	18,73	0,78	262	18,8
2	13	09:00	1155	19,25	0,80	268	19,3
2	14	10:30	1245	20,75	0,86	280	20,0
2	15	10:52	1267	21,12	0,88	283	20,1
2	16	11:01	1276	21,27	0,89	284	20,0
2	17	11:15	1290	21,50	0,90	286	19,9
2	18	11:16	1291	21,52	0,90	287	19,9
2	21	12:04	1339	22,32	0,93	295	20,2
2	22	12:15	1350	22,50	0,94	296	
2	23	13:35	1430	23,83	0,99	304	
2	24	14:35	1490	24,83	1,03	311	20,3
2	25	14:55	1510	25,17	1,05	313	
2	26	15:16	1531	25,52	1,06	315	20,6
2	27	15:37	1552	25,87	1,08	318	
2	28	16:38	1613	26,88	1,12	320	
2	29	16:50	1625	27,08	1,13	321	21,0
2	30	17:06	1641	27,35	1,14	322	
2	34	18:21	1716	28,60	1,19	326	
2	35	18:41	1736	28,93	1,21	327	
2	36	18:53	1748	29,13	1,21	328	
2	37	19:07	1762	29,37	1,22	329	
3	38	09:40	2635	43,92	1,83	360	22,4
3	39	09:54	2649	44,15	1,84	361	22,4
3	40	10:48	2703	45,05	1,88	362	22,4
3	41	11:37	2752	45,87	1,91	363	22,4
3	43	12:45	2820	47,00	1,96	366	22,6
3	44	14:16	2911	48,52	2,02	368	22,6

Tableau-A A-1 Récapitulatif des données de perte d'eau et de la température de surface en fonction du temps, Plaque 1 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température de surface (°C)
			Minute	Heure	Jour		
3	45	14:53	2948	49,13	2,05	369	
3	46	15:06	2961	49,35	2,06	370	
3	47	15:56	3011	50,18	2,09	371	
3	48	16:32	3047	50,78	2,12	372	
3	49	16:46	3061	51,02	2,13	372	
3	50	17:38	3113	51,88	2,16	374	22,4
4	51	08:46	4021	67,02	2,79	391	22,6
4	52	09:10	4045	67,42	2,81	392	
4	53	12:47	4262	71,03	2,96	396	
4	54	13:50	4325	72,08	3,00	397	22,9
4	55	14:42	4377	72,95	3,04	398	22,9
4	56	18:27	4602	76,70	3,20	402	22,4
4	57	19:08	4643	77,38	3,22	403	22,5
5	58	10:12	5547	92,45	3,85	417	22,9
5	59	11:03	5598	93,30	3,89	417	23,0
5	60	13:07	5722	95,37	3,97	418	23,1
6	61	10:11	6986	116,43	4,85	432	23,3
6	62	10:58	7033	117,22	4,88	432	23,3
8	63	15:28	10183	169,72	7,07	455	22,7
8	64	15:57	10212	170,20	7,09	455	22,7
9	65	15:26	11621	193,68	8,07	464	22,8
9	66	16:42	11697	194,95	8,12	465	22,8
10	67	15:30	13065	217,75	9,07	469	22,6
10	68	16:32	13127	218,78	9,12	470	22,8
11	69	15:15	14490	241,50	10,06	477	22,5
11	70	15:55	14530	242,17	10,09	477	22,5
11	71	17:42	14637	243,95	10,16	477	22,5
12	72	15:04	15919	265,32	11,05	483	22,6
12	73	16:04	15979	266,32	11,10	483	22,5
15	74	14:27	20202	336,70	14,03	492	22,4
16	75	14:51	21666	361,10	15,05	495	22,6
16	76	16:43	21778	362,97	15,12	495	22,6
17	77	15:04	23119	385,32	16,05	496	22,8
17	78	16:04	23179	386,32	16,10	497	22,8
18	79	14:43	24538	408,97	17,04	498	

Tableau-A A-2 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 22-16 mm, Plaque 1

Heure de fin de compactage : 13:45						Hauteur d'analyse 48,00 mm Hauteur réelle 49,42 mm		
Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Signal émis	Vs exp.	Vs réelle
			Minute	Heure	Jour			
1	1	15:46	121	2,02	0,084	DSA-8kHz-12V-42dB	246,0	253,3
1	1	15:41	116	1,93	0,081	O-3kHz-12V-42dB	249,0	256,4
1	2	16:33	168	2,80	0,117	DSA-8kHz-12V-42dB	272,0	280,0
1	4	17:48	243	4,05	0,169	O-8kHz-12V-42dB	292,0	300,6
1	4	17:43	238	3,97	0,165	DSA-8kHz-12V-42dB	290,0	298,6
1	6	19:18	333	5,55	0,231	O-8kHz-12V-42dB	295,0	303,7
2	11	08:54	1149	19,15	0,798	O-5kHz-12V-42dB	316,0	325,3
2	11	08:56	1151	19,18	0,799	O-8kHz-12V-42dB	322,0	331,5
2	15	17:57	1692	28,20	1,175	O-8kHz-12V-42dB	326,0	335,6
2	15	17:53	1688	28,13	1,172	DSA-8kHz-12V-42dB	327,0	336,7
3	18	12:15	2790	46,50	1,938	O-7kHz-12V-42dB	335,0	344,9
3	18	12:27	2802	46,70	1,946	SA-8kHz-12V-42dB	329,0	338,7
3	20	17:20	3095	51,58	2,149	DSA-9kHz-12V-42dB	339,0	349,0
3	20	17:24	3099	51,65	2,152	O-5kHz-12V-42dB	330,0	339,8
4	21	09:06	4041	67,35	2,806	O-6kHz-12V-42dB	342,2	352,3
4	21	09:08	4043	67,38	2,808	SA-9kHz-12V-42dB	338,0	348,0
5	23	18:52	6067	101,12	4,213	DSA-9kHz-12V-42dB	347,0	357,3
5	23	19:01	6076	101,27	4,219	O-6kHz-12V-42dB	343,0	353,1
6	25	10:50	7025	117,08	4,878	DSA-9kHz-12V-42dB	354,0	364,5
6	25	10:54	7029	117,15	4,881	SA-10kHz-12V-42dB	350,2	360,6
6	25	10:53	7028	117,13	4,881	O-8kHz-12V-42dB	350,0	360,4
8	26	15:54	10209	170,15	7,09	O-6kHz-12V-42dB	353,0	363,4
8	26	15:56	10211	170,18	7,091	S-12kHz-12V-42dB	354,0	364,5
9	27	16:09	11664	194,40	8,100	O-6kHz-12V-42dB	353,0	363,4
11	29	15:52	14527	242,12	10,09	O-6kHz-12V-42dB	356,0	366,5
11	29	15:47	14522	242,03	10,08	DSA-9kHz-12V-42dB	360,0	370,7
12	30	15:35	15950	265,83	11,08	SA-12kHz-12V-42dB	359,0	369,6
17	32	15:39	23154	385,90	16,08	SA-12kHz-12V-42dB	360,0	370,7
17	32	15:40	23155	385,92	16,08	S-15kHz-12V-42dB	357,2	367,8
17	32	15:38	23153	385,88	16,08	O-7kHz-12V-42dB	359,0	369,6

Tableau-A A-3 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 38-34 mm, Plaque 1

Jour	Essai	Heure	Heure de fin de compactage : 13:45			Hauteur d'analyse 48,00 mm Hauteur réelle 48,51 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
1	1	15:14	89	1,48	0,06	DSA-5kHz-12V-14dB	257,0	259,7
1	1	15:11	86	1,43	0,06	O-3kHz-12V-14dB	255,0	257,7
1	2	16:00	135	2,25	0,09	DSA-5kHz-12V-28dB	261,0	263,8
1	2	16:05	140	2,33	0,10	SA-5kHz-12V-14dB	261,0	263,8
1	5	18:11	266	4,43	0,18	DSA-5kHz-12V-14dB	279,0	282,0
1	5	18:13	268	4,47	0,19	O-3kHz-12V-14dB	284,0	287,0
1	6	18:57	312	5,20	0,22	DSA-5kHz-12V-14dB	284,0	287,0
1	7	20:12	387	6,45	0,27	DSA-8kHz-12V-14dB	285,0	288,0
1	7	20:17	392	6,53	0,27	SA-5kHz-12V-14dB	284,0	287,0
1	9	22:48	543	9,05	0,38	DSA-8kHz-12V-14dB	296,0	299,1
1	9	23:01	556	9,27	0,39	SA-5kHz-12V-14dB	295,0	298,1
2	10	00:00	615	10,25	0,43	DSA-8kHz-12V-14dB	298,0	301,2
2	11	08:35	1130	18,83	0,78	DSA-5kHz-12V-14dB	319,0	322,4
2	11	08:38	1133	18,88	0,79	O-3kHz-12V-14dB	317,0	320,4
2	13	11:23	1298	21,63	0,90	DSA-5kHz-12V-14dB	319,0	322,4
2	14	14:00	1455	24,25	1,01	O-3kHz-12V-14dB	323,0	326,4
2	14	13:54	1449	24,15	1,01	DSA-5kHz-12V-14dB	320,0	323,4
2	16	21:50	1925	32,08	1,34	SA-5kHz-12V-14dB	324,0	327,4
2	17	23:53	2048	34,13	1,42	DSA-5kHz-12V-14dB	329,0	332,5
3	18	11:42	2757	45,95	1,91	DSA-5kHz-12V-14dB	329,0	332,5
3	18	11:46	2761	46,02	1,92	SA-5kHz-12V-14dB	333,0	336,5
3	20	17:04	3079	51,32	2,14	O-4kHz-12V-14dB	335,0	338,6
3	20	17:02	3077	51,28	2,14	DSA-8kHz-12V-14dB	337,0	340,6
4	23	18:36	4611	76,85	3,20	SA-5kHz-12V-14dB	347,0	350,7
4	23	18:32	4607	76,78	3,20	DSA-10kHz-12V-14dB	346,0	349,7
5	24	12:03	5658	94,30	3,93	DSA-8kHz-12V-14dB	347,0	350,7
6	25	10:17	6992	116,53	4,86	DSA-8kHz-12V-14dB	349,0	352,7
8	26	15:39	10194	169,90	7,08	SA-5kHz-12V-14dB	354,0	357,8
9	27	15:53	11648	194,13	8,09	SA-4kHz-12V-14dB	356,0	359,8
12	30	15:20	15935	265,58	11,07	SA-5kHz-12V-14dB	354,0	357,8
12	30	15:17	15932	265,53	11,06	DSA-8kHz-12V-14dB	354,0	357,8
16	31	17:14	21809	363,48	15,15	DSA-5kHz-12V-14dB	356,0	359,8
16	31	17:14	21809	363,48	15,15	DSA-8kHz-12V-14dB	358,0	361,8
16	31	17:22	21817	363,62	15,15	SA-5kHz-12V-14dB	356,0	359,8

Tableau-A A-4 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 51-45 mm, Plaque 1

Heure de fin de compactage : 13:45						Hauteur d'analyse 48,00 mm Hauteur réelle 51,94 mm		
Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Signal émis	Vs exp.	Vs réelle
			Minute	Heure	Jour			
1	1	15:27	102	1,70	0,07	DSA-3kHz-12V-14dB	231,0	250,0
1	1	15:28	103	1,72	0,07	DSA-8kHz-V-dB	230,0	248,9
1	2	16:10	145	2,42	0,10	DSA-5kHz-12V-14dB	236,0	255,4
1	3	16:49	184	3,07	0,13	DSA-3kHz-12V-14dB	238,0	257,5
1	3	16:49	184	3,07	0,13	DSA-5kHz-12V-14dB	240,0	259,7
1	4	17:24	219	3,65	0,15	DSA-3kHz-12V-14dB	244,0	264,0
1	5	18:30	285	4,75	0,20	DSA-3kHz-12V-14dB	256,0	277,0
1	5	18:30	285	4,75	0,20	DSA-8kHz-12V-14dB	264,0	285,7
1	6	19:08	323	5,38	0,22	O-3kHz-12V-14dB	267,0	288,9
1	6	19:05	320	5,33	0,22	DSA-5kHz-12V-14dB	270,0	292,2
2	11	07:42	1077	17,95	0,75	DSA-5kHz-12V-14dB	301,0	325,7
2	12	10:47	1262	21,03	0,88	O-3kHz-12V-14dB	304,0	329,0
2	12	10:44	1259	20,98	0,87	DSA-3kHz-12V-14dB	303,0	327,9
2	13	11:38	1313	21,88	0,91	DSA-5kHz-12V-14dB	308,0	333,3
2	13	11:48	1323	22,05	0,92	SA-5kHz-12V-14dB	308,0	333,3
2	14	14:15	1470	24,50	1,02	SA-2kHz-12V-14dB	311,0	336,5
2	15	17:30	1665	27,75	1,16	DSA-5kHz-12V-14dB	313,0	338,7
3	18	11:51	2766	46,10	1,92	DSA-3kHz-12V-14dB	321,0	347,3
3	18	11:55	2770	46,17	1,92	SA-4kHz-12V-14dB	322,0	348,4
3	20	17:13	3088	51,47	2,14	O-2kHz-12V-14dB	326,0	352,8
3	20	17:10	3085	51,42	2,14	DSA-3kHz-12V-14dB	325,0	351,7
6	25	10:36	7011	116,85	4,87	DSA-8kHz-12V-14dB	328,0	354,9
8	26	15:44	10199	169,98	7,08	DSA-6kHz-12V-14dB	333,0	360,3
9	27	15:57	11652	194,20	8,09	DSA-5kHz-12V-14dB	335,0	362,5
12	30	15:24	15939	265,65	11,07	DSA-5kHz-12V-14dB	338,0	365,7
17	32	15:45	23160	386,00	16,08	O-2kHz-12V-14dB	341,0	369,0

Tableau-A A-5 Récapitulatif des données de perte d'eau et de la température de surface en fonction du temps, Plaque 2

Heure de fin de compactage : 14:00							
Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température de surface(°C)
			Minute	Heure	Jour		
1	1	15:00	60	1,00	0,04	0	
1	2	15:12	72	1,20	0,05	3	20,0
1	3	15:41	101	1,68	0,07	33	
1	4	16:05	125	2,08	0,09	41	20,1
1	5	16:07	127	2,12	0,09	42	19,7
1	6	16:43	163	2,72	0,11	51	19,5
1	7	17:13	193	3,22	0,13	58	19,1
1	8	18:11	251	4,18	0,17	69	19,0
1	9	18:40	280	4,67	0,19	76	
1	10	18:45	285	4,75	0,20	77	
1	11	19:22	322	5,37	0,22	84	19,0
1	12	19:45	345	5,75	0,24	88	18,7
2	13	09:15	1155	19,25	0,80	239	19,0
2	14	09:37	1177	19,62	0,82	243	19,0
2	15	09:40	1180	19,67	0,82	244	
2	16	11:16	1276	21,27	0,89	258	19,2
2	17	11:50	1310	21,83	0,91	268	19,2
2	18	12:18	1338	22,30	0,93	273	19,05
2	19	13:13	1393	23,22	0,97	283	19,3
2	20	14:21	1461	24,35	1,01	295	19,3
2	21	14:52	1492	24,87	1,04	302	19,3
2	22	16:13	1573	26,22	1,09	318	
2	23	16:55	1615	26,92	1,12	324	20,0
2	24	17:39	1659	27,65	1,15	330	
2	25	18:30	1710	28,50	1,19	342	
2	26	18:39	1719	28,65	1,19	343	
3	27	09:11	2591	43,18	1,80	413	22,8
3	28	09:54	2634	43,90	1,83	418	22,8
3	29	10:29	2669	44,48	1,85	420	22,5
3	30	11:00	2700	45,00	1,88	422	
3	31	11:31	2731	45,52	1,90	424	22,2
3	32	12:01	2761	46,02	1,92	426	22,3
3	33	12:31	2791	46,52	1,94	427	
3	34	14:09	2889	48,15	2,01	431	22,3
3	35	14:43	2923	48,72	2,03	432	
3	36	15:04	2944	49,07	2,04	433	

Tableau-A A-5 Récapitulatif des données de perte d'eau et de la température de surface en fonction du temps, Plaque 2 (suite)

Heure de fin de compaction : 14:00							
Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température de surface(°C)
			Minute	Heure	Jour		
3	37	15:25	2965	49,42	2,06	434	
3	38	15:38	2978	49,63	2,07	435	
3	39	16:22	3022	50,37	2,10	437	
3	40	16:44	3044	50,73	2,11	438	
3	41	17:33	3093	51,55	2,15	440	
3	42	17:46	3106	51,77	2,16	441	
3	43	18:01	3121	52,02	2,17	441	
4	44	09:07	4027	67,12	2,80	464	22,4
4	45	09:43	4063	67,72	2,82	466	22,4
4	46	11:15	4155	69,25	2,89	468	
4	47	14:54	4374	72,90	3,04	471	22,4
4	48	15:36	4416	73,60	3,07	472	22,5
4	49	16:48	4488	74,80	3,12	476	
4	50	17:24	4524	75,40	3,14	477	22,7
4	51	18:17	4577	76,28	3,18	478	22,7
4	52	19:18	4638	77,30	3,22	479	22,7
5	53	10:56	5576	92,93	3,87	491	22,3
5	54	11:35	5615	93,58	3,90	492	22,5
5	55	12:25	5665	94,42	3,93	492	22,5
5	56	14:03	5763	96,05	4,00	493	22,8
5	57	15:29	5849	97,48	4,06	495	
5	58	16:14	5894	98,23	4,09	496	22,5
5	59	16:49	5929	98,82	4,12	497	22,3
6	60	12:37	7117	118,62	4,94	512	22,1
6	61	13:08	7148	119,13	4,96	512	22,1
8	62	12:00	9960	166,00	6,92	537	22,7
8	63	12:33	9993	166,55	6,94	537	22,6
8	64	16:52	10252	170,87	7,12	538	22,3
9	65	11:30	11370	189,50	7,90	545	22,4
9	66	14:12	11532	192,20	8,01	546	22,4
9	67	16:18	11658	194,30	8,10	547	22,4
10	68	15:15	13035	217,25	9,05	556	22,4
10	69	15:54	13074	217,90	9,08	556	22,4
11	70	13:32	14372	239,53	9,98	562	22,4
11	71	14:00	14400	240,00	10,00	562	22,4
12	72	12:00	15720	262,00	10,92	570	23,5

Tableau-A A-5 Récapitulatif des données de perte d'eau et de la température de surface en fonction du temps, Plaque 2 (suite)

Heure de fin de compactage : 14:00							
Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température de surface(°C)
			Minute	Heure	Jour		
15	73	16:59	20339	338,98	14,12	586	22,5
16	74	14:56	21656	360,93	15,04	589	22,6
17	75	11:17	22877	381,28	15,89	592	22,7
17	76	17:39	23259	387,65	16,15	593	22,4
18	77	17:57	24717	411,95	17,16	596	22,4
19	78	15:41	26021	433,68	18,07	597	22,7
22	79	18:00	30480	508,00	21,17	600	22,5
38	80	15:19	53359	889,32	37,05	603	22,5

Tableau-A A-6 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 38-34 mm, Plaque 2

Jour	Essai	Heure	Fin de compactage : 14:00			Hauteur d'analyse 48,00 mm Hauteur réelle 51,43 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
1	1	15:45	105	1,75	0,07	DSA-8kHz-12V-28dB	249,0	266,8
1	1	16:01	121	2,02	0,08	S-5kHz-12V-28dB	250,0	267,9
1	1	15:45	105	1,75	0,07	DSA-5kHz-12V-28dB	245,0	262,5
1	2	17:03	183	3,05	0,13	DSA-5kHz-12V-28dB	277,0	296,8
1	2	17:11	191	3,18	0,13	SA-4kHz-12V-28dB	272,0	291,5
1	3	17:58	238	3,97	0,17	DSA-5kHz-12V-14dB	281,0	301,1
1	4	19:11	311	5,18	0,22	DSA-5kHz-12V-28dB	282,0	302,2
1	4	19:12	312	5,20	0,22	O-2kHz-12V-28dB	281,0	301,1
2	9	09:31	1171	19,52	0,81	DSA-5kHz-12V-28dB	307,0	329,0
2	9	09:36	1176	19,60	0,82	S-5kHz-12V-28dB	306,0	327,9
2	10	11:41	1301	21,68	0,90	DSA-4kHz-12V-14dB	312,0	334,3
2	11	13:37	1417	23,62	0,98	DSA-4kHz-12V-14dB	313,0	335,4
2	13	17:27	1647	27,45	1,14	SA-4kHz-12V-14dB	314,0	336,5
2	13	17:19	1639	27,32	1,14	DSA-4kHz-12V-14dB	314,0	336,5
2	14	18:55	1735	28,92	1,20	DSA-5kHz-12V-14dB	318,0	340,8
2	16	22:59	1979	32,98	1,37	DSA-5kHz-12V-14dB	318,0	340,8
3	17	09:32	2612	43,53	1,81	DSA-5kHz-12V-14dB	322,0	345,0
3	18	12:16	2776	46,27	1,93	DSA-5kHz-12V-14dB	327,0	350,4
3	19	17:55	3115	51,92	2,16	DSA-5kHz-12V-14dB	336,0	360,0
4	20	09:35	4055	67,58	2,82	DSA-4kHz-12V-14dB	338,0	362,2
4	20	09:36	4056	67,60	2,82	O-2kHz-12V-14dB	337,0	361,1
4	20	09:36	4056	67,60	2,82	O-4kHz-12V-14dB	337,0	361,1
4	21	15:20	4400	73,33	3,06	DSA-5kHz-12V-14dB	337,0	361,1
5	23	11:16	5596	93,27	3,89	DSA-5kHz-12V-14dB	338,0	362,2
5	24	16:37	5917	98,62	4,11	DSA-5kHz-12V-14dB	338,0	362,2
6	25	12:52	7132	118,87	4,95	DSA-4kHz-12V-14dB	346,0	370,8
8	26	12:26	9986	166,43	6,93	SA-4kHz-12V-14dB	347,0	371,8
8	26	12:21	9981	166,35	6,93	DSA-5kHz-12V-14dB	346,0	370,8
9	27	16:00	11640	194,00	8,08	DSA-5kHz-12V-14dB	348,0	372,9
10	28	15:29	13049	217,48	9,06	DSA-4kHz-12V-14dB	343,0	367,5
12	30	12:15	15735	262,25	10,93	DSA-5kHz-12V-14dB	348,0	372,9
12	30	12:17	15737	262,28	10,93	O-2,5kHz-12V-14dB	346,0	370,8
15	31	17:13	20353	339,22	14,13	DSA-5kHz-12V-14dB	346,0	370,8
17	32	18:01	23281	388,02	16,17	DSA-5kHz-12V-14dB	351,0	376,1
38	33	15:42	53382	889,70	37,07	DSA-5kHz-12V-14dB	355,0	380,4
38	33	15:43	53383	889,72	37,07	O-2kHz-12V-14dB	355,0	380,4

Tableau-A A-7 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 51-45 mm, Plaque 2

Jour	Essai	Heure	Fin de compactage : 14:00			Hauteur d'analyse 48,00 mm Hauteur réelle 51,43 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
1	1	15:24	84	1,40	0,06	DSA-3kHz-12V-14dB	244,0	268,3
1	1	15:24	84	1,40	0,06	DSA-5kHz-12V-14dB	241,0	265,0
1	2	16:48	168	2,80	0,12	DSA-3kHz-12V-14dB	255,0	280,4
1	2	16:55	175	2,92	0,12	SA-2kHz-12V-28dB	256,0	281,5
1	4	18:59	299	4,98	0,21	O-2kHz-12V-28dB	267,0	293,6
1	4	18:54	294	4,90	0,20	DSA-3kHz-12V-28dB	270,0	296,9
1	6	23:19	559	9,32	0,39	DSA-5kHz-12V-28dB	280,0	307,9
1	6	23:26	566	9,43	0,39	O-2kHz-12V-28dB	279,0	306,8
1	6	23:28	568	9,47	0,39	SA-2kHz-12V-8dB	284,0	312,3
2	8	08:04	1084	18,07	0,75	S-3kHz-12V-28dB	294,0	323,3
2	10	11:30	1290	21,50	0,90	DSA-4kHz-12V-28dB	289,0	317,8
2	11	13:24	1404	23,40	0,98	DSA-4kHz-12V-14dB	295,0	324,4
2	13	17:10	1630	27,17	1,13	O-2kHz-12V-14dB	300,0	329,9
2	13	17:14	1634	27,23	1,13	SA-2kHz-12V-14dB	302,0	332,1
2	13	17:09	1629	27,15	1,13	DSA-4kHz-12V-14dB	299,0	328,8
3	18	12:07	2767	46,12	1,92	DSA-4kHz-12V-14dB	306,0	336,5
3	18	12:10	2770	46,17	1,92	SA-2kHz-12V-14dB	308,0	345,1
3	18	12:08	2768	46,13	1,92	O-2kHz-12V-14dB	309,0	339,8
4	20	09:25	4045	67,42	2,81	DSA-4kHz-12V-14dB	318,0	349,7
4	20	09:27	4047	67,45	2,81	O-2kHz-12V-14dB	319,0	350,8
4	22	18:40	4600	76,67	3,19	DSA-4kHz-12V-14dB	327,0	359,6
5	24	16:32	5912	98,53	4,11	SA-2kHz-12V-14dB	324,0	356,3
5	24	16:30	5910	98,50	4,10	DSA-4kHz-12V-14dB	323,0	355,2
6	25	12:44	7124	118,73	4,95	DSA-4kHz-12V-14dB	325,0	357,4
10	28	15:22	13042	217,37	9,06	DSA-4kHz-12V-14dB	329,0	361,7
10	28	15:24	13044	217,40	9,06	O-2kHz-12V-14dB	330,0	362,8
12	30	12:09	15729	262,15	10,92	DSA-4kHz-12V-14dB	330,0	362,8
12	30	12:11	15731	262,18	10,92	O-2kHz-12V-14dB	330,0	362,8
15	31	17:05	20345	339,08	14,13	DSA-4kHz-12V-14dB	332,0	365,0
38	33	15:35	53375	889,58	37,07	DSA-2,5kHz-12V-14dB	331,0	363,9
38	33	16:58	53458	890,97	37,12	O-1,5kHz-12V-14dB	332,0	365,0
38	33	15:27	53367	889,45	37,06	DSA-3kHz-12V-14dB	332,0	365,0

APPENDICE B

DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LE SPÉCIMEN C-12 – CHAPITRE 5

Sont présentées : les données de la mesure de la perte d'eau, de la mesure de la température de surface, et les données de V_s considérées pour tracer les graphiques du Chapitre 5.

Heure de fin de compactage : 19:09

Tableau-A B-1 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen C-12

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température extérieure (°C)
			Minute	Heure	Jour		
1	0	19:13	4	0,07	0,00	0,00	n.a.
1	1	19:20	11	0,18	0,01	0,88	21,5
1	2	19:27	18	0,30	0,01	1,19	21,5
1	3	19:32	23	0,38	0,02	1,36	21,4
1	4	19:37	28	0,47	0,02	1,57	21,4
1	5	19:42	33	0,55	0,02	1,74	21,4
1	6	19:47	38	0,63	0,03	1,94	21,4
1	7	19:52	43	0,72	0,03	2,11	21,4
1	8	20:06	57	0,95	0,04	2,65	21,4
1	9	20:17	68	1,13	0,05	3,09	21,5
1	10	20:33	84	1,40	0,06	3,82	21,4
1	11	20:49	100	1,67	0,07	4,52	21,3
1	12	21:03	114	1,90	0,08	4,99	21,2
1	13	21:20	131	2,18	0,09	5,54	21,2
1	14	21:38	149	2,48	0,10	6,23	21,2
1	15	21:59	170	2,83	0,12	6,93	21,0
1	16	22:18	189	3,15	0,13	7,51	21,0
1	17	22:49	220	3,67	0,15	8,32	20,7
1	18	23:19	250	4,17	0,17	8,84	21,2
2	19	00:05	296	4,93	0,21	9,61	21,8
2	20	00:48	339	5,65	0,24	10,39	22,0
2	21	01:46	397	6,62	0,28	11,52	22,3
2	22	02:35	446	7,43	0,31	12,37	22,5
2	24	06:33	684	11,40	0,48	15,07	22,3
2	25	09:37	868	14,47	0,60	16,84	21,0
2	26	12:36	1047	17,45	0,73	17,75	20,8

Tableau-A B-1 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen C-12 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température extérieure (°C)
			Minute	Heure	Jour		
2	27	16:41	1292	21,53	0,90	18,59	20,7
2	28	20:19	1510	25,17	1,05	19,20	21,1
2	29	23:53	1724	28,73	1,20	19,50	21,2
3	30	06:44	2135	35,58	1,48	20,45	22,3
3	31	12:33	2484	41,40	1,73	20,70	20,9
3	32	18:27	2838	47,30	1,97	21,00	20,8
4	33	00:13	3184	53,07	2,21	21,10	21,3
4	34	08:42	3693	61,55	2,56	21,85	21,3
4	35	16:22	4153	69,22	2,88	22,50	21,2
4	36	23:52	4603	76,72	3,20	23,23	21,5
5	37	10:12	5223	87,05	3,63	23,74	21,0
5	38	20:16	5827	97,12	4,05	23,71	21,4
6	39	08:09	6540	109,00	4,54	24,27	22,7
6	40	19:14	7205	120,08	5,00	24,20	21,4
7	41	16:22	8473	141,22	5,88	24,61	21,3
9	42	16:00	11331	188,85	7,87	25,04	21,0
11	43	16:02	14213	236,88	9,87	24,90	21,0
14	44	17:17	18608	310,13	12,92	27,90	21,4
17	45	16:24	22875	381,25	15,89	28,54	20,8
21	46	15:49	28600	476,67	19,86	28,58	20,9
25	47	15:31	34342	572,37	23,85	30,08	20,4
31	48	15:48	42999	716,65	29,86	27,55	20,4

Tableau-A B-2 Récapitulatif des données de température de surface
pour le spécimen C-12

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			T. ext. (°C)	Température 1 (°C)			Température 2 (°C)		
			Minute	Heure	Jour		Moy.	Réf.	Corrigée	S1	Réf.	Corrigée
1	1	19:23	14	0,23	0,01	21,5	23,0	22,9	21,6	24,2	23,2	22,5
1	2	19:29	20	0,33	0,01	21,5	22,1	21,8	21,8	21,9	21,6	21,8
1	3	19:33	24	0,40	0,02	21,4	21,1	21,6	20,9	21,3	21,1	21,6
1	4	19:38	29	0,48	0,02	21,4	20,5	21,0	20,9	20,8	20,9	21,3
1	5	19:43	34	0,57	0,02	21,4	20,2	20,9	20,7	20,5	20,9	21,0
1	6	19:48	39	0,65	0,03	21,4	19,6	20,6	20,4	19,7	20,3	20,8
1	7	19:53	44	0,73	0,03	21,4	19,1	20,5	20,0	19,3	20,3	20,4
1	8	20:08	59	0,98	0,04	21,4	18,2	20,2	19,4	18,4	19,8	20,0
1	9	20:20	71	1,18	0,05	21,5	18,0	19,7	19,8	18,4	19,7	20,2
1	10	20:34	85	1,42	0,06	21,4	17,8	20,1	19,1	17,7	19,8	19,3
1	11	20:50	101	1,68	0,07	21,3	17,0	19,6	18,7	17,0	19,2	19,1
1	12	21:03	114	1,90	0,08	21,2	16,7	19,8	18,1	16,7	19,3	18,6
1	13	21:21	132	2,20	0,09	21,2	16,8	19,5	18,5	16,8	19,5	18,5
1	14	21:39	150	2,50	0,10	21,2	16,8	19,5	18,5	16,4	19,5	18,1
1	15	22:00	171	2,85	0,12	21,0	16,7	19,3	18,4	16,7	19,4	18,3
1	16	22:19	190	3,17	0,13	21,0	16,6	19,2	18,4	16,6	19,5	18,1
1	17	22:53	224	3,73	0,16	20,7	18,7	21,5	17,9	18,7	21,6	17,8
1	18	23:20	251	4,18	0,17	21,2	19,6	22,3	18,5	19,7	22,6	18,3
2	19	00:07	299	4,98	0,21	21,8	20,3	23,2	18,9	20,6	23,5	18,9
2	20	00:51	342	5,70	0,24	22,0	21,4	24,5	18,9	21,5	24,0	19,5
2	21	01:45	397	6,61	0,28	22,3	21,4	24,7	19,0	20,9	23,7	19,5
2	22	02:38	449	7,48	0,31	22,5	n.a.	n.a.	n.a.	21,5	24,1	19,9
2	23	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
2	24	06:45	696	11,60	0,48	22,3	22,8	24,2	20,9	21,8	23,2	20,9
2	25	09:40	871	14,52	0,60	21,0	21,2	21,7	20,5	21,2	21,7	20,5
2	26	12:41	1052	17,53	0,73	20,8	22,1	22,5	20,4	22,3	22,6	20,5
2	27	16:40	1291	21,52	0,90	20,7	22,6	23,8	19,5	22,1	22,2	20,6
2	28	20:19	1510	25,17	1,05	21,1	21,7	22,2	20,6	21,5	21,9	20,7
2	29	23:56	1727	28,78	1,20	21,2	22,1	22,9	20,4	22,0	22,5	20,7
3	30	06:42	2134	35,57	1,48	22,3	23,2	23,5	22,0	23,2	23,0	22,5
3	31	12:35	2487	41,44	1,73	20,9	20,6	20,2	21,3	22,0	22,2	20,7
3	32	18:29	2840	47,33	1,97	20,8	22,2	22,4	20,6	22,1	22,0	20,9
4	33	00:14	3186	53,10	2,21	21,3	22,1	22,8	20,6	22,3	23,0	20,6
4	34	08:46	3697	61,62	2,57	21,3	22,9	22,6	21,6	22,5	22,1	21,7
4	35	16:23	4155	69,25	2,89	21,2	22,1	22,7	20,6	22,5	22,5	21,2
4	36	23:54	4606	76,76	3,20	21,5	23,0	23,2	22,0	22,6	22,9	21,2
5	37	10:15	5226	87,10	3,63	21,0	22,3	22,2	21,1	22,2	21,8	21,4

Tableau-A B-2 Récapitulatif des données de température de surface
pour le spécimen C-12 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			T. ext. (°C)	Température 1 (°C)			Température 2 (°C)		
			Minute	Heure	Jour		Moy.	Réf.	Corrigée	S1	Réf.	Corrigée
5	38	20:17	5828	97,13	4,05	21,4	22,2	22,4	21,2	22,4	22,3	21,5
6	39	08:43	6574	109,57	4,57	22,7	24,6	24,0	23,3	24,6	23,9	23,4
6	40	19:10	7201	120,02	5,00	21,4	22,3	22,3	21,4	22,2	22,3	21,3
7	41	16:17	8468	141,14	5,88	21,3	19,3	18,6	22,0	22,3	22,3	21,3
9	42	15:27	11298	188,30	7,85	20,8	24,2	24,3	20,7	24,2	24,0	21,0

Tableau-A B-3 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 19-16 mm, spécimen C-12

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 75,12 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
0	13	21:12	123	2,05	0,09	GAU-15kHz-12V-42dB	399,0	399,6
0	14	21:36	147	2,45	0,10	GAU-15kHz-12V-42dB	405,0	405,6
0	14	21:35	146	2,43	0,10	SA-15kHz-12V-42dB	397,0	397,6
0	15	21:55	166	2,77	0,12	DSA-25kHz-12V-42dB	400,0	400,6
0	16	22:15	186	3,10	0,13	DSA-15kHz-12V-42dB	417,0	417,7
0	16	22:15	186	3,10	0,13	SA-15kHz-12V-42dB	411,0	411,7
0	18	23:07	238	3,97	0,17	GAU-15kHz-12V-42dB	441,0	441,7
0	18	23:09	240	4,00	0,17	SA-10kHz-12V-42dB	432,0	432,7
0	18	23:07	238	3,97	0,17	GAU-25kHz-12V-42dB	439,0	439,7
0	19	23:41	272	4,53	0,19	DSA-15kHz-12V-42dB	439,0	439,7
0	19	23:39	270	4,50	0,19	SA-10kHz-12V-42dB	434,0	434,7
1	20	00:32	323	5,38	0,22	O-10kHz-12V-42dB	438,0	438,7
1	21	01:10	361	6,02	0,25	DSA-15kHz-12V-42dB	457,0	457,7
1	21	01:13	364	6,07	0,25	SA-10kHz-12V-42dB	451,0	451,7
1	22	02:05	416	6,93	0,29	GAU-15kHz-12V-28dB	446,0	446,7
1	22	02:06	417	6,95	0,29	SA-10kHz-12V-28dB	449,0	449,7
1	25	06:57	708	11,80	0,49	SA-10kHz-12V-28dB	477,0	477,8
1	25	06:58	709	11,82	0,49	SA-15kHz-12V-28dB	468,0	468,7
1	26	10:17	908	15,13	0,63	SA-10kHz-12V-28dB	481,0	481,8
1	26	10:16	907	15,12	0,63	O-5kHz-12V-42dB	470,0	470,8
1	27	13:13	1084	18,07	0,75	DSA-15kHz-12V-42dB	500,0	500,8
1	27	13:12	1083	18,05	0,75	SA-10kHz-12V-42dB	502,0	502,8
1	28	17:02	1313	21,88	0,91	O-10kHz-12V-28dB	492,0	492,8
1	28	17:00	1311	21,85	0,91	DSA-25kHz-12V-28dB	483,0	483,8
1	28	17:01	1312	21,87	0,91	SA-15kHz-12V-28dB	487,0	487,8
1	29	20:38	1529	25,48	1,06	DSA-15kHz-12V-42dB	510,0	510,8
1	29	20:40	1531	25,52	1,06	SA-10kHz-12V-42dB	508,0	508,8
2	30	00:06	1737	28,95	1,21	GAU-15kHz-12V-42dB	523,0	523,8
2	30	00:04	1735	28,92	1,20	SA-10kHz-12V-42dB	514,0	514,8
2	31	07:05	2156	35,93	1,50	SA-10kHz-12V-42dB	513,0	513,8
2	31	07:06	2157	35,95	1,50	DSA-25kHz-12V-42dB	508,0	508,8
2	32	13:12	2523	42,05	1,75	GAU-15kHz-12V-28dB	518,0	518,8
2	32	13:10	2521	42,02	1,75	O-5kHz-12V-28dB	525,0	525,8
2	33	18:57	2868	47,80	1,99	GAU-10kHz-12V-28dB	528,0	528,8
2	33	18:58	2869	47,82	1,99	SA-10kHz-12V-28dB	528,0	528,8
3	34	00:23	3194	53,23	2,22	SA-15kHz-12V-28dB	514,0	514,8

Tableau-A B-3 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 19-16 mm, spécimen C-12 (suite)

Jour	Essai	Heure	Heure de fin de compactage : 19:09			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 75,12 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
3	34	00:22	3193	53,22	2,22	DSA-25kHz-12V-28dB	517,0	517,8
3	35	09:07	3718	61,97	2,58	DSA-15kHz-12V-28dB	517,0	517,8
3	35	09:09	3720	62,00	2,58	SA-10kHz-12V-28dB	509,0	509,8
3	36	16:57	4188	69,80	2,91	GAU-15kHz-12V-28dB	522,0	522,8
3	36	16:59	4190	69,83	2,91	SA-10kHz-12V-28dB	522,0	522,8
4	38	10:55	5266	87,77	3,66	SA-10kHz-12V-42dB	554,0	554,9
4	38	10:55	5266	87,77	3,66	DSA-25kHz-12V-42dB	562,0	562,9
4	39	20:34	5845	97,42	4,06	DSA-15kHz-12V-28dB	564,0	564,9
4	39	20:35	5846	97,43	4,06	GAU-25kHz-12V-28dB	556,0	556,9
5	40	08:38	6569	109,48	4,56	GAU-15kHz-12V-28dB	533,0	533,9
5	40	08:36	6567	109,45	4,56	SA-10kHz-12V-28dB	538,0	538,9
5	41	19:33	7224	120,40	5,02	DSA-10kHz-12V-28dB	554,0	554,9
5	41	19:32	7223	120,38	5,02	DSA-15kHz-12V-28dB	545,0	545,9
5	41	19:32	7223	120,38	5,02	SA-15kHz-12V-28dB	550,0	550,9
6	42	16:51	8502	141,70	5,90	GAU-15kHz-12V-42dB	550,0	550,9
6	42	16:52	8503	141,72	5,90	DSA-25kHz-12V-42dB	557,0	557,9
6	42	16:55	8506	141,77	5,91	SA-10kHz-12V-42dB	546,0	546,9
8	43	15:55	11326	188,77	7,87	DSA-10kHz-12V-28dB	550,0	550,9
8	43	15:57	11328	188,80	7,87	SA-10kHz-12V-28dB	544,0	544,9
10	44	16:31	14242	237,37	9,89	DSA-25kHz-12V-42dB	546,0	546,9
10	44	16:28	14239	237,32	9,89	GAU-15kHz-12V-42dB	544,0	544,9
10	44	16:29	14240	237,33	9,89	O-5kHz-12V-28dB	544,0	544,9
13	45	17:39	18630	310,50	12,94	GAU-15kHz-12V-42dB	568,0	568,9
13	45	17:37	18628	310,47	12,94	SA-10kHz-12V-28dB	565,0	565,9
16	46	16:52	22903	381,72	15,90	O-5kHz-12V-28dB	536,0	536,9
16	46	16:54	22905	381,75	15,91	SA-10kHz-12V-28dB	540,0	540,9
20	47	15:46	28597	476,62	19,86	O-5kHz-12V-28dB	581,0	581,9
20	47	15:47	28598	476,63	19,86	SA-5kHz-12V-28dB	576,0	576,9
24	48	15:43	34354	572,57	23,86	GAU-15kHz-12V-28dB	580,0	580,9
24	48	15:45	34356	572,60	23,86	O-10kHz-12V-28dB	576,0	576,9
30	49	16:13	43024	717,07	29,88	GAU-15kHz-12V-28dB	583,0	583,9
30	49	16:19	43030	717,17	29,88	GAU-15kHz-12V-28dB-2	575,0	575,9
30	49	16:21	43032	717,20	29,88	SA-10kHz-12V-28dB-2	574,0	574,9
30	49	16:21	43032	717,20	29,88	O-10kHz-12V-28dB-2	578,0	578,9

Tableau-A B-4 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm, spécimen C-12

Jour	Essai	Heure	Heure de fin de compactage : 19:09			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 75,12 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
1	8	20:06	57	0,95	0,04	GAU-15kHz-12V-42dB	365,0	365,6
1	8	20:06	57	0,95	0,04	SA-10kHz-12V-42dB	367,0	367,6
1	10	20:30	81	1,35	0,06	O-5kHz-12V-42dB	376,0	376,6
1	11	20:45	96	1,60	0,07	GAU-15kHz-12V-28dB	400,0	400,6
1	11	20:46	97	1,62	0,07	SA-10kHz-12V-28dB-3	395,0	395,6
1	13	21:18	129	2,15	0,09	O-5kHz-12V-42dB	416,0	416,7
1	13	21:18	129	2,15	0,09	SA-10kHz-12V-42dB	418,0	418,7
1	14	21:31	142	2,37	0,10	SA-10kHz-12V-42dB	414,0	414,7
1	15	21:51	162	2,70	0,11	SA-10kHz-12V-42dB	415,0	415,7
1	16	22:10	181	3,02	0,13	GAU-15kHz-12V-42dB	405,0	405,6
1	16	22:09	180	3,00	0,13	SA-10kHz-12V-42dB	402,0	402,6
1	18	23:01	232	3,87	0,16	DSA-25kHz-12V-42dB	415,0	415,7
1	18	23:01	232	3,87	0,16	DSA-25kHz-12V-42dB-2	421,0	421,7
1	18	23:03	234	3,90	0,16	SA-10kHz-12V-42dB	421,0	421,7
1	19	23:32	263	4,38	0,18	GAU-15kHz-12V-42dB	420,0	420,7
1	19	23:30	261	4,35	0,18	SA-10kHz-12V-42dB	416,0	416,7
2	20	00:21	312	5,20	0,22	DSA-15kHz-12V-42dB	435,0	435,7
2	20	00:22	313	5,22	0,22	O-5kHz-12V-42dB	443,0	443,7
2	21	01:03	354	5,90	0,25	GAU-15kHz-12V-42dB	442,0	442,7
2	21	01:04	355	5,92	0,25	SA-10kHz-12V-42dB	442,0	442,7
2	25	06:47	698	11,63	0,48	GAU-10kHz-12V-42dB	458,0	458,7
2	25	06:48	699	11,65	0,49	O-10kHz-12V-28dB	461,0	461,7
2	26	10:03	894	14,90	0,62	GAU-10kHz-12V-28dB	499,0	499,8
2	26	10:03	894	14,90	0,62	SA-10kHz-12V-28dB	499,0	499,8
2	27	12:59	1070	17,83	0,74	GAU-5kHz-12V-28dB	470,0	470,8
2	27	12:57	1068	17,80	0,74	SA-10kHz-12V-28dB	471,0	471,8
2	28	16:54	1305	21,75	0,91	GAU-15kHz-12V-28dB	481,0	481,8
2	28	16:53	1304	21,73	0,91	O-3kHz-12V-28dB	483,0	483,8
2	29	20:32	1523	25,38	1,06	GAU-10kHz-12V-28dB	490,0	490,8
2	29	20:33	1524	25,40	1,06	SA-10kHz-12V-28dB	490,0	490,8
3	31	06:56	2147	35,78	1,49	DSA-10kHz-12V-28dB	496,0	496,8
3	31	06:57	2148	35,80	1,49	GAU-10kHz-12V-28dB	494,0	494,8
3	31	06:59	2150	35,83	1,49	O-10kHz-12V-28dB	497,0	497,8
3	31	06:57	2148	35,80	1,49	GAU-15kHz-12V-28dB	500,0	500,8
3	33	18:50	2861	47,68	1,99	SA-10kHz-12V-28dB	517,0	517,8
3	33	18:52	2863	47,72	1,99	SA-10kHz-12V-28dB	517,0	517,8

Tableau-A B-4 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm, spécimen C-12 (suite)

Heure de fin de compactage : 19:09						Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 75,12 mm		
Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Signal émis	Vs exp.	Vs réelle
			Minute	Heure	Jour			
4	35	09:01	3712	61,87	2,58	GAU-15kHz-12V-28dB	530,0	530,8
4	35	09:01	3712	61,87	2,58	SA-5kHz-12V-28dB	528,0	528,8
4	36	16:48	4179	69,65	2,90	DSA-15kHz-12V-28dB	549,0	549,9
4	36	16:48	4179	69,65	2,90	SA-10kHz-12V-28dB	545,0	545,9
9	43	15:49	11320	188,67	7,86	GAU-15kHz-12V-28dB	540,0	540,9
9	43	15:48	11319	188,65	7,86	SA-10kHz-12V-28dB	542,0	542,9
11	44	16:18	14229	237,15	9,88	GAU-15kHz-12V-28dB	534,0	534,9
11	44	16:21	14232	237,20	9,88	DSA-15kHz-12V-28dB	537,0	537,9
11	44	16:19	14230	237,17	9,88	O-3kHz-12V-28dB	539,0	539,9
11	44	16:20	14231	237,18	9,88	SA-10kHz-12V-28dB	537,0	537,9
14	45	17:32	18623	310,38	12,93	GAU-15kHz-12V-28dB	544,0	544,9
14	45	17:32	18623	310,38	12,93	GAU-10kHz-12V-28dB	548,0	548,9
14	45	17:31	18622	310,37	12,93	SA-10kHz-12V-28dB	546,0	546,9
17	46	17:00	22911	381,85	15,91	GAU-15kHz-12V-28dB	526,0	526,8
17	46	17:02	22913	381,88	15,91	O-3kHz-12V-28dB	529,0	529,8
21	47	15:43	28594	476,57	19,86	SA-10kHz-12V-28dB	561,0	561,9
21	47	15:42	28593	476,55	19,86	DSA-15kHz-12V-28dB	560,0	560,9
25	48	15:48	34359	572,65	23,86	DSA-10kHz-12V-28dB	578,0	578,9
25	48	15:49	34360	572,67	23,86	SA-10kHz-12V-28dB	580,0	580,9
31	49	16:03	43014	716,90	29,87	GAU-10kHz-12V-28dB	571,0	571,9
31	49	16:03	43014	716,90	29,87	SA-10kHz-12V-28dB	567,0	567,9
31	49	16:05	43016	716,93	29,87	O-10kHz-12V-28dB	570,0	570,9
26-22 mm B								
1	28	17:06	1317	21,95	0,91	GAU-15kHz-12V-28dB	474,0	474,8
1	28	17:06	1317	21,95	0,91	O-5kHz-12V-28dB	480,0	480,8
2	33	19:02	2873	47,88	2,00	SA-10kHz-12V-28dB	517,0	517,8
2	33	19:03	2874	47,90	2,00	GAU-5kHz-12V-28dB	512,0	512,8

Tableau-A B-5 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen C-12

Jour	Essai	Heure	Heure de fin de compactage : 19:09			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 75,12 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
1	1	19:19	10	0,17	0,01	GAU-10kHz-12V-42dB	333,0	333,5
1	1	19:20	11	0,18	0,01	SA-5kHz-12V-42dB	326,0	326,5
1	3	19:30	21	0,35	0,01	GAU-10kHz-12V-42dB	346,0	346,6
1	3	19:31	22	0,37	0,02	SA-5kHz-12V-42dB	347,0	347,6
1	4	19:36	27	0,45	0,02	DSA-10kHz-12V-42dB	332,0	332,5
1	5	19:40	31	0,52	0,02	SA-5kHz-12V-42dB	331,0	331,5
1	6	19:46	37	0,62	0,03	DSA-10kHz-12V-42dB	345,0	345,6
1	6	19:45	36	0,60	0,03	GAU-10kHz-12V-42dB	341,0	341,5
1	7	19:50	41	0,68	0,03	DSA-15kHz-12V-42dB	349,0	349,6
1	8	20:01	52	0,87	0,04	DSA-5kHz-12V-28dB	348,0	348,6
1	8	20:02	53	0,88	0,04	O-3kHz-12V-42dB	350,0	350,6
1	9	20:12	63	1,05	0,04	GAU-5kHz-12V-28dB	375,0	375,6
1	9	20:12	63	1,05	0,04	GAU-10kHz-12V-28dB	374,0	374,6
1	10	20:26	77	1,28	0,05	GAU-10kHz-12V-42dB	364,0	364,6
1	10	20:24	75	1,25	0,05	SA-5kHz-12V-28dB	369,0	369,6
1	11	20:38	89	1,48	0,06	GAU-10kHz-12V-42dB	387,0	387,6
1	11	20:39	90	1,50	0,06	O-5kHz-12V-42dB	384,0	384,6
1	12	20:53	104	1,73	0,07	DSA-10kHz-12V-28dB	388,0	388,6
1	12	20:52	103	1,72	0,07	GAU-10kHz-12V-28dB	390,0	390,6
1	13	21:06	117	1,95	0,08	DSA-10kHz-12V-28dB-2	400,0	400,6
1	13	21:06	117	1,95	0,08	DSA-10kHz-12V-28dB	396,0	396,6
1	13	21:07	118	1,97	0,08	SA-10kHz-12V-28dB	395,0	395,6
1	14	21:24	135	2,25	0,09	GAU-5kHz-12V-28dB	405,0	405,6
1	14	21:25	136	2,27	0,09	SA-5kHz-12V-28dB	407,0	407,7
1	15	21:44	155	2,58	0,11	DSA-15kHz-12V-28dB	400,0	400,6
1	15	21:45	156	2,60	0,11	SA-5kHz-12V-28dB	403,0	403,6
1	16	22:03	174	2,90	0,12	GAU-10kHz-12V-28dB	403,0	403,6
1	16	22:04	175	2,92	0,12	O-5kHz-12V-42dB	404,0	404,6
1	17	22:23	194	3,23	0,13	GAU-5kHz-12V-28dB	423,0	423,7
1	17	22:22	193	3,22	0,13	SA-5kHz-12V-28dB	420,0	420,7
1	18	22:55	226	3,77	0,16	DSA-10kHz-12V-28dB	433,0	433,7
1	18	22:55	226	3,77	0,16	SA-5kHz-12V-28dB	433,0	433,7
1	19	23:23	254	4,23	0,18	DSA-10kHz-12V-28dB	446,0	446,7
1	19	23:24	255	4,25	0,18	O-3kHz-12V-28dB	444,0	444,7
2	20	00:10	301	5,02	0,21	GAU-10kHz-12V-28dB	439,0	439,7
2	20	00:13	304	5,07	0,21	SA-5kHz-12V-28dB	440,0	440,7

Tableau-A B-5 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen C-12 (suite)

Heure de fin de compactage : 19:09						Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 75,12 mm		
Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Signal émis	Vs exp.	Vs réelle
			Minute	Heure	Jour			
2	21	00:55	346	5,77	0,24	DSA-10kHz-12V-28dB	444,0	444,7
2	21	00:58	349	5,82	0,24	GAU-3kHz-12V-28dB	449,0	449,7
2	22	01:53	404	6,73	0,28	GAU-10kHz-12V-28dB	455,0	455,7
2	22	01:54	405	6,75	0,28	SA-5kHz-12V-28dB	448,0	448,7
2	25	06:41	692	11,53	0,48	GAU-10kHz-12V-28dB	478,0	478,8
2	25	06:39	690	11,50	0,48	SA-5kHz-12V-28dB	473,0	473,8
2	26	09:48	879	14,65	0,61	GAU-5kHz-12V-28dB	499,0	499,8
2	26	09:51	882	14,70	0,61	DSA-10kHz-12V-28dB	500,0	500,8
2	27	12:46	1057	17,62	0,73	GAU-10kHz-12V-28dB	498,0	498,8
2	27	12:47	1058	17,63	0,73	SA-3kHz-12V-28dB	500,0	500,8
2	28	16:49	1300	21,67	0,90	GAU-10kHz-12V-28dB	509,0	509,8
2	28	16:47	1298	21,63	0,90	SA-5kHz-12V-28dB	509,0	509,8
2	29	20:25	1516	25,27	1,05	DSA-10kHz-12V-28dB	525,0	525,8
2	29	20:26	1517	25,28	1,05	SA-5kHz-12V-28dB	521,0	521,8
2	30	23:59	1730	28,83	1,20	DSA-10kHz-12V-42dB	531,0	531,8
2	30	23:57	1728	28,80	1,20	GAU-5kHz-12V-42dB	520,0	520,8
3	31	06:48	2139	35,65	1,49	GAU-5kHz-12V-42dB	524,0	524,8
3	31	06:49	2140	35,67	1,49	SA-5kHz-12V-28dB	534,0	534,9
3	32	12:47	2498	41,63	1,73	GAU-10kHz-12V-28dB	531,0	531,8
3	32	12:44	2495	41,58	1,73	O-3kHz-12V-28dB	537,0	537,9
3	33	18:38	2849	47,48	1,98	DSA-10kHz-12V-28dB	535,0	535,9
3	33	18:35	2846	47,43	1,98	SA-5kHz-12V-28dB	537,0	537,9
3	33	18:35	2846	47,43	1,98	SA-5kHz-12V-28dB-2	530,0	530,8
4	34	00:19	3190	53,17	2,22	DSA-5kHz-12V-28dB	539,0	539,9
4	34	00:19	3190	53,17	2,22	GAU-10kHz-12V-28dB	540,0	540,9
4	34	00:17	3188	53,13	2,21	SA-10kHz-12V-28dB	538,0	538,9
4	35	08:51	3702	61,70	2,57	DSA-5kHz-12V-28dB	532,0	532,9
4	35	08:53	3704	61,73	2,57	O-3kHz-12V-28dB	535,0	535,9
4	36	16:35	4166	69,43	2,89	O-5kHz-12V-28dB	540,0	540,9
4	36	16:32	4163	69,38	2,89	GAU-10kHz-12V-28dB	541,0	541,9
4	37	00:00	4611	76,85	3,20	GAU-10kHz-12V-28dB	571,0	571,9
4	37	23:59	4610	76,83	3,20	O-5kHz-12V-28dB	573,0	573,9
5	38	10:26	5237	87,28	3,64	DSA-10kHz-12V-28dB	550,0	550,9
5	38	10:28	5239	87,32	3,64	O-10kHz-12V-28dB	561,0	561,9
5	39	20:21	5832	97,20	4,05	SA-5kHz-12V-28dB	560,0	560,9
5	39	20:23	5834	97,23	4,05	O-3kHz-12V-28dB	561,0	561,9

Tableau-A B-5 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen C-12 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 75,12 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
5	39	20:22	5833	97,22	4,05	DSA-10kHz-12V-28dB	556,0	556,9
6	40	08:18	6549	109,15	4,55	GAU-10kHz-12V-28dB	541,0	541,9
6	40	08:17	6548	109,13	4,55	SA-10kHz-12V-28dB	543,0	543,9
6	41	19:27	7218	120,30	5,01	DSA-10kHz-12V-28dB	567,0	567,9
6	41	19:27	7218	120,30	5,01	O-5kHz-12V-28dB	565,0	565,9
7	42	16:31	8482	141,37	5,89	GAU-10kHz-12V-28dB	562,0	562,9
7	42	16:29	8480	141,33	5,89	O-5kHz-12V-28dB	565,0	565,9
9	43	15:40	11311	188,52	7,85	DSA-5kHz-12V-28dB	557,0	557,9
9	43	15:41	11312	188,53	7,86	O-5kHz-12V-28dB	556,0	556,9
9	43	15:42	11313	188,55	7,86	SA-5kHz-12V-28dB	550,0	550,9
11	44	16:15	14226	237,10	9,88	GAU-10kHz-12V-28dB	565,0	565,9
11	44	16:13	14224	237,07	9,88	SA-5kHz-12V-28dB	569,0	569,9
14	45	17:28	18619	310,32	12,93	SA-5kHz-12V-28dB	590,0	590,9
14	45	17:26	18617	310,28	12,93	DSA-5kHz-12V-28dB	587,0	587,9
17	46	16:42	22893	381,55	15,90	SA-5kHz-12V-28dB-2	589,0	589,9
17	46	16:41	22892	381,53	15,90	GAU-15kHz-12V-28dB-2	585,0	585,9
21	47	15:33	28584	476,40	19,85	GAU-10khz-12V-28dB	570,0	570,9
21	47	15:27	28578	476,30	19,85	SA-5kHz-12V-28dB	579,0	579,9
21	47	15:32	28583	476,38	19,85	O-5kHz-12V-28dB	573,0	573,9
25	48	15:56	34367	572,78	23,87	GAU-10kHz-12V-28dB	565,0	565,9
25	48	15:56	34367	572,78	23,87	O-5kHz-12V-28dB	560,0	560,9
31	49	15:56	43007	716,78	29,87	DSA-10kHz-12V-28dB	587,0	587,9
31	49	15:58	43009	716,82	29,87	O-5kHz-12V-28dB	583,0	583,9
31	49	15:59	43010	716,83	29,87	SA-5kHz-12V-28dB	588,0	588,9

APPENDICE C

DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LE SPÉCIMEN C-15 – CHAPITRE 5

Sont présentées : les données de la mesure de la perte d'eau, de la mesure de la température de surface, et les données de V_s considérées pour tracer les graphiques du Chapitre 5.

Heure de fin de compactage : 18:51

Tableau-A C-1 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen C-15

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température extérieure (°C)
			Minute	Heure	Jour		
1	0	18:56	5	0,08	0,00	0,00	21,7
1	1	19:03	12	0,20	0,01	1,15	21,3
1	2	19:09	18	0,30	0,01	1,52	21,3
1	3	19:15	24	0,40	0,02	1,97	21,3
1	4	19:20	29	0,48	0,02	2,52	21,3
1	5	19:25	34	0,57	0,02	2,86	21,3
1	6	19:30	39	0,65	0,03	3,32	21,3
1	7	19:35	44	0,73	0,03	3,82	21,3
1	8	19:42	51	0,85	0,04	4,44	21,3
1	9	19:52	61	1,02	0,04	5,28	21,3
1	10	20:03	72	1,20	0,05	6,20	21,3
1	11	20:18	87	1,45	0,06	7,26	21,4
1	12	20:33	102	1,70	0,07	8,37	21,4
1	13	20:50	119	1,98	0,08	9,26	21,5
1	14	21:03	132	2,20	0,09	9,96	21,5
1	15	21:23	152	2,53	0,11	11,21	21,4
1	16	21:44	173	2,88	0,12	12,45	21,5
1	17	22:03	192	3,20	0,13	13,20	21,5
1	18	22:33	222	3,70	0,15	14,02	21,4
1	19	23:03	252	4,20	0,18	14,74	21,3
1	20	23:48	297	4,95	0,21	15,52	21,9
2	21	00:33	342	5,70	0,24	16,27	22,3
2	22	01:33	402	6,70	0,28	17,09	22,6
2	23	02:33	462	7,70	0,32	17,88	22,8
2	24	04:34	583	9,72	0,40	19,13	23,0
2	25	06:34	703	11,72	0,49	20,17	22,5

Tableau-A C-1 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen C-15 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température extérieure (°C)
			Minute	Heure	Jour		
2	26	09:33	882	14,70	0,61	21,29	21,2
2	27	12:33	1062	17,70	0,74	21,91	21,3
2	28	16:33	1302	21,70	0,90	22,71	21,2
2	29	20:30	1539	25,65	1,07	23,35	20,9
3	30	00:23	1772	29,53	1,23	23,76	21,8
3	31	07:33	2202	36,70	1,53	24,81	22,3
3	32	13:16	2545	42,42	1,77	25,39	21,1
3	33	18:54	2883	48,05	2,00	25,76	21,0
4	34	00:27	3216	53,60	2,23	26,28	22,7
4	35	08:24	3693	60,55	2,52	26,95	22,7
4	36	16:33	4182	68,70	2,86	27,26	21,2
5	37	00:25	4654	76,57	3,19	27,62	22,6
5	38	09:33	5202	85,70	3,57	28,18	21,2
5	39	16:30	5619	92,65	3,86	28,32	21,2
6	40	00:15	6084	100,40	4,18	28,50	22,2
6	41	16:04	7033	116,22	4,84	29,01	21,3
7	42	16:10	8479	140,32	5,85	29,66	21,7
8	43	16:19	9928	164,47	6,85	30,26	21,0
9	44	16:15	11364	188,40	7,85	30,49	21,5
11	45	17:53	14342	238,03	9,92	31,27	21,2
13	46	14:25	17014	282,57	11,77	31,81	21,0
13	47	18:48	17277	286,95	11,96	31,71	21,3
14	48	16:49	18598	308,97	12,87	31,80	21,5
15	49	16:43	20032	332,87	13,87	31,91	21,0
17	50	15:40	22849	379,82	15,83	32,24	21,1
19	51	15:02	25691	427,18	17,80	32,63	21,0
21	52	16:23	28652	476,53	19,86	32,66	21,2
25	53	14:58	34327	571,12	23,80	32,69	21,1
31	54	16:00	43029	716,15	29,84	33,11	21,0

Tableau-A C-2 Récapitulatif des données de température de surface pour le spécimen C-15

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			T. ext. (°C)	Températures 1 (°C)			Température 2 (°C)		
			Minute	Heure	Jour		Moy.	Réf.	Corrigée	S1	Réf.	Corrigée
1	0	18:59	8	0,13	0,01	21,3	16,6	18,6	19,3			
1	1	19:05	14	0,23	0,01	21,3	15,8	19,0	18,1			
1	2	19:10	20	0,33	0,01	21,3	15,5	19,0	17,8			
1	3	19:14	24	0,40	0,02	21,3	15,2	19,0	17,5			
1	4	19:21	31	0,52	0,02	21,3	14,1	18,9	16,5			
1	5	19:26	36	0,60	0,02	21,3	13,6	18,6	16,3			
1	6	19:30	40	0,66	0,03	21,3	13,6	18,9	16,0			
1	7	19:35	45	0,75	0,03	21,3	12,9	18,8	15,4			
1	8	19:43	53	0,88	0,04	21,3	12,6	18,9	15,0			
1	9	19:54	63	1,06	0,04	21,3	12,1	18,7	14,7			
1	10	20:05	74	1,24	0,05	21,3	11,6	18,8	14,1			
1	11	20:19	88	1,47	0,06	21,4	11,9	18,5	14,8			
1	12	20:35	104	1,73	0,07	21,4	11,7	18,5	14,6			
1	15	21:19	148	2,47	0,10	21,4	13,1	19,3	15,2			
1	16	21:39	169	2,81	0,12	21,5	13,8	20,1	15,2			
1	17	21:58	188	3,13	0,13	21,5	14,4	19,9	16,0			
1	18	22:32	221	3,69	0,15	21,4	17,3	21,8	16,9			
1	19	23:02	252	4,19	0,17	21,3	15,8	18,7	18,4			
1	20	23:49	299	4,98	0,21	21,9	16,8	19,1	19,6			
2	21	00:32	342	5,70	0,24	22,3	20,7	23,8	19,2			
2	22	01:35	404	6,74	0,28	22,6	21,3	23,5	20,4			
2	23	02:36	465	7,76	0,32	22,8	21,9	23,5	21,2			
2	24	04:46	596	9,93	0,41	23,0	22,0	23,0	22,0			
2	25	06:36	706	11,76	0,49	22,5	22,8	23,8	21,5			
2	26	09:36	885	14,75	0,61	21,2	22,1	22,8	20,5			
2	27	12:35	1065	17,75	0,74	21,3	22,3	23,8	19,8			
2	28	17:52	1381	23,02	0,96	21,2	22,5	22,8	20,9			
2	29	20:29	1538	25,64	1,07	20,9	20,7	21,0	20,6			
3	30	00:23	1772	29,54	1,23	21,8	22,4	23,8	20,4			
3	31	07:35	2204	36,73	1,53	22,3	23,1	22,8	22,6			
3	32	13:33	2562	42,71	1,78	21,1	21,4	21,2	21,3			
3	33	18:53	2882	48,04	2,00	21,0	22,0	22,3	20,7			
4	34	00:28	3217	53,62	2,23	22,7	24,0	25,0	21,7			
4	35	08:28	3698	60,63	2,53	22,7	23,1	22,8	23,0	23,4	23,3	22,8
4	36	16:37	4187	68,78	2,87	21,2	21,7	21,8	21,1	21,3	21,5	21,0
5	37	00:25	4654	76,57	3,19	22,6	23,2	23,5	22,3	23,4	23,4	22,6
5	38	09:34	5204	85,73	3,57	21,2	21,7	21,4	21,5	21,5	21,2	21,5

Tableau-A C-2 Récapitulatif des données de température de surface pour le spécimen C-15 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			T. ext. (°C)	Températures 1 (°C)			Température 2 (°C)		
			Minute	Heure	Jour		Moy.	Réf.	Corrigée	S1	Réf.	Corrigée
5	39	16:31	5620	92,67	3,86	21,2	22,9	24,7	19,4	21,7	21,9	21,0
6	40	00:17	6087	100,44	4,19	22,2	22,9	23,4	21,7	22,9	23,1	22,0
6	41	16:04	7034	116,23	4,84	21,3	22,1	22,3	21,1	21,8	21,8	21,3
7	42	16:12	8482	140,37	5,85	21,7	22,7	22,8	21,6	22,7	22,5	21,9
8	43	16:21	9931	164,51	6,85	21,0	22,0	21,9	21,1	21,5	21,3	21,2
9	44	16:17	11367	188,44	7,85	21,5	21,6	21,7	21,4	21,2	21,3	21,4
11	45	17:52	14341	238,02	9,92	21,2	21,6	21,6	21,2	21,0	21,0	21,2
13	46	14:28	17018	282,63	11,78	21,3	20,7	20,7	21,3	20,8	20,6	21,5
16	47	15:53	21422	356,04	14,83	21,0	24,5	24,4	21,1	23,9	23,9	21,0
19	48	15:03	25692	427,20	17,80	21,0	23,4	23,5	20,9	23,2	23,2	21,0

Tableau-A C-3 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 19-16 mm, spécimen C-15

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm			
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle	
1	11	20:23	92	1,53	0,06	SA-15kHz-12V-42dB	377,0	374,2	
1	11	20:22	91	1,52	0,06	DSA-15kHz-12V-42dB	377,0	374,2	
1	11	20:23	92	1,53	0,06	SA-10kHz-12V-42dB	377,0	374,2	
1	12	20:38	107	1,78	0,07	DSA-25kHz-12V-42dB	386,0	383,1	
1	12	20:38	107	1,78	0,07	O-5kHz-12V-42dB	382,0	379,1	
1	13	20:54	123	2,05	0,09	O-5kHz-12V-42dB	377,0	374,2	
1	13	20:54	123	2,05	0,09	O-5kHz-12V-42dB-2	376,0	373,2	
1	14	21:08	137	2,28	0,10	SA-15kHz-12V-42dB	384,0	381,1	
1	14	21:09	138	2,30	0,10	O-5kHz-12V-42dB	387,0	384,1	
1	14	21:09	138	2,30	0,10	O-5kHz-12V-42dB	391,0	388,1	
1	15	21:28	157	2,62	0,11	DSA-25kHz-12V-42dB	379,0	376,2	
1	15	21:29	158	2,63	0,11	SA-10kHz-12V-42dB	373,0	370,2	
1	15	21:27	156	2,60	0,11	O-5kHz-12V-42dB	376,0	373,2	
1	16	21:48	177	2,95	0,12	O-5kHz-12V-42dB	383,0	380,1	
1	16	21:48	177	2,95	0,12	O-5kHz-12V-42dB	369,0	366,2	
1	16	21:48	177	2,95	0,12	SA-10kHz-12V-42dB	374,0	371,2	
1	16	21:48	177	2,95	0,12	SA-10kHz-12V-42dB	384,0	381,1	
1	17	22:08	197	3,28	0,14	DSA-25kHz-12V-42dB	383,0	380,1	
1	17	22:08	197	3,28	0,14	DSA-25kHz-12V-42dB	389,0	386,1	
1	17	22:06	195	3,25	0,14	O-10kHz-12V-42dB	380,0	377,2	
1	17	22:06	195	3,25	0,14	SA-5kHz-12V-42dB	383,0	380,1	
1	18	22:38	227	3,78	0,16	DSA-15kHz-12V-42dB	395,0	392,1	
1	18	22:37	226	3,77	0,16	O-5kHz-12V-42dB	388,0	385,1	

Tableau-A C-3 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 19-16 mm, spécimen C-15 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1	19	23:08	257	4,28	0,18	O-10kHz-12V-42dB	401,0	398,0
1	19	23:07	256	4,27	0,18	DSA-25kHz-12V-42dB	405,0	402,0
1	19	23:08	257	4,28	0,18	SA-10kHz-12V-42dB	401,0	398,0
1	20	23:53	302	5,03	0,21	DSA-15kHz-12V-42dB	401,0	398,0
1	20	23:52	301	5,02	0,21	SA-15kHz-12V-42dB	394,0	391,1
2	21	00:39	348	5,80	0,24	DSA-15kHz-12V-42dB	427,0	423,8
2	21	00:37	346	5,77	0,24	SA-5kHz-12V-42dB	421,0	417,9
2	21	00:40	349	5,82	0,24	O-10kHz-12V-42dB	417,0	413,9
2	22	01:39	408	6,80	0,28	SA-10kHz-12V-42dB	424,0	420,8
2	22	01:40	409	6,82	0,28	GAU-15kHz-12V-42dB	429,0	425,8
2	23	02:41	470	7,83	0,33	GAU-15kHz-12V-42dB	428,0	424,8
2	23	02:39	468	7,80	0,33	SA-15kHz-12V-42dB	427,0	423,8
2	24	04:45	594	9,90	0,41	DSA-15kHz-12V-42dB	436,0	432,7
2	24	04:45	594	9,90	0,41	SA-10kHz-12V-42dB	428,0	424,8
2	25	06:42	711	11,85	0,49	GAU-15kHz-12V-42dB	444,0	440,7
2	25	06:43	712	11,87	0,49	SA-10kHz-12V-42dB	435,0	431,8
2	26	09:46	895	14,92	0,62	SA-10kHz-12V-42dB	456,0	452,6
2	26	09:45	894	14,90	0,62	O-5kHz-12V-42dB	453,0	449,6
2	27	12:42	1071	17,85	0,74	DSA-10kHz-12V-28dB	460,0	456,6
2	27	12:39	1068	17,80	0,74	GAU-10kHz-12V-42dB	465,0	461,5
2	28	16:42	1311	21,85	0,91	GAU-15kHz-12V-42dB	475,0	471,5
2	28	16:42	1311	21,85	0,91	SA-10kHz-12V-42dB	465,0	461,5
2	29	20:35	1544	25,73	1,07	DSA-15kHz-12V-42dB	485,0	481,4
2	29	20:35	1544	25,73	1,07	O-5kHz-12V-42dB	476,0	472,4
3	30	00:32	1781	29,68	1,24	DSA-15kHz-12V-42dB	496,0	492,3
3	30	00:29	1778	29,63	1,23	SA-10kHz-12V-28dB	500,0	496,3
3	31	07:41	2210	36,83	1,53	GAU-15kHz-12V-42dB	488,0	484,4
3	31	07:41	2210	36,83	1,53	O-5kHz-12V-42dB	486,0	482,4
3	32	13:25	2554	42,57	1,77	SA-10kHz-12V-42dB	487,0	483,4
3	32	13:23	2552	42,53	1,77	GAU-10kHz-12V-42dB	489,0	485,3
3	33	19:02	2891	48,18	2,01	SA-5kHz-12V-28dB	484,0	480,4
4	34	00:33	3222	53,70	2,24	GAU-10kHz-12V-28dB	473,0	469,5
4	34	00:34	3223	53,72	2,24	O-5kHz-12V-28dB	475,0	471,5
4	35	08:36	3645	60,75	2,53	GAU-10kHz-12V-42dB	489,0	485,3
4	35	08:38	3647	60,78	2,53	SA-10kHz-12V-28B	483,0	479,4
4	36	16:44	4133	68,88	2,87	GAU-15kHz-12V-42dB	509,0	505,2
4	36	16:45	4134	68,90	2,87	O-5kHz-12V-28dB	515,0	511,2
5	37	00:30	4599	76,65	3,19	DSA-10kHz-12V-28dB	487,0	483,4
5	37	00:31	4600	76,67	3,19	SA-10khz-12V-28dB	483,0	479,4
5	38	09:39	5148	85,80	3,58	DSA-15kHz-12V-28dB	488,0	484,4
5	38	09:40	5149	85,82	3,58	GAU-15kHz-12V-28dB	490,0	486,3

Tableau-A C-3 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 19-16 mm, spécimen C-15 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
5	38	09:42	5151	85,85	3,58	SA-5kHz-12V-28dB	495,0	491,3
5	39	16:41	5570	92,83	3,87	GAU-10kHz-12V-28dB	499,0	495,3
5	39	16:39	5568	92,80	3,87	DSA-10kHz-12V-28dB	499,0	495,3
6	40	00:24	6033	100,55	4,19	SA-15kHz-12V-28dB	502,0	498,3
6	40	00:25	6034	100,57	4,19	GAU-5kHz-12V-28dB	503,0	499,2
6	41	16:44	7013	116,88	4,87	DSA-10kHz-12V-28dB	500,0	496,3
6	41	16:43	7012	116,87	4,87	GAU-10kHz-12V-28dB	496,0	492,3
7	42	16:26	8435	140,58	5,86	GAU-15kHz-12V-28dB	499,0	495,3
7	42	16:25	8434	140,57	5,86	SA-10kHz-12V-28dB	499,0	495,3
9	43	16:30	11319	188,65	7,86	SA-10kHz-12V-28dB	487,0	483,4
9	43	16:26	11315	188,58	7,86	DSA-15kHz-12V-28dB	490,0	486,3
9	43	16:28	11317	188,62	7,86	O-5kHz-12V-28dB	487,0	483,4
11	44	18:05	14294	238,23	9,93	O-10kHz-12V-28dB	498,0	494,3
11	44	18:04	14293	238,22	9,93	GAU-15kHz-12V-28dB	504,0	500,2
14	45	16:26	18515	308,58	12,86	DSA-15kHz-12V-28dB	502,0	498,3
14	45	16:28	18517	308,62	12,86	O-5kHz-12V-28dB	507,0	503,2
17	46	15:54	22803	380,05	15,84	DSA-15kHz-12V-28dB	509,0	505,2
17	46	15:55	22804	380,07	15,84	GAU-25kHz-12V-28dB	510,0	506,2
17	46	15:56	22805	380,08	15,84	SA-10kHz-12V-28dB	513,0	509,2
21	47	16:22	28591	476,52	19,85	GAU-10kHz-12V-28dB	501,0	497,3
21	47	16:21	28590	476,50	19,85	O-15kHz-12V-28dB	494,0	490,3
25	48	15:08	34277	571,28	23,80	GAU-10kHz-12V-28dB	499,0	495,3
25	48	15:08	34277	571,28	23,80	GAU-10kHz-12V-28dB	485,0	481,4
25	48	15:10	34279	571,32	23,80	SA-10kHz-12V-28dB	482,0	478,4
31	49	12:58	42787	713,12	29,71	SA-15kHz-12V-28dB	514,0	510,2
31	49	12:57	42786	713,10	29,71	GAU-10kHz-12V-28dB	513,0	509,2
31	49	12:58	42787	713,12	29,71	SA-10kHz-12V-28dB	511,0	507,2

Tableau-A C-4 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm A, spécimen C-15

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1	8	19:47	56	0,93	0,04	DSA-25kHz-12V-42dB	343,0	340,4
1	8	19:46	55	0,92	0,04	DSA-15kHz-12V-42dB	344,0	341,4
1	8	19:46	55	0,92	0,04	SA-10kHz-12V-42dB	342,0	339,4
1	9	20:02	71	1,18	0,05	SA-10kHz-12V-42dB	342,0	339,4
1	9	20:02	71	1,18	0,05	DSA-15kHz-12V-42dB	346,0	343,4
1	10	20:14	83	1,38	0,06	DSA-15kHz-12V-42dB	339,0	336,5
1	10	20:14	83	1,38	0,06	SA-10kHz-12V-42dB	336,0	333,5
1	11	20:31	100	1,67	0,07	O-5kHz-12V-42dB	345,0	342,4
1	11	20:31	100	1,67	0,07	SA-10kHz-12V-42dB	336,0	333,5
1	12	20:48	117	1,95	0,08	SA-10kHz-12V-42dB	347,0	344,4
1	12	20:47	116	1,93	0,08	O-5kHz-12V-42dB	343,0	340,4
1	14	21:18	147	2,45	0,10	DSA-25kHz-12V-42dB	346,0	343,4
1	14	21:18	147	2,45	0,10	DSA-25kHz-12V-42dB	346,0	343,4
1	14	21:19	148	2,47	0,10	O-5kHz-12V-42dB	349,0	346,4
1	15	21:39	168	2,80	0,12	SA-15kHz-12V-42dB	365,0	362,3
1	15	21:37	166	2,77	0,12	O-5kHz-12V-42dB	362,0	359,3
1	16	21:57	186	3,10	0,13	DSA-15kHz-12V-42dB	388,0	385,1
1	16	21:57	186	3,10	0,13	SA-10kHz-12V-42dB	386,0	383,1
1	17	22:19	208	3,47	0,14	DSA-25kHz-12V-42dB	387,0	384,1
1	17	22:20	209	3,48	0,15	O-5kHz-12V-42dB	391,0	388,1
1	18	22:48	237	3,95	0,16	GAU-15kHz-12V-42dB	397,0	394,0
1	18	22:46	235	3,92	0,16	SA-10kHz-12V-42dB	393,0	390,1
1	19	23:15	264	4,40	0,18	GAU-10kHz-12V-42dB	396,0	393,0
1	19	23:17	266	4,43	0,18	SA-10kHz-12V-42dB	395,0	392,1
1	19	23:17	266	4,43	0,18	SA-10kHz-12V-42dB	392,0	389,1
2	20	00:05	314	5,23	0,22	DSA-10kHz-12V-42dB	420,0	416,9
2	20	00:05	314	5,23	0,22	GAU-15kHz-12V-42dB	412,0	408,9
2	20	00:00	309	5,15	0,21	GAU-15kHz-12V-42dB	419,0	415,9
2	21	00:58	367	6,12	0,25	GAU-10kHz-12V-42dB	404,0	401,0
2	21	00:59	368	6,13	0,26	SA-10kHz-12V-42dB	409,0	405,9
2	22	01:53	422	7,03	0,29	DSA-25kHz-12V-42dB	413,0	409,9
2	22	01:55	424	7,07	0,29	SA-10kHz-12V-42dB	411,0	407,9
2	23	02:51	480	8,00	0,33	GAU-10kHz-12V-42dB	408,0	405,0
2	23	02:50	479	7,98	0,33	SA-10kHz-12V-42dB	410,0	406,9
2	24	05:02	611	10,18	0,42	O-5kHz-12V-28dB	420,0	416,9
2	24	05:04	613	10,22	0,43	GAU-15kHz-12V-28dB	421,0	417,9

Tableau-A C-4 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm A, spécimen C-15 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
2	25	06:50	719	11,98	0,50	GAU-15kHz-12V-42dB	423,0	419,8
2	25	06:50	719	11,98	0,50	DSA-15kHz-12V-42dB	424,0	420,8
2	26	10:19	928	15,47	0,64	GAU-10kHz-12V-28dB	439,0	435,7
2	26	10:17	926	15,43	0,64	DSA-15kHz-12V-28dB	441,0	437,7
2	27	12:55	1084	18,07	0,75	GAU-10kHz-12V-28dB	440,0	436,7
2	27	12:57	1086	18,10	0,75	GAU-10kHz-12V-28dB-2	439,0	435,7
2	28	17:08	1337	22,28	0,93	GAU-10kHz-12V-28dB	438,0	434,7
2	28	17:07	1336	22,27	0,93	DSA-15kHz-12V-28dB	440,0	436,7
2	28	17:02	1331	22,18	0,92	O-5kHz-12V-28dB	433,0	429,8
2	29	20:46	1555	25,92	1,08	O-10kHz-12V-28dB	461,0	457,6
2	29	20:47	1556	25,93	1,08	GAU-15kHz-12V-28dB	461,0	457,6
3	30	00:47	1796	29,93	1,25	O-5kHz-12V-28dB	451,0	447,6
3	30	00:48	1797	29,95	1,25	DSA-15kHz-12V-28dB	454,0	450,6
3	31	07:53	2222	37,03	1,54	GAU-15kHz-12V-28dB	453,0	449,6
3	31	07:57	2226	37,10	1,55	SA-10kHz-12V-42dB	458,0	454,6
3	32	13:47	2576	42,93	1,79	DSA-10kHz-12V-42dB	472,0	468,5
3	32	13:48	2577	42,95	1,79	GAU-10kHz-12V-42dB	468,0	464,5
3	32	13:44	2573	42,88	1,79	SA-10kHz-12V-28dB	471,0	467,5
3	33	19:17	2906	48,43	2,02	SA-10kHz-12V-28dB	476,0	472,4
3	33	19:15	2904	48,40	2,02	GAU-10kHz-12V-42dB	475,0	471,5
4	34	00:47	3236	53,93	2,25	DSA-15kHz-12V-28dB	467,0	463,5
4	34	00:46	3235	53,92	2,25	GAU-10kHz-12V-28dB	461,0	457,6
4	35	09:07	3676	61,27	2,55	GAU-15kHz-12V-28dB	467,0	463,5
4	35	09:06	3675	61,25	2,55	SA-10kHz-12V-28dB	462,0	458,6
5	38	10:18	5187	86,45	3,60	GAU-10kHz-12V-28dB	489,0	485,3
5	38	10:17	5186	86,43	3,60	GAU-15kHz-12V-28dB	481,0	477,4
5	38	10:12	5181	86,35	3,60	O-5kHz-12V-28dB	489,0	485,3
5	39	17:12	5601	93,35	3,89	SA-10kHz-12V-28dB	490,0	486,3
5	39	17:12	5601	93,35	3,89	SA-10kHz-12V-28dB	482,0	478,4
5	39	17:14	5603	93,38	3,89	DSA-15kHz-12V-28dB	490,0	486,3
5	39	17:14	5603	93,38	3,89	DSA-15kHz-12V-28dB	484,0	480,4
6	40	00:36	6045	100,75	4,20	DSA-10kHz-12V-28dB	496,0	492,3
6	40	00:35	6044	100,73	4,20	GAU-10kHz-12V-28dB	492,0	488,3
6	41	17:04	7033	117,22	4,88	DSA-15kHz-12V-28dB	495,0	491,3
6	41	17:07	7036	117,27	4,89	GAU-10kHz-12V-28dB	490,0	486,3
7	42	16:45	8454	140,90	5,87	DSA-15kHz-12V-28dB	489,0	485,3

Tableau-A C-4 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm A, spécimen C-15 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
7	42	16:45	8454	140,90	5,87	GAU-5kHz-12V-28dB	495,0	491,3
9	43	16:47	11336	188,93	7,87	DSA-10kHz-12V-28dB	500,0	496,3
9	43	16:49	11338	188,97	7,87	SA-10khz-12V-28dB	502,0	498,3
11	44	18:27	14316	238,60	9,94	DSA-15kHz-12V-28dB	485,0	481,4
11	44	18:28	14317	238,62	9,94	GAU-10kHz-12V-28dB	485,0	481,4
14	45	16:36	18525	308,75	12,86	DSA-10kHz-12V-28dB	486,0	482,4
14	45	16:34	18523	308,72	12,86	GAU-10kHz-12V-28dB	491,0	487,3
17	46	16:21	22830	380,50	15,85	GAU-10kHz-12V-28dB	506,0	502,2
17	46	16:17	22826	380,43	15,85	SA-10kHz-12V-28dB	507,0	503,2
21	47	16:06	28575	476,25	19,84	GAU-5kHz-12V-28dB	498,0	494,3
21	47	16:05	28574	476,23	19,84	DSA-15kHz-12V-28dB	497,0	493,3
25	48	15:22	34291	571,52	23,81	DSA-15kHz-12V-28dB	484,0	480,4
25	48	15:24	34293	571,55	23,81	SA-10kHz-12V-28dB	486,0	482,4
31	49	13:03	42792	713,20	29,72	GAU-5kHz-12V-28dB	499,0	495,3
31	49	13:02	42791	713,18	29,72	SA-10kHz-12V-28dB	500,0	496,3

Tableau-A C-5 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm B, spécimen C-15

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
2	23	02:56	485	8,08	0,34	GAU-15kHz-12V-42dB	422,0	418,8
2	23	02:58	487	8,12	0,34	SA-10kHz-12V-42dB	416,0	412,9
2	24	04:57	606	10,10	0,42	DSA-15kHz-12V-42dB	418,0	414,9
2	25	07:05	734	12,23	0,51	DSA-15kHz-12V-28dB	425,0	421,8
2	25	07:03	732	12,20	0,51	O-5kHz-12V-28dB	431,0	427,8
2	26	09:59	908	15,13	0,63	DSA-10kHz-12V-28dB	449,0	445,6
2	26	10:01	910	15,17	0,63	SA-5kHz-12V-28dB	450,0	446,6
2	27	13:05	1094	18,23	0,76	DSA-15kHz-12V-28dB	429,0	425,8
2	27	13:05	1094	18,23	0,76	GAU-5kHz-12V-28dB	434,0	430,8
2	28	16:49	1318	21,97	0,92	GAU-10kHz-12V-28dB	430,0	426,8
2	28	16:49	1318	21,97	0,92	SA-5kHz-12V-42dB	422,0	418,8
2	29	20:56	1565	26,08	1,09	GAU-10kHz-12V-28dB	453,0	449,6
2	29	20:56	1565	26,08	1,09	O-3kHz-12V-28dB	451,0	447,6
3	30	00:36	1785	29,75	1,24	DSA-15kHz-12V-42dB	436,0	432,7
3	30	00:37	1786	29,77	1,24	SA-5kHz-12V-42dB	441,0	437,7
3	31	08:02	2231	37,18	1,55	GAU-10kHz-12V-28dB	435,0	431,8
3	31	08:01	2230	37,17	1,55	O-3kHz-12V-28dB	436,0	432,7
3	32	13:31	2560	42,67	1,78	O-5kHz-12V-28dB	433,0	429,8
3	32	13:33	2562	42,70	1,78	GAU-10kHz-12V-28dB	442,0	438,7
3	33	19:23	2912	48,53	2,02	SA-5kHz-12V-28dB	472,0	468,5
3	33	19:22	2911	48,52	2,02	GAU-10kHz-12V-28dB	466,0	462,5
3	33	19:21	2910	48,50	2,02	DSA-15kHz-12V-28dB	460,0	456,6
4	34	00:51	3240	54,00	2,25	SA-5kHz-12V-28dB	463,0	459,5
4	34	00:50	3239	53,98	2,25	DSA-10kHz-12V-28dB	468,0	464,5
4	35	08:57	3666	61,10	2,55	GAU-15kHz-12V-28dB	467,0	463,5
4	35	08:59	3668	61,13	2,55	O-5kHz-12V-28dB	472,0	468,5
4	36	16:59	4148	69,13	2,88	GAU-5kHz-12V-28dB	480,0	476,4
4	36	16:58	4147	69,12	2,88	DSA-25kHz-12V-28dB	478,0	474,4
5	37	00:39	4608	76,80	3,20	DSA-15kHz-12V-28dB	456,0	452,6
5	37	00:38	4607	76,78	3,20	O-5kHz-12V-28dB	462,0	458,6
5	38	09:51	5160	86,00	3,58	O-5kHz-12V-28dB	460,0	456,6
5	38	09:54	5163	86,05	3,59	DSA-15kHz-12V-28dB	460,0	456,6
5	39	16:54	5583	93,05	3,88	SA-5kHz-12V-28dB	488,0	484,4
5	39	16:51	5580	93,00	3,88	GAU-25kHz-12V-28dB	483,0	479,4
6	40	00:40	6049	100,82	4,20	GAU-15kHz-12V-28dB	487,0	483,4
6	40	00:41	6050	100,83	4,20	SA-5kHz-12V-28dB	481,0	477,4
6	41	16:50	7019	116,98	4,87	SA-5kHz-12V-28dB	505,0	501,2

Tableau-A C-5 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm B, spécimen C-15 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
7	42	16:38	8447	140,78	5,87	SA-15kHz-12V-28dB	499,0	495,3
7	42	16:36	8445	140,75	5,86	DSA-25kHz-12V-28dB	495,0	491,3
9	43	16:34	11323	188,72	7,86	SA-5kHz-12V-28dB	492,0	488,3
9	43	16:35	11324	188,73	7,86	DSA-25kHz-12V-28dB	490,0	486,3
11	44	18:13	14302	238,37	9,93	GAU-5kHz-12V-28dB	498,0	494,3
14	45	16:42	18531	308,85	12,87	SA-15kHz-12V-28dB	503,0	499,2
14	45	16:43	18532	308,87	12,87	DSA-10kHz-12V-28dB	498,0	494,3
17	46	16:08	22817	380,28	15,85	DSA-10kHz-12V-28dB	519,0	515,1
17	46	16:12	22821	380,35	15,85	SA-5kHz-12V-28dB	520,0	516,1
21	47	15:55	28564	476,07	19,84	DSA-25kHz-12V-28dB	507,0	503,2
21	47	15:55	28564	476,07	19,84	O-5kHz-12V-28dB	511,0	507,2
21	47	15:55	28564	476,07	19,84	O-5kHz-12V-28dB	507,0	503,2
25	48	15:17	34286	571,43	23,81	GAU-10kHz-12V-28dB	498,0	494,3
25	48	15:16	34285	571,42	23,81	O-5kHz-12V-28dB	497,0	493,3
31	49	13:06	42795	713,25	29,72	DSA-10kHz-12V-28dB	506,0	502,2
31	49	13:07	42796	713,27	29,72	SA-10kHz-12V-28dB	506,0	502,2

Tableau-A C-6 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen C-15

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1	1	19:03	12	0,20	0,01	DSA-10kHz-12V-42dB	310,0	307,7
1	1	19:03	12	0,20	0,01	DSA-10kHz-12V-42dB-2	311,0	308,7
1	1	19:04	13	0,22	0,01	SA-5kHz-12V-42dB	311,0	308,7
1	2	19:08	17	0,28	0,01	SA-5kHz-12V-42dB	306,0	303,7
1	2	19:09	18	0,30	0,01	DSA-10kHz-12V-42dB	312,0	309,7
1	3	19:14	23	0,38	0,02	DSA-10kHz-12V-42dB	308,0	305,7
1	3	19:14	23	0,38	0,02	DSA-10kHz-12V-42dB-2	314,0	311,7
1	3	19:13	22	0,37	0,02	O-3kHz-12V-28dB	314,0	311,7
1	4	19:20	29	0,48	0,02	DSA-10kHz-12V-42dB	313,0	310,7
1	4	19:20	29	0,48	0,02	O-3kHz-12V-28dB	312,0	309,7
1	5	19:26	35	0,58	0,02	DSA-10kHz-12V-42dB	310,0	307,7
1	5	19:25	34	0,57	0,02	O-3kHz-12V-28dB	310,0	307,7
1	6	19:30	39	0,65	0,03	DSA-10kHz-12V-42dB	312,0	309,7
1	6	19:31	40	0,67	0,03	O-3kHz-12V-28dB	313,0	310,7
1	7	19:35	44	0,73	0,03	DSA-10kHz-12V-42dB	318,0	315,6
1	7	19:34	43	0,72	0,03	O-3kHz-12V-28dB	312,0	309,7
1	8	19:51	60	1,00	0,04	DSA-10kHz-12V-42dB	342,0	339,4
1	8	19:50	59	0,98	0,04	SA-5kHz-12V-28dB	342,0	339,4
1	9	19:57	66	1,10	0,05	DSA-10kHz-12V-42dB	354,0	351,4
1	10	20:10	79	1,32	0,05	DSA-10kHz-12V-42dB	345,0	342,4
1	10	20:09	78	1,30	0,05	O-5kHz-12V-28dB	344,0	341,4
1	12	20:43	112	1,87	0,08	DSA-15kHz-12V-42dB	366,0	363,3
1	12	20:42	111	1,85	0,08	O-5kHz-12V-42dB	363,0	360,3
1	13	20:59	128	2,13	0,09	DSA-10kHz-12V-42dB	355,0	352,3
1	13	21:00	129	2,15	0,09	O-5kHz-12V-28dB	359,0	356,3
1	14	21:13	142	2,37	0,10	DSA-10kHz-12V-42dB	364,0	361,3
1	14	21:14	143	2,38	0,10	SA-5kHz-12V-42dB	364,0	361,3
1	15	21:33	162	2,70	0,11	DSA-10kHz-12V-42dB	349,0	346,4
1	15	21:33	162	2,70	0,11	SA-5kHz-12V-42dB	349,0	346,4
1	16	21:53	182	3,03	0,13	O-5kHz-12V-28dB	377,0	374,2
1	16	21:53	182	3,03	0,13	O-5kHz-12V-28dB	373,0	370,2
1	16	21:52	181	3,02	0,13	DSA-15kHz-12V-42dB	376,0	373,2
1	16	21:52	181	3,02	0,13	DSA-15kHz-12V-42dB	371,0	368,2
1	17	22:11	200	3,33	0,14	O-3kHz-12V-28dB	397,0	394,0
1	17	22:11	200	3,33	0,14	SA-5kHz-12V-28dB	392,0	389,1
1	18	22:41	230	3,83	0,16	DSA-10kHz-12V-42dB	408,0	405,0

Tableau-A C-6 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen C-15 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1	18	22:43	232	3,87	0,16	SA-5kHz-12V-28dB	402,0	399,0
2	21	00:52	361	6,02	0,25	DSA-5kHz-12V-28dB	409,0	405,9
2	21	00:51	360	6,00	0,25	SA-5kHz-12V-28dB	408,0	405,0
2	22	01:48	417	6,95	0,29	DSA-10kHz-12V-28dB	409,0	405,9
2	22	01:47	416	6,93	0,29	SA-5kHz-12V-28dB	407,0	404,0
2	23	02:47	476	7,93	0,33	DSA-10kHz-12V-42dB	405,0	402,0
2	23	02:48	477	7,95	0,33	SA-5kHz-12V-28dB	407,0	404,0
2	24	04:50	599	9,98	0,42	DSA-10kHz-12V-42dB	424,0	420,8
2	24	04:51	600	10,00	0,42	O-5kHz-12V-28dB	429,0	425,8
2	25	06:56	725	12,08	0,50	GAU-5kHz-12V-28dB	435,0	431,8
2	25	06:56	725	12,08	0,50	SA-5kHz-12V-28dB	433,0	429,8
2	26	09:55	904	15,07	0,63	GAU-5kHz-12V-28dB	436,0	432,7
2	26	09:54	903	15,05	0,63	SA-5kHz-12V-28dB	433,0	429,8
2	27	12:46	1075	17,92	0,75	DSA-5kHz-12V-28dB	452,0	448,6
2	27	12:49	1078	17,97	0,75	GAU-10kHz-12V-28dB	452,0	448,6
2	28	16:57	1326	22,10	0,92	DSA-5kHz-12V-28dB	432,0	428,8
2	28	16:58	1327	22,12	0,92	SA-5kHz-12V-28dB	436,0	432,7
2	29	20:41	1550	25,83	1,08	SA-5kHz-12V-28dB	478,0	474,4
2	29	20:41	1550	25,83	1,08	SA-5kHz-12V-28dB	470,0	466,5
3	30	00:41	1790	29,83	1,24	GAU-5kHz-12V-28dB	461,0	457,6
3	30	00:43	1792	29,87	1,24	SA-5kHz-12V-28dB	461,0	457,6
3	31	07:48	2217	36,95	1,54	DSA-5kHz-12V-28dB	450,0	446,6
3	31	07:47	2216	36,93	1,54	SA-5kHz-12V-28dB	450,0	446,6
3	32	13:39	2568	42,80	1,78	DSA-15kHz-12V-28dB	484,0	480,4
3	32	13:40	2569	42,82	1,78	SA-5kHz-12V-28dB	487,0	483,4
3	33	19:09	2898	48,30	2,01	DSA-10kHz-12V-28dB	491,0	487,3
3	33	19:07	2896	48,27	2,01	SA-5kHz-12V-28dB	493,0	489,3
4	34	00:39	3228	53,80	2,24	DSA-5kHz-12V-28dB	491,0	487,3
4	34	00:39	3228	53,80	2,24	GAU-10kHz-12V-28dB	492,0	488,3
4	35	08:53	3662	61,03	2,54	DSA-5kHz-12V-28dB	499,0	495,3
4	35	08:52	3661	61,02	2,54	SA-10kHz-12V-28dB	501,0	497,3
4	36	17:07	4156	69,27	2,89	DSA-5kHz-12V-28dB	504,0	500,2
4	36	17:08	4157	69,28	2,89	O-5kHz-12V-28dB	506,0	502,2
5	37	00:42	4611	76,85	3,20	DSA-10kHz-12V-28dB	482,0	478,4
5	37	00:43	4612	76,87	3,20	SA-5kHz-12V-28dB	488,0	484,4
5	38	09:56	5165	86,08	3,59	DSA-5kHz-12V-28dB-2	502,0	498,3

Tableau-A C-6 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen C-15 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,44 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
5	38	09:57	5166	86,10	3,59	DSA-5kHz-12V-28dB	491,0	487,3
5	38	09:58	5167	86,12	3,59	GAU-10kHz-12V-28dB	500,0	496,3
5	39	17:02	5591	93,18	3,88	GAU-5kHz-12V-28dB	490,0	486,3
5	39	17:04	5593	93,22	3,88	SA-5kHz-12V-28dB	490,0	486,3
6	40	00:29	6038	100,63	4,19	GAU-5kHz-12V-28dB	493,0	489,3
6	40	00:31	6040	100,67	4,19	O-5kHz-12V-28dB	498,0	494,3
6	41	16:57	7026	117,10	4,88	SA-5kHz-12V-28dB	502,0	498,3
6	41	16:55	7024	117,07	4,88	GAU-15kHz-12V-28dB	498,0	494,3
7	42	16:52	8461	141,02	5,88	DSA-10kHz-12V-28dB	497,0	493,3
9	43	16:43	11332	188,87	7,87	DSA-5kHz-12V-28dB	504,0	500,2
9	43	16:41	11330	188,83	7,87	SA-5kHz-12V-28dB	505,0	501,2
11	44	18:19	14308	238,47	9,94	DSA-25kHz-12V-28dB	499,0	495,3
11	44	18:19	14308	238,47	9,94	GAU-15kHz-12V-28dB	500,0	496,3
14	45	16:47	18536	308,93	12,87	GAU-3kHz-12V-28dB	509,0	505,2
14	45	16:48	18537	308,95	12,87	SA-5kHz-12V-28dB	507,0	503,2
17	46	16:03	22812	380,20	15,84	DSA-5kHz-12V-28dB	517,0	513,1
17	46	16:03	22812	380,20	15,84	GAU-10kHz-12V-28dB	511,0	507,2
21	47	16:13	28582	476,37	19,85	SA-10kHz-12V-28dB	519,0	515,1
21	47	16:12	28581	476,35	19,85	DSA-5kHz-12V-28dB	519,0	515,1
25	48	15:32	34301	571,68	23,82	DSA-10kHz-12V-28dB	508,0	504,2
25	48	15:32	34301	571,68	23,82	DSA-15kHz-12V-28dB	510,0	506,2
31	49	13:13	42802	713,37	29,72	DSA-5kHz-12V-28dB	508,0	504,2
31	49	13:12	42801	713,35	29,72	SA-5kHz-12V-28dB	508,0	504,2

APPENDICE D

DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LE SPÉCIMEN C-17 – CHAPITRE 5

Sont présentées : les données de la mesure de la perte d'eau, de la mesure de la température de surface, et les données de V_s considérées pour tracer les graphiques du Chapitre 5.

Heure de fin de compactage : 18:51

Tableau-A D-1 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen C-17

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température extérieure (°C)
			Minute	Heure	Jour		
1	0	19:09	3	0,05	0,00	0,00	n.a.
1	1	19:17	11	0,18	0,01	0,93	21,3
1	2	19:22	16	0,27	0,01	1,11	21,3
1	3	19:30	24	0,40	0,02	1,69	21,3
1	4	19:38	32	0,53	0,02	1,97	21,3
1	5	19:44	38	0,63	0,03	2,26	21,2
1	6	19:50	44	0,73	0,03	2,47	21,3
1	7	19:56	50	0,83	0,03	2,66	21,3
1	8	20:05	59	0,98	0,04	2,85	21,3
1	9	20:14	68	1,13	0,05	3,21	21,2
1	10	20:31	85	1,42	0,06	3,72	21,2
1	11	20:46	100	1,67	0,07	4,15	21,2
1	12	21:05	119	1,98	0,08	4,65	21,3
1	13	21:29	143	2,38	0,10	5,18	21,4
1	14	21:46	160	2,67	0,11	5,65	21,5
1	15	22:06	180	3,00	0,13	6,23	21,6
1	16	22:36	210	3,50	0,15	7,32	21,3
1	17	23:01	235	3,92	0,16	8,43	21,2
1	18	23:35	269	4,48	0,19	9,18	21,8
2	19	00:02	296	4,93	0,21	9,63	21,7
2	20	01:01	355	5,92	0,25	10,89	22,0
2	21	02:06	420	7,00	0,29	12,30	22,1
2	22	03:03	477	7,95	0,33	13,33	22,2
2	23	04:01	535	8,92	0,37	14,44	22,3
2	24	05:03	597	9,95	0,41	15,30	22,3
2	25	06:27	681	11,35	0,47	16,47	21,8

Tableau-A D-1 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen C-17 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Perte d'eau (g)	Température extérieure (°C)
			Minute	Heure	Jour		
2	26	08:53	827	13,78	0,57	17,68	21,7
2	27	10:54	948	15,80	0,66	18,54	21,6
2	28	12:52	1066	17,77	0,74	19,28	21,7
2	29	14:56	1190	19,83	0,83	20,05	21,0
2	30	16:52	1306	21,77	0,91	20,47	21,0
2	31	18:51	1425	23,75	0,99	21,10	21,0
2	32	20:14	1508	25,13	1,05	21,41	21,3
2	33	23:30	1704	28,40	1,18	21,96	21,8
3	34	09:26	2300	38,33	1,60	23,29	21,8
3	35	15:04	2638	43,97	1,83	23,77	22,0
3	36	18:04	2818	46,97	1,96	24,11	21,6
3	37	20:50	2984	49,73	2,07	24,40	21,6
4	38	07:20	3614	60,23	2,51	25,17	22,0
4	39	14:01	4015	66,92	2,79	25,28	21,6
4	40	18:38	4292	71,53	2,98	25,67	21,7
5	41	07:39	5073	84,55	3,52	26,29	22,4
6	43	18:29	7163	119,38	4,97	27,36	21,3
7	44	13:44	8318	138,63	5,78	27,74	21,1
7	45	18:20	8594	143,23	5,97	27,91	21,5
8	46	18:45	10059	167,65	6,99	28,03	21,3
9	47	17:21	11415	190,25	7,93	28,41	21,0
10	48	10:22	12436	207,27	8,64	30,34	21,3
10	49	17:31	12865	214,42	8,93	31,38	21,0
11	50	09:45	13839	230,65	9,61	32,85	21,1
11	51	16:08	14222	237,03	9,88	33,24	21,0
14	52	13:21	18375	306,25	12,76	33,99	21,4
14	53	18:34	18688	311,47	12,98	33,82	21,4
15	54	10:15	19629	327,15	13,63	33,67	21,5
16	55	09:59	21053	350,88	14,62	33,58	21,4
17	56	10:16	22510	375,17	15,63	32,89	20,9
17	57	15:42	22836	380,60	15,86	33,08	20,8
23	58	10:32	31166	519,43	21,64	34,28	21,3
24	59	17:40	33034	550,57	22,94	35,91	21,1
30	60	11:45	41319	688,65	28,69	38,59	21,4
31	61	16:20	43034	717,23	29,88	38,06	21,0

Tableau-A D-2 Récapitulatif des données de température de surface
pour le spécimen C-17

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			T. ext. (°C)	Températures 1 (°C)		
			Minute	Heure	Jour		Moyenne	Réf.	Corrigée
1	1	19:18	18	0,30	0,01	21,3	18,2	20,1	19,4
1	2	19:22	23	0,38	0,02	21,3	16,3	18,6	19,0
1	3	19:34	35	0,58	0,02	21,3	14,0	17,0	18,3
1	4	19:39	40	0,66	0,03	21,2	13,9	17,0	18,1
1	5	19:53	53	0,88	0,04	21,3	13,5	16,3	18,5
1	6	20:01	62	1,03	0,04	21,3	13,2	16,8	17,7
1	7	20:22	83	1,38	0,06	21,3	12,5	16,3	17,5
1	8	20:31	91	1,52	0,06	21,2	12,2	15,5	17,9
1	9	20:46	107	1,78	0,07	21,2	12,2	16,3	17,1
1	10	21:06	126	2,11	0,09	21,3	12,1	16,5	16,9
1	11	21:30	150	2,50	0,10	21,4	12,0	16,4	17,0
1	12	22:15	196	3,26	0,14	21,6	15,2	19,5	17,3
1	13	22:16	196	3,27	0,14	21,6	14,9	19,2	17,3
1	14	22:40	221	3,68	0,15	21,3	14,2	18,3	17,2
1	15	22:41	221	3,68	0,15	21,3	14,3	18,7	16,9
1	16	23:02	243	4,05	0,17	21,2	15,0	19,3	16,9
1	17	23:33	274	4,57	0,19	21,8	14,7	19,6	16,9
1	18	23:34	274	4,57	0,19	21,8	14,8	19,5	17,1
2	19	00:04	314	5,23	0,22	21,7	15,8	20,1	17,4
2	20	01:01	361	6,02	0,25	22,0	17,4	21,5	17,9
2	21	02:08	429	7,14	0,30	22,1	17,2	21,1	18,2
2	22	03:04	485	8,08	0,34	22,2	16,9	20,7	18,4
2	23	04:03	544	9,06	0,38	22,3	18,4	21,5	19,2
2	24	04:04	544	9,07	0,38	22,3	17,7	20,7	19,3
2	25	05:03	604	10,07	0,42	22,3	18,3	21,4	19,2
2	26	05:04	604	10,07	0,42	22,3	17,7	20,6	19,4
2	27	06:01	662	11,03	0,46	21,8	19,1	20,5	20,4
2	29	08:53	834	13,90	0,58	21,7	18,7	20,3	20,1
2	30	10:55	955	15,92	0,66	21,6	18,4	19,6	20,4
2	31	12:53	1074	17,90	0,75	21,7	18,3	19,3	20,7
2	32	14:57	1198	19,96	0,83	21,0	18,3	18,7	20,6
2	33	16:53	1314	21,90	0,91	21,0	18,5	19,8	19,7
2	34	18:52	1433	23,88	0,99	21,0	19,0	20,4	19,6
2	35	20:15	1516	25,26	1,05	21,3	19,6	20,3	20,6
2	36	20:15	1516	25,27	1,05	21,3	18,7	19,6	20,4
2	37	23:43	1724	28,73	1,20	21,8	20,5	21,4	20,9
3	38	09:24	2304	38,41	1,60	21,8	19,3	20,2	20,9

Tableau-A D-2 Récapitulatif des données de température de surface
pour le spécimen C-17 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			T. ext. (°C)	Températures 1 (°C)		
			Minute	Heure	Jour		Moyenne	Réf.	Corrigée
3	39	15:06	2646	44,10	1,84	22,0	20,3	20,7	21,6
3	40	18:09	2830	47,16	1,97	21,6	19,6	20,1	21,1
3	41	20:53	2994	49,90	2,08	21,6	20,1	20,6	21,1
4	42	07:21	3622	60,36	2,51	22,0	20,1	20,7	21,4
4	43	07:21	3622	60,36	2,52	22,0	20,2	20,7	21,5
4	44	14:02	4022	67,04	2,79	21,6	18,7	19,7	20,6
4	45	19:20	4340	72,34	3,01	21,7	20,0	20,8	20,9
4	46	19:20	4341	72,35	3,01	21,7	20,1	20,9	20,9
5	47	07:52	5093	84,88	3,54	22,4	20,7	21,0	22,1
5	48	18:10	5710	95,17	3,97	21,4	18,6	19,2	20,8
5	49	18:10	5710	95,17	3,97	21,4	18,7	19,0	21,1
6	50	18:24	7164	119,41	4,98	21,3	19,3	20,0	20,6
7	51	14:35	8375	139,59	5,82	21,1	18,7	19,3	20,5
7	52	18:21	8602	143,36	5,97	21,5	20,2	20,4	21,3
7	53	18:22	8602	143,37	5,97	21,5	20,2	20,7	21,0
7	54	18:23	8603	143,38	5,97	21,5	19,8	20,6	20,7
8	55	18:47	10067	167,78	6,99	21,3	18,8	19,5	20,6
8	56	18:49	10069	167,82	6,99	21,3	18,4	19,1	20,6
9	57	17:30	11430	190,50	7,94	21,0	19,0	19,8	20,2
9	58	17:31	11431	190,52	7,94	21,0	19,1	20,1	20,0
10	59	10:27	12447	207,45	8,64	21,3	18,9	19,4	20,8
10	60	10:27	12448	207,47	8,64	21,3	19,4	19,8	20,9
11	61	09:47	13847	230,78	9,62	21,1	19,0	19,7	20,4
11	62	16:52	14272	237,87	9,91	21,0	19,6	20,3	20,3
14	63	13:24	18384	306,41	12,77	21,4	19,5	19,9	21,0

Tableau-A D-3 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 19-16 mm, spécimen C-17

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,61 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1	12	21:52	166	2,77	0,12	SA-10kHz-12V-42dB	338,0	336,2
1	12	21:55	169	2,82	0,12	O-10kHz-12V-42dB	345,0	343,2
1	12	21:55	169	2,82	0,12	O-15Khz-12V-42dB	343,0	341,2
1	13	22:04	178	2,97	0,12	DSA-25khz-12V-42dB	344,0	342,2
1	13	22:02	176	2,93	0,12	O-5kHz-12V-42dB	344,0	342,2
1	13	22:02	176	2,93	0,12	O-10kHz-12V-42dB	333,0	331,3
1	14	22:49	223	3,72	0,15	SA-10kHz-12V-42dB	336,0	334,3
1	14	22:52	226	3,77	0,16	GAU-15kHz-12V-42dB	341,0	339,2
1	15	23:31	265	4,42	0,18	O-10khz-12V-42dB	333,0	331,3
1	15	23:30	264	4,40	0,18	GAU-15kHz-12V-42dB	333,0	331,3
2	16	00:29	323	5,38	0,22	SA-10kHz-12V-42dB	341,0	339,2
2	16	00:27	321	5,35	0,22	O-10khz-12V-42dB	334,0	332,3
2	17	01:24	378	6,30	0,26	O-10khz-12V-42dB	365,0	363,1
2	17	01:25	379	6,32	0,26	SA-10kHz-12V-42dB	364,0	362,1
2	18	03:30	504	8,40	0,35	O-5kHz-12V-42dB	371,0	369,1
2	18	03:31	505	8,42	0,35	SA-10kHz-12V-42dB	372,0	370,1
2	19	05:31	625	10,42	0,43	DSA-25khz-12V-42dB	374,0	372,1
2	19	05:32	626	10,43	0,43	SA-10kHz-12V-42dB	371,0	369,1
2	20	09:29	863	14,38	0,60	O-10khz-12V-42dB	385,0	383,0
2	20	09:29	863	14,38	0,60	GAU-15kHz-12V-42dB	382,0	380,0
2	21	13:23	1097	18,28	0,76	O-5kHz-12V-42dB	383,0	381,0
2	21	13:24	1098	18,30	0,76	SA-10kHz-12V-42dB	376,0	374,0
2	22	17:25	1339	22,32	0,93	DSA-15kHz-12V-42dB	385,0	383,0
2	22	17:22	1336	22,27	0,93	SA-10kHz-12V-42dB	386,0	384,0
2	23	20:32	1526	25,43	1,06	SA-10kHz-12V-42dB	390,0	388,0
2	24	23:50	1724	28,73	1,20	DSA-25kHz-12V-42dB	419,0	416,8
2	24	23:52	1726	28,76	1,20	SA-10kHz-12V-42dB	421,0	418,8
3	25	09:59	2333	38,88	1,62	GAU-15kHz-12V-42dB	423,0	420,8
3	25	09:59	2333	38,88	1,62	O-5kHz-12V-42dB	419,0	416,8
3	27	21:10	3004	50,07	2,09	O-10kHz-12V-42dB	429,0	426,8
4	29	19:09	4323	72,05	3,00	DSA-15kHz-12V-42dB	429,0	426,8
5	31	18:39	5733	95,55	3,98	DSA-15kHz-12V-42dB	442,0	439,7
5	31	18:38	5732	95,53	3,98	SA-15kHz-12V-42dB	443,0	440,7
6	32	18:47	7181	119,68	4,99	O-5kHz-12V-42dB	451,0	448,7
7	33	18:40	8614	143,57	5,98	DSA-15kHz-12V-42dB	434,0	431,7
7	33	18:40	8614	143,57	5,98	O-5kHz-12V-42dB	439,0	436,7

Tableau-A D-3 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 19-16 mm, spécimen C-17 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,61 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
9	34	18:02	11456	190,93	7,96	DSA-15kHz-12V-42dB	451,0	448,7
9	34	18:01	11455	190,92	7,95	SA-10kHz-12V-42dB	451,0	448,7
17	37	16:13	22867	381,12	15,88	SA-10kHz-12V-42dB	460,0	457,6
23	38	11:01	31195	519,92	21,66	DSA-15kHz-12V-42dB	452,0	449,6
31	39	17:18	43092	718,20	29,93	DSA-15kHz-12V-42dB	452,0	449,6
31	39	17:16	43090	718,17	29,92	SA-10kHz-12V-42dB	447,0	444,7
Transducteurs décalés 5 mm								
4	28	08:04	3658	60,97	2,54	SA-10kHz	424,0	421,8
4	28	08:03	3657	60,95	2,54	DSA-15kHz-12V-42dB	427,0	424,8
4	29	19:05	4319	71,98	3,00	DSA-15kHz-12V-42dB	428,0	425,8
4	29	19:04	4318	71,97	3,00	SA-10kHz-12V-42dB	425,0	422,8
5	30	08:13	5107	85,12	3,55	O-5kHz-12V-42dB	426,0	423,8
5	30	08:11	5105	85,08	3,55	SA-10kHz-12V-42dB	429,0	426,8
5	31	18:41	5735	95,58	3,98	DSA-15kHz-12V-42dB	432,0	429,8
5	31	18:41	5735	95,58	3,98	O-5kHz-12V-42dB	435,0	432,7
6	32	18:50	7184	119,73	4,99	DSA-25kHz-12V-42dB	444,0	441,7
7	33	18:44	8618	143,63	5,98	O-5kHz-12V-42dB	450,0	447,7
7	33	18:44	8618	143,63	5,98	SA-10kHz-12V-42dB	443,0	440,7
9	34	17:58	11452	190,87	7,95	DSA-15kHz-12V-42dB	447,0	444,7
9	34	17:59	11453	190,88	7,95	SA-10kHz-12V-42dB	441,0	438,7
11	35	16:49	14263	237,72	9,90	SA-10kHz-12V-42dB	454,0	451,6
11	35	16:48	14262	237,70	9,90	DSA-15kHz-12V-42dB	457,0	454,6
14	36	13:59	18413	306,88	12,79	DSA-5kHz-12V-42dB	455,0	452,6
14	36	14:00	18414	306,90	12,79	DSA-15kHz-12V-42dB	453,0	450,6
17	37	16:17	22871	381,18	15,88	SA-10kHz-12V-42dB	462,0	459,6
17	37	16:17	22871	381,18	15,88	DSA-15kHz-12V-42dB	460,0	457,6
23	38	11:05	31199	519,98	21,67	DSA-15kHz-12V-42dB	448,0	445,7
23	38	11:04	31198	519,97	21,67	SA-10kHz-12V-42dB	439,0	436,7
31	39	17:20	43094	718,23	29,93	DSA-25kHz-12V-42dB	457,0	454,6
31	39	17:21	43095	718,25	29,93	SA-10kHz-12V-42dB	465,0	462,6

Tableau-A D-4 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm A, spécimen C-17

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,61 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V _s exp.	V _s réelle
1	1	19:19	13	0,22	0,01	O-5kHz-12V-42dB	293,0	291,5
1	1	19:20	14	0,23	0,01	O-10kHz-12V-42dB	286,0	284,5
1	1	19:15	9	0,15	0,01	DSA-10kHz-12V-28dB	287,0	285,5
1	15	23:22	256	4,27	0,18	DSA-10kHz-12V-42dB	346,0	344,2
1	15	23:20	254	4,23	0,18	O-5kHz-12V-42dB	346,0	344,2
1	15	23:21	255	4,25	0,18	SA-10kHz-12V-42dB	342,0	340,2
2	16	00:15	309	5,15	0,21	DSA-10kHz-12V-28dB	354,0	352,2
2	16	00:13	307	5,12	0,21	SA-10kHz-12V-28dB	348,0	346,2
2	17	01:14	368	6,13	0,26	DSA-25kHz-12V-42dB	351,0	349,2
2	17	01:16	370	6,17	0,26	SA-10kHz-12V-28dB	350,0	348,2
2	17	01:15	369	6,15	0,26	O-5kHz-12V-42dB	345,0	343,2
2	18	03:16	490	8,17	0,34	DSA-10kHz-12V-42dB	384,0	382,0
2	18	03:18	492	8,20	0,34	GAU-15kHz-12V-42dB	390,0	388,0
2	18	03:15	489	8,15	0,34	SA-10kHz-12V-28dB	388,0	386,0
2	19	05:23	617	10,28	0,43	DSA-15kHz-12V-42dB	371,0	369,1
2	19	05:20	614	10,23	0,43	SA-5kHz-12V-42dB	374,0	372,1
2	20	09:15	849	14,15	0,59	DSA-5kHz-12V-42dB	376,0	374,0
2	20	09:14	848	14,13	0,59	O-10kHz-12V-42dB	369,0	367,1
2	21	13:09	1083	18,05	0,75	DSA-15kHz-12V-42dB	402,0	399,9
2	21	13:12	1086	18,10	0,75	SA-10kHz-12V-28dB	412,0	409,9
2	22	17:13	1327	22,12	0,92	GAU-15kHz-12V-42dB	413,0	410,9
2	22	17:15	1329	22,15	0,92	SA-5kHz-12V-28dB	410,0	407,9
2	23	20:20	1514	25,23	1,05	DSA-10kHz-12V-42dB	428,0	425,8
2	23	20:21	1515	25,25	1,05	GAU-15kHz-12V-42dB	427,0	424,8
2	24	23:36	1710	28,50	1,19	DSA-15kHz-12V-42dB	430,0	427,8
2	24	23:42	1716	28,60	1,19	SA-10kHz-12V-42dB	427,0	424,8
3	25	09:44	2318	38,63	1,61	GAU-15kHz-12V-42dB	432,0	429,8
3	25	09:46	2320	38,67	1,61	SA-5kHz-12-28dB	427,0	424,8
3	26	15:27	2661	44,35	1,85	O-10kHz-12V-28dB	441,0	438,7
3	26	15:27	2661	44,35	1,85	O-5kHz-12V-28dB	442,0	439,7
3	26	15:28	2662	44,37	1,85	SA-10kHz-12V-28dB	438,0	435,7
3	26	15:24	2658	44,30	1,85	DSA-10kHz-12V-42dB	436,0	433,7
3	27	21:00	2994	49,90	2,08	DSA-10kHz-12V-42dB	440,0	437,7
3	27	21:00	2994	49,90	2,08	DSA-15kHz-12V-42dB	445,0	442,7
3	27	21:01	2995	49,92	2,08	GAU-15kHz-12V-42dB	443,0	440,7
3	27	21:02	2996	49,93	2,08	O-5kHz-12V-28dB	450,0	447,7

Tableau-A D-4 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm A, spécimen C-17 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,61 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
4	28	07:50	3644	60,73	2,53	DSA-15kHz-12V-42dB	439,0	436,7
4	28	07:51	3645	60,75	2,53	GAU-15kHz-12V-42dB	439,0	436,7
4	28	07:52	3646	60,77	2,53	O-5kHz-12V-28dB	441,0	438,7
4	29	18:57	4311	71,85	2,99	DSA-10kHz-12V-42dB	429,0	426,8
4	29	18:57	4311	71,85	2,99	DSA-25kHz-12V-42dB	432,0	429,8
4	29	19:00	4314	71,90	3,00	SA-10kHz-12V-28dB	434,0	431,7
5	30	07:57	5091	84,85	3,54	DSA-10kHz-12V-42dB	430,0	427,8
5	30	07:59	5093	84,88	3,54	O-5kHz-12V-28dB	433,0	430,7
5	30	08:00	5094	84,90	3,54	SA-10kHz-12V-28dB	428,0	425,8
5	31	18:29	5723	95,38	3,97	DSA-15kHz-12V-42dB	465,0	462,6
5	31	18:30	5724	95,40	3,98	O-10kHz-12V-42dB	452,0	449,6
5	31	18:30	5724	95,40	3,98	SA-10kHz-12V-42dB	458,0	455,6
5	31	18:30	5724	95,40	3,98	SA-5kHz-12V-42dB	453,0	450,6
6	32	18:42	7176	119,60	4,98	DSA-25kHz-12V-42dB	455,0	452,6
6	32	18:42	7176	119,60	4,98	O-10kHz-12V-42dB	453,0	450,6
6	32	18:43	7177	119,62	4,98	SA-10kHz-12V-42dB	458,0	455,6
6	32	18:42	7176	119,60	4,98	SA-5kHz-12V-42dB	453,0	450,6
7	33	18:34	8608	143,47	5,98	SA-5kHz-12V-42dB	453,0	450,6
7	33	18:33	8607	143,45	5,98	DSA-15kHz-12V-42dB	452,0	449,6
7	33	18:35	8609	143,48	5,98	GAU-3kHz-12V-42dB	454,0	451,6
9	34	17:48	11442	190,70	7,95	SA-10kHz-12V-42dB	457,0	454,6
9	34	17:45	11439	190,65	7,94	DSA-10kHz-12V-42dB	462,0	459,6
9	34	17:46	11440	190,67	7,94	O-5kHz-12V-42dB	465,0	462,6
9	34	17:47	11441	190,68	7,95	O-10kHz-12V-42dB	455,0	452,6
11	35	16:38	14252	237,53	9,90	DSA-15kHz-12V-42dB	455,0	452,6
11	35	16:40	14254	237,57	9,90	SA-5kHz-12V-42dB	451,0	448,7
14	36	13:47	18401	306,68	12,78	DSA-15kHz-12V-42dB	465,0	462,6
14	36	13:50	18404	306,73	12,78	SA-10kHz-12V-28dB	464,0	461,6
17	37	16:05	22859	380,98	15,87	O-5kHz-12V-28dB	461,0	458,6
17	37	16:05	22859	380,98	15,87	DSA-15kHz-12V-42dB	462,0	459,6
23	38	10:57	31191	519,85	21,66	DSA-10kHz-12V-42dB	449,0	446,7
23	38	10:55	31189	519,82	21,66	SA-10kHz-12V-14dB	457,0	454,6
31	39	17:08	43082	718,03	29,92	DSA-10kHz-12V-42dB	470,0	467,6
31	39	17:11	43085	718,08	29,92	SA-10kHz-12V-28dB	468,0	465,6

Tableau-A D-5 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen C-17

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,61 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1	2	19:28	22	0,37	0,02	GAU-10kHz-12V-42dB	298,0	296,5
1	2	19:32	26	0,43	0,02	O-5kHz-12V-42dB-2	296,0	294,5
1	3	19:36	30	0,50	0,02	O-5kHz-12V-42dB	299,0	297,4
1	4	19:42	36	0,60	0,03	GAU-10kHz-12V-42dB	303,0	301,4
1	4	19:44	38	0,63	0,03	O-5kHz-12V-42dB	301,0	299,4
1	5	19:50	44	0,73	0,03	GAU-10kHz-12V-42dB	305,0	303,4
1	5	19:48	42	0,70	0,03	O-5kHz-12V-42dB	305,0	303,4
1	6	19:55	49	0,82	0,03	DSA-10kHz-12V-42dB	307,0	305,4
1	6	19:56	50	0,83	0,03	O-5kHz-12V-42dB	311,0	309,4
1	7	20:17	71	1,18	0,05	DSA-10kHz-12V-42dB	327,0	325,3
1	7	20:16	70	1,17	0,05	O-5kHz-12V-42dB	322,0	320,3
1	8	20:28	82	1,37	0,06	GAU-10kHz-12V-42dB	316,0	314,4
1	8	20:28	82	1,37	0,06	SA-5kHz-12V-42dB	322,0	320,3
1	9	20:44	98	1,63	0,07	GAU-10kHz-12V-42dB	331,0	329,3
1	9	20:44	98	1,63	0,07	O-5kHz-12V-42dB	332,0	330,3
1	10	21:03	117	1,95	0,08	GAU-10kHz-12V-42dB	328,0	326,3
1	10	21:04	118	1,97	0,08	O-5kHz-12V-42dB	330,0	328,3
1	11	21:27	141	2,35	0,10	GAU-10kHz-12V-42dB	336,0	334,3
1	11	21:24	138	2,30	0,10	O-5kHz-12V-28dB	337,0	335,2
1	12	21:42	156	2,60	0,11	GAU-10kHz-12V-42dB	336,0	334,3
1	12	21:45	159	2,65	0,11	O-5kHz-12V-42dB	340,0	338,2
1	12	21:46	160	2,67	0,11	SA-5kHz-12V-42dB	333,0	331,3
1	13	22:12	186	3,10	0,13	GAU-10kHz-12V-42dB	332,0	330,3
1	14	22:33	207	3,45	0,14	DSA-15kHz-12V-42dB	334,0	332,3
1	14	22:34	208	3,47	0,14	GAU-10kHz-12V-42dB	328,0	326,3
1	15	23:06	240	4,00	0,17	GAU-10kHz-12V-42dB	331,0	329,3
1	15	23:09	243	4,05	0,17	SA-5kHz-12V-28dB	330,0	328,3
2	16	00:06	300	5,00	0,21	DSA-10kHz-12V-42dB	336,0	334,3
2	16	00:05	299	4,98	0,21	SA-5kHz-12V-28dB	340,0	338,2
2	17	01:04	358	5,97	0,25	DSA-5kHz-12V-28dB	353,0	351,2
2	17	01:06	360	6,00	0,25	GAU-5kHz-12V-42dB	357,0	355,1
2	17	01:06	360	6,00	0,25	O-5kHz-12V-28dB	354,0	352,2
2	17	01:08	362	6,03	0,25	SA-5kHz-12V-28dB	358,0	356,1
2	18	03:07	481	8,02	0,33	GAU-5kHz-12V-42dB	388,0	386,0
2	18	03:08	482	8,03	0,33	O-5kHz-12V-28dB	390,0	388,0
2	18	03:09	483	8,05	0,34	SA-5kHz-12V-42dB	390,0	388,0

Tableau-A D-5 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen C-17 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,61 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
2	18	03:08	482	8,03	0,33	GAU-10kHz-12V-42dB	387,0	385,0
2	19	05:10	604	10,07	0,42	DSA-10kHz-12V-42dB	386,0	384,0
2	19	05:11	605	10,08	0,42	GAU-10kHz-12V-42dB	385,0	383,0
2	19	05:13	607	10,12	0,42	SA-5kHz-12V-28dB	382,0	380,0
2	19	05:12	606	10,10	0,42	O-5kHz-12V-42dB	380,0	378,0
2	20	09:01	835	13,92	0,58	GAU-10kHz-12V-42dB	373,0	371,1
2	20	09:03	837	13,95	0,58	SA-5kHz-12V-28dB	380,0	378,0
2	21	13:00	1074	17,90	0,75	DSA-5kHz-12V-28dB	413,0	410,9
2	21	13:02	1076	17,93	0,75	GAU-10khz-12V-42dB	418,0	415,8
2	21	13:02	1076	17,93	0,75	GAU-5kHz-12V-42dB	414,0	411,8
2	22	17:02	1316	21,93	0,91	GAU-10kHz-12V-42dB	381,0	379,0
2	22	17:03	1317	21,95	0,91	SA-5kHz-12V-28dB	388,0	386,0
2	23	20:09	1503	25,05	1,04	GAU-5kHz-12V-42dB	405,0	402,9
2	23	20:11	1505	25,08	1,05	SA-5kHz-12V-28dB	397,0	394,9
2	23	20:09	1503	25,05	1,04	DSA-10kHz-12V-42dB	402,0	399,9
2	23	20:10	1504	25,07	1,04	O-5kHz-12V-28dB	405,0	402,9
2	24	23:28	1702	28,37	1,18	O-5kHz-12V-28dB	415,0	412,8
2	24	23:25	1699	28,32	1,18	DSA-10kHz-12V-42dB	414,0	411,8
3	25	09:35	2309	38,48	1,60	GAU-10kHz-12V-42dB	412,0	409,9
3	25	09:37	2311	38,52	1,60	SA-5kHz-12V-28dB	412,0	409,9
3	26	15:14	2648	44,13	1,84	O-5kHz-12V-28dB	415,0	412,8
3	26	15:09	2643	44,05	1,84	DSA-10kHz-12V-42dB	416,0	413,8
4	28	07:29	3623	60,38	2,52	O-3kHz-12V-42dB	429,0	426,8
4	28	07:26	3620	60,33	2,51	DSA-10kHz-12V-42dB	429,0	426,8
4	29	18:46	4300	71,67	2,99	DSA-5kHz-12V-28dB	423,0	420,8
4	29	18:46	4300	71,67	2,99	DSA-5kHz-12V-28dB	428,0	425,8
4	29	18:46	4300	71,67	2,99	SA-5kHz-12V-28dB	425,0	422,8
5	30	07:47	5081	84,68	3,53	DSA-10kHz-12V-42dB	423,0	420,8
5	30	07:50	5084	84,73	3,53	SA-5kHz-12V-28dB	422,0	419,8
5	31	18:16	5710	95,17	3,97	DSA-10kHz-12V-42dB	432,0	429,8
5	31	18:20	5714	95,23	3,97	SA-5kHz-12V-28dB	436,0	433,7
6	32	18:35	7169	119,48	4,98	GAU-5kHz-12V-42dB	431,0	428,8
6	32	18:37	7171	119,52	4,98	SA-5kHz-12V-42dB	429,0	426,8
7	33	18:28	8602	143,37	5,97	O-5kHz-12V-28dB	431,0	428,8
7	33	18:28	8602	143,37	5,97	SA-5kHz-12V-42dB	428,0	425,8
9	34	17:37	11431	190,52	7,94	DSA-10kHz-12V-42dB	434,0	431,7

Tableau-A D-5 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen C-17 (suite)

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 75,00 mm Hauteur réelle 74,61 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
9	34	17:39	11433	190,55	7,94	SA-5kHz-12V-42dB	434,0	431,7
11	35	16:20	14234	237,23	9,88	SA-5kHz-12V-28dB-4k	442,0	439,7
11	35	17:20	14294	238,23	9,93	GAU-10kHz-12V-42dB-4k	441,0	438,7
11	35	16:15	14229	237,15	9,88	DSA-10kHz-12V-42dB-4k	435,0	432,7
14	36	13:37	18391	306,52	12,77	GAU-10kHz-12V-42dB-4k	438,0	435,7
14	36	13:40	18394	306,57	12,77	O-5kHz-12V-28dB-4k	436,0	433,7
17	37	15:56	22850	380,83	15,87	DSA-10kHz-12V-28dB	449,0	446,7
17	37	15:57	22851	380,85	15,87	SA-5Kz-12V-42dB	441,0	438,7
23	38	10:47	31181	519,68	21,65	GAU-5kHz-12V-42dB	439,0	436,7
23	38	10:48	31182	519,70	21,65	SA-5kHz-12V-28dB	438,0	435,7
31	39	17:02	43076	717,93	29,91	GAU-5kHz-12V-42dB	460,0	457,6
31	39	17:04	43078	717,97	29,92	SA-5kHz-12V-28dB	463,0	460,6

APPENDICE E

DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS CONTROL-10 ET CONTROL-12 – CHAPITRE 5

Tableau-A E-1 Récapitulatif des valeurs de V_s utilisées pour le spécimen Control-10_1

Transducteurs	Hauteur d'analyse 100,00 mm Hauteur réelle 98,18 mm		
	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
19-16 mm	SA-10kHz-12V-28dB	605,0	594,0
19-16 mm	DSA-25kHz-12V-42dB	605,0	594,0
26-22 mm A	DSA-10khz-12V-42dB	603,0	592,0
26-22 mm A	GAU-10kHz-12V-42dB	610,0	598,9
36-31 mm	DSA-10khz-12V-42dB	598,0	587,1
36-31 mm	DSA-10kHz-12V-42dB-2	607,0	596,0
36-31 mm	GAU-15kHz-12V-42dB	590,0	579,3

Tableau-A E-2 Récapitulatif des valeurs de V_s utilisées pour le spécimen Control-10_2

Transducteurs	Hauteur d'analyse 100,00 mm Hauteur réelle 97,87 mm		
	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
19-16 mm	DSA-15kHz-12V-28dB	611,0	598,0
19-16 mm	GAU-10kHz-12V-28dB	610,0	597,0
26-22 mm A	GAU-15kHz-12V-42dB	616,0	602,9
26-22 mm A	O-5kHz-12V-28dB	614,0	600,9
36-31 mm	DSA-15kHz-12V-42dB	614,0	600,9
36-31 mm	O-5kHz-12V-28dB	619,0	605,8

Tableau-A E-3 Récapitulatif des valeurs de V_s utilisées pour le spécimen Control-10_3

Transducteurs	Hauteur d'analyse 100,00 mm Hauteur réelle 98,02 mm		
	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
19-16 mm	DSA-25kHz-12V-42dB	617,0	604,8
19-16 mm	O-10kHz-12V-28dB	617,0	604,8
26-22 mm A	DSA-25kHz-12V-42dB	591,0	579,3
26-22 mm A	O-5kHz-12V-28dB	594,0	582,2
26-22 mm A	SA-10kHz-12V-28dB	596,0	584,2
36-31 mm	DSA-10kHz-12V-42dB	619,0	606,7
36-31 mm	O-5kHz-12V-28dB	624,0	611,6

Tableau-A E-4 Récapitulatif des valeurs de V_s utilisées pour le spécimen Control-12

Transducteurs	Hauteur d'analyse 100,00 mm Hauteur réelle 100,00 mm		
	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
19-16 mm	DSA-25kHz-12V-42dB	591,0	591,0
19-16 mm	O-5kHz-12V-42dB	591,0	591,0
19-16 mm	SA-10kHz-12V-42dB	592,0	592,0
26-22 mm A	DSA-10kHz-12V-28dB	583,0	583,0
26-22 mm A	DSA-10kHz-12V-28dB-2	590,0	590,0
26-22 mm A	DSA-10kHz-12V-42dB	574,0	574,0
36-31 mm	DSA-10kHz-12V-28dB	573,0	573,0
36-31 mm	GAU-10kHz-12V-28dB	590,0	590,0

APPENDICE F

DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS CONTROL-17 – CHAPITRE 5

Tableau-A F-1 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen Control-17_1

Jour	Heure	Temps de cure en		Perte d'eau	
		Heure	Jour	en g	normalisée
1	13:31	0,03	0,00	0	0,00
1	14:31	1,03	0,04	20,8	0,41
1	15:31	2,03	0,08	27,6	0,54
1	16:31	3,03	0,13	30,3	0,59
1	17:31	4,03	0,17	32,1	0,63
1	18:31	5,03	0,21	33,4	0,65
1	19:31	6,03	0,25	34,5	0,68
1	20:31	7,03	0,29	35,4	0,69
1	21:31	8,03	0,33	36,1	0,71
1	22:31	9,03	0,38	36,8	0,72
2	09:41	20,20	0,84	41,6	0,82
2	10:41	21,20	0,88	41,8	0,82
2	11:41	22,20	0,93	42	0,82
2	12:41	23,20	0,97	42,3	0,83
2	13:41	24,20	1,01	42,5	0,83
2	14:41	25,20	1,05	42,7	0,84
2	15:41	26,20	1,09	42,9	0,84
2	17:41	28,20	1,18	43,3	0,85
3	08:45	43,27	1,80	45,8	0,90
3	09:45	44,27	1,84	45,9	0,90
3	10:45	45,27	1,89	46	0,90
3	11:45	46,27	1,93	46,1	0,90
3	13:45	48,27	2,01	46,4	0,91
3	14:45	49,27	2,05	46,5	0,91
3	15:45	50,27	2,09	46,5	0,91
3	16:45	51,27	2,14	46,7	0,92
3	17:45	52,27	2,18	46,8	0,92
4	09:41	68,20	2,84	48,1	0,94
4	11:41	70,20	2,93	48,3	0,95
5	10:41	93,20	3,88	49,4	0,97
5	14:41	97,20	4,05	49,5	0,97

Tableau-A F-1 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen Control-17_1 (suite)

Jour	Heure	Temps de cure en		Perte d'eau	
		Heure	Jour	en g	normalisée
5	15:41	98,20	4,09	49,6	0,97
8	09:41	164,20	6,84	51	1,00
8	11:41	166,20	6,93	51	1,00

Tableau-A F-2 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen Control-17_2

Jour	Heure	Temps de cure en		Perte d'eau	
		Heure	Jour	en g	normalisée
1	13:51	0,03	0,00	0	0,00
1	14:51	1,03	0,04	20	0,36
1	15:51	2,03	0,08	29,1	0,53
1	16:51	3,03	0,13	32,6	0,59
1	17:51	4,03	0,17	34,6	0,63
1	18:51	5,03	0,21	36,1	0,66
1	19:51	6,03	0,25	37,3	0,68
1	20:51	7,03	0,29	38,3	0,70
1	21:51	8,03	0,33	39,2	0,71
2	08:41	18,87	0,79	44,7	0,81
2	09:41	19,87	0,83	44,9	0,81
2	10:41	20,87	0,87	45,1	0,82
2	11:41	21,87	0,91	45,4	0,82
2	12:41	22,87	0,95	45,7	0,83
2	13:41	23,87	0,99	46	0,83
2	14:41	24,87	1,04	46,2	0,84
2	15:41	25,87	1,08	46,4	0,84
2	16:41	26,87	1,12	46,7	0,85
2	17:41	27,87	1,16	46,9	0,85
3	08:45	42,93	1,79	49,6	0,90
3	09:45	43,93	1,83	49,7	0,90
3	10:45	44,93	1,87	49,8	0,90
3	13:45	47,93	2,00	50,2	0,91
3	14:45	48,93	2,04	50,3	0,91
3	16:45	50,93	2,12	50,5	0,92
4	09:41	67,87	2,83	51,9	0,94
4	11:41	69,87	2,91	52,1	0,95
5	10:41	92,87	3,87	53,5	0,97

Tableau-A F-2 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen Control-17_2 (suite)

Jour	Heure	Temps de cure en		Perte d'eau	
		Heure	Jour	en g	normalisée
5	11:41	93,87	3,91	53,5	0,97
5	14:41	96,87	4,04	53,6	0,97
5	15:41	97,87	4,08	53,7	0,97
8	09:41	163,87	6,83	55,1	1,00
8	10:41	164,87	6,87	55,1	1,00
8	11:41	165,87	6,91	55,1	1,00

Tableau-A F-3 Récapitulatif des données de perte d'eau
pour le spécimen Control-17_3

Jour	Heure	Temps de cure en		Perte d'eau	
		Heure	Jour	en g	normalisée
0	14:18	0,03	0,00	0,0	0,00
0	15:15	0,98	0,04	6,1	0,13
0	17:18	3,03	0,13	24,6	0,52
0	17:54	3,63	0,15	26,5	0,56
0	19:18	5,03	0,21	28,1	0,59
0	20:18	6,03	0,25	30,9	0,65
0	22:18	8,03	0,33	32,0	0,68
1	09:30	19,23	0,80	38,0	0,80
1	10:13	19,95	0,83	38,0	0,80
1	12:13	21,95	0,91	38,6	0,81
1	13:41	23,42	0,98	38,5	0,81
1	15:41	25,42	1,06	39,2	0,83
1	17:22	27,10	1,13	39,3	0,83
2	09:45	43,48	1,81	42,3	0,89
2	10:36	44,33	1,85	42,2	0,89
2	14:37	48,35	2,01	42,9	0,91
2	16:06	49,83	2,08	42,7	0,90
3	09:50	67,57	2,82	44,6	0,94
3	11:39	69,38	2,89	44,3	0,93
4	13:26	95,17	3,97	46,0	0,97
4	16:45	98,48	4,10	45,6	0,96
7	09:13	162,95	6,79	47,3	1,00
7	10:54	164,63	6,86	47,1	0,99
7	13:17	167,02	6,96	47,4	1,00
7	15:15	168,98	7,04	47,4	1,00

Tableau-A F-4 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 19-16 mm, spécimen Control-17_3

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 100,00 mm Hauteur réelle 99,40 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1	2	19:11	293	4,88	0,20	GAU-15kHz-12V-42dB	379,0	376,7
1	2	19:11	293	4,88	0,20	O-15kHz-12V-42dB	374,0	371,8
2	3	09:59	1181	19,68	0,82	GAU-15kHz-12V-42dB	419,0	416,5
2	3	10:00	1182	19,70	0,82	SA-5kHz-12V-42dB	413,0	410,5
2	4	13:34	1396	23,27	0,97	DSA-15kHz-12V-42dB	429,0	426,4
2	4	13:35	1397	23,28	0,97	SA-5kHz-12V-42dB	430,0	427,4
2	5	16:55	1597	26,62	1,11	GAU-10kHz-12V-42dB	432,0	429,4
3	6	10:20	2642	44,03	1,83	GAU-15kHz-12V-42dB	420,0	417,5
3	6	10:18	2640	44,00	1,83	SA-5kHz-12V-42dB-1	413,0	410,5
3	7	16:00	2982	49,70	2,07	GAU-15kHz-12V-42dB	423,0	420,5
3	7	16:00	2982	49,70	2,07	SA-5kHz-12V-42dB	425,0	422,5
3	7	16:00	2982	49,70	2,07	SA-10kHz-12V-42dB	420,0	417,5
4	8	11:10	4132	68,87	2,87	GAU-15kHz-12V-42dB	444,0	441,3
4	8	11:10	4132	68,87	2,87	DSA-25kHz-12V-42dB	447,0	444,3
5	9	16:32	5894	98,23	4,09	GAU-15kHz-12V-42dB	441,0	438,4
5	9	16:32	5894	98,23	4,09	SA-10kHz-12V-42dB	438,0	435,4
8	10	10:28	9850	164,17	6,84	O-10kHz-12V-42dB	444,0	441,3
8	10	10:29	9851	164,18	6,84	SA-10kHz-12V-28dB	438,0	435,4
37	11	11:48	51690	861,50	35,90	GAU-10kHz-12V-42dB	445,0	442,3
37	11	11:50	51692	861,53	35,90	SA-5kHz-12V-42dB	440,0	437,4
49	12	12:00	70422	1173,70	48,90	DSA-15kHz-12V-28dB	456,0	453,3

Tableau-A F-5 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 26-22 mm A, spécimen Control-17_3

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 100,00 mm Hauteur réelle 99,40 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1	1	14:51	33	0,55	0,02	GAU-10kHz-12V-42dB	295	293,2
1	1	14:51	33	0,55	0,02	GAU-15kHz-12V-42dB	292	290,2
1	2	19:15	297	4,95	0,21	GAU-15kHz-12V-42dB-2	386	383,7
1	2	19:16	298	4,97	0,21	O-5kHz-12V-42dB	380	377,7
2	3	09:54	1176	19,60	0,82	DSA-15kHz-12V-42dB	403	400,5
2	3	09:54	1176	19,60	0,82	GAU-15kHz-12V-42dB	402	399,5
2	4	13:28	1390	23,17	0,97	GAU-15kHz-12V-42dB	414	411,5
2	4	13:28	1390	23,17	0,97	O-5kHz-12V-42dB	412	409,5
2	5	17:02	1604	26,73	1,11	GAU-15kHz-12V-42dB	401	398,5
2	5	17:02	1604	26,73	1,11	DSA-15kHz-12V-42dB	407	404,5
3	6	10:28	2650	44,17	1,84	GAU-15kHz-12V-42dB	402	399,6
3	6	10:29	2651	44,18	1,84	O-5kHz-12V-42dB-1	412	409,5
3	7	15:44	2966	49,43	2,06	GAU-15kHz-12V-28dB	429	426,4
3	7	15:45	2967	49,45	2,06	DSA-5kHz-12V-28dB	425	422,4
4	8	11:25	4147	69,12	2,88	GAU-15kHz-12V-42dB	439	436,4
4	8	11:25	4147	69,12	2,88	DSA-15kHz-12V-42dB	433	430,4
4	8	11:25	4147	69,12	2,88	SA-10kHz-12V-42dB	430	427,4
5	9	16:04	5866	97,77	4,07	O-5kHz-12V-28dB	447	444,3
5	9	16:04	5866	97,77	4,07	O-5kHz-12V-42dB	441	438,3
8	10	10:49	9871	164,52	6,85	DSA-10kHz-12V-42dB	433	430,4
8	10	10:49	9871	164,52	6,85	GAU-15kHz-12V-28dB	433	430,4
37	11	12:06	51708	861,80	35,91	DSA-10kHz-12V-28dB	446	443,3
37	11	12:08	51710	861,83	35,91	O-5kHz-12V-28dB	445	442,3
37	11	12:09	51711	861,85	35,91	SA-kHz-12V-42dB	439	436,4
49	12	12:00	70422	1173,70	48,90	DSA-15kHz-12V-28dB	457	454,3

Tableau-A F-6 Récapitulatif des valeurs utilisées pour le couple de transducteurs 36-31 mm, spécimen Control-17_3

Jour	Essai	Heure	Temps de cure en			Hauteur d'analyse 100,00 mm Hauteur réelle 99,40 mm		
			Minute	Heure	Jour	Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1	1	14:36	18	0,30	0,01	GAU-10kHz-12V-42dB	288,0	286,3
1	1	14:36	18	0,30	0,01	DSA-10kHz-12V-42dB	282,0	280,3
1	1,5	15:11	53	0,88	0,04	GAU-15kHz-12V-42dB	312,0	310,1
1	2	18:52	274	4,57	0,19	GAU-15kHz-12V-42dB	374,0	371,8
1	2	18:52	274	4,57	0,19	DSA-10kHz-12V-42dB	371,0	368,8
2	3	10:08	1190	19,83	0,83	GAU-15kHz-12V-28dB	411,0	408,5
2	4	13:20	1382	23,03	0,96	GAU-15kHz-12V-42dB	418,0	415,5
2	4	13:20	1382	23,03	0,96	GAU-5kHz-12V-42dB	419,0	416,5
2	5	17:15	1617	26,95	1,12	DSA-5kHz-12VV-42dB	423,0	420,5
3	6	10:09	2631	43,85	1,83	GAU-15kHz-12V-42dB	418,0	415,5
3	6	10:09	2631	43,85	1,83	GAU-10kHz-12V-42dB	421,0	418,5
4	8	11:19	4141	69,02	2,88	O-5kHz-12V-28dB	429,0	426,4
4	8	11:19	4141	69,02	2,88	GAU-15kHz-12V-42dB	428,0	425,4
5	9	16:17	5879	97,98	4,08	GAU-15kHz-12V-42dB	451,0	448,3
5	9	16:17	5879	97,98	4,08	DSA-10kHz-12V-28dB	449,0	446,3
8	10	10:10	9832	163,87	6,83	GAU-15kHz-12V-28dB	437,0	434,4
8	10	10:10	9832	163,87	6,83	DSA-10kHz-12V-28dB	437,0	434,4
37	11	11:55	51697	861,62	35,90	DSA-10kHz-12V-28dB-2	459,0	456,2
37	11	11:56	51698	861,63	35,90	DSA-10kHz-12V-28dB	465,0	462,2
37	11	11:59	51701	861,68	35,90	SA-5kHz-12V-28dB-2	460,0	457,2
50	12	12:00	70422	1173,70	48,90	DSA-5kHz-12V-28dB-2	452,0	449,3
50	12	12:00	70422	1173,70	48,90	GAU-15kHz-12V-28dB-2	455,0	452,3

APPENDICE G

DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS SLAB1_1 À SLAB1_10 – CHAPITRE 7

Tableau-A G-1 Récapitulatif des données de V_s dans deux directions
pour le spécimen Slab1_2 avec et sans mastic bitumineux

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm			
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle	V_s corrigée
1 Hauteur réelle : 104,65 mm Épaisseur mastic : 3,80 mm	19-16 mm mastic	GAU-25kHz-12V-42dB	293,0	397,2	402,2
	19-16 mm mastic	SA-10kHz-12V-42dB	294,0	398,6	403,7
	36-31 mm capsule B mastic	O-3kHz-12V-28dB	295,0	399,9	405,1
	36-31 mm capsule B mastic	O-5kHz-12V-28dB	293,0	397,2	402,2
	36-31 mm capsule B mastic	O-8kHz-12V-28dB	293,0	397,2	402,2
	36-31 mm capsule B mastic	SA-5khz-12V-28dB	292,0	395,8	400,8
	36-31 mm capsule A mastic	O-3kHz-12V-28dB	287,0	389,1	393,6
	36-31 mm capsule A mastic	SA-5kHz-12V-28dB	286,0	387,7	392,2
	51-45 mm capsule mastic	DSA-5kHz-12V-14dB	297,0	402,6	408,0
	51-45 mm capsule mastic	SA-5kHz-12V-14dB	296,0	401,3	406,6
	26-22 mm capsule	DSA-8kHz-12V-28dB	321,0	419,9	
	26-22 mm capsule	SA-5kHz-12V-28dB	318,0	416,0	
	36-31 mm capsule A	DSA-5kHz-12V-28dB	312,0	408,1	
	36-31 mm capsule A	O-5kHz-12V-28dB	311,0	406,8	
3 Hauteur réelle : 104,61 mm Épaisseur mastic : 3,15 mm	19-16 mm mastic	GAU-25kHz-12V-42dB	306,0	412,2	417,2
	19-16 mm mastic	SA-10kHz-12V-42dB	303,0	408,2	412,9
	19-16 mm mastic	O-10kHz-12V-42dB	302,0	406,8	411,5
	26-22 mm A mastic	SA-12kHz-12V-28dB	308,0	414,9	420,0
	26-22 mm A mastic	DSA-15kHz-12V-28dB	302,0	406,8	411,5
	36-31 mm capsule A mastic	DSA-8kHz-12V-28dB	298,0	401,4	405,8
	36-31 mm capsule A mastic	S-5kHz-12V-28dB	298,0	401,4	405,8
	36-31 mm capsule B mastic	DSA-8kHz-12V-28dB	306,0	412,2	417,2
	36-31 mm capsule B mastic	SA-8kHz-12V-28dB	303,0	408,2	412,9
	51-45 mm capsule mastic	S-3kHz-12V-14dB	306,0	412,2	417,2
	51-45 mm capsule mastic	SA-3kHz-12V-14dB	316,0	425,7	431,4
	51-45 mm capsule mastic	DSA-8kHz-12V-14dB	311,0	418,9	424,3
	51-45 mm capsule mastic	O-3kHz-12V-14dB	317,0	427,0	432,8
	36-31 mm	SA-5kHz-12V-28dB	312,0	408,0	

Tableau-A G-2 Récapitulatif des données de V_s dans deux directions pour le spécimen Slab1_5 avec et sans mastic bitumineux

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm			
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle	V_s corrigée
1 Hauteur réelle : 105,35 mm Épaisseur mastic : 3,34 mm	26-22 mm A capsule	DSA-8kHz-12V-28dB	307,0	404,3	
	26-22 mm A capsule	SA-8kHz-12V-28dB	307,0	404,3	
	26-22 mm B	DSA-5kHz-12V-28dB	305,0	401,7	
	26-22 mm B	SA-8kHz-28dB	305,0	401,7	
	36-31 mm capsule	DSA-8kHz-12-28dB	316,0	416,2	
	36-31 mm capsule	SA-3kHz-12V-28dB	318,0	418,8	
	36-31 mm capsule	O-3kHz-12V-28dB	317,0	417,5	
	51-45 mm	O-3kHz-12V-28dB	318,0	418,8	
	26-22 mm A mastic	DSA-12kHz-12V-28dB	303,0	411,7	
	36-31 mm capsule mastic	DSA-8kHz-12V-28dB	286,0	388,6	392,5
	36-31 mm capsule mastic	O-8kHz-12V-28dB	284,0	385,9	389,7
	51-45 mm capsule mastic	O-3kHz-12V-28dB	318,0	418,8	424,4
3 Hauteur réelle : 105,49 mm Épaisseur mastic : 2,22 mm	26-22 mm A capsule	DSA-10kHz-12V-28dB	308,0	406,1	
	26-22 mm A capsule	SA-8kHz-12V-28dB	309,0	407,5	
	26-22 mm B	DSA-8kHz-12V-28dB	307,0	404,8	
	26-22 mm B	S-8kHz-12V-28dB	305,0	402,2	
	36-31 mm capsule	DSA-10kHz-12V-28dB	305,0	402,2	
	36-31 mm capsule	O-5-kHz-12V-28dB	307,0	404,8	
	51-45 mm	DSA-5kHz-12V-28dB	300,0	395,6	
	26-22 mm A mastic	DSA-8kHz-12V-28dB	295,0	397,2	400,0
	26-22 mm A mastic	O-5kHz-12V-28dB	296,0	398,5	401,4
	36-31 mm capsule mastic	DSA-12kHz-12V-28dB-2	289,0	389,1	391,7
	36-31 mm capsule mastic	S-5kHz-12V-28dB-2	293,0	394,5	397,3
	36-31 mm capsule mastic	SA-5kHz-12V-28dB-2	292,0	393,1	395,9
	51-45 mm capsule mastic	DSA-5kHz-12V-28dB	295,0	397,2	400,0
	51-45 mm capsule mastic	SA-5-12V-14dB	297,0	399,9	402,8

Tableau-A G-3 Récapitulatif des données de V_s dans deux directions pour le spécimen Slab1_6

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm		
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1 Hauteur réelle : 103,78 mm	26-22 mm B	DSA-8kHz-12V-28dB	301,0	390,5
	26-22 mm B	SA-8kHz-12V-28dB	298,0	386,6
	26-22 mm A	DSA-8kHz-12V-28dB	299,0	387,9
	26-22 mm A	SA-8kHz-12V-28dB	304,0	394,4
	36-31 mm capsule	O-3kHz-12V-28dB	305,0	395,7
	36-31 mm capsule	SA-5kHz-12V-28dB	304,0	394,4
	51-45 mm capsule	DSA-5kHz-12V-28dB	313,0	406,0
	51-45 mm capsule	SA-3kHz-12V-28dB	313,0	406,0
3 Hauteur réelle : 105,68 mm	26-22 mm B	DSA-8kHz-12V-28dB	302,0	398,9
	26-22 mm B	DSA-12kHz-12V-28dB	302,0	398,9
	26-22 mm B	SA-8kHz-12V-28dB	300,0	396,3
	26-22 mm A	DSA-12kHz-12V-28dB	294,0	388,4
	36-31 mm capsule	DSA-5kHz-12V-28dB	294,0	388,4
	36-31 mm capsule	SA-5kHz-12V-28dB	295,0	389,7

Tableau-A G-4 Récapitulatif des données de V_s dans deux directions pour le spécimen Slab1_7 avec et sans mastic

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm			
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle	V_s corrigée
1 Hauteur réelle : 104,68 mm Épaisseur mastic : 3,58 mm 1	26-22 mm B	DSA-12kHz-12V-42dB	299,0	391,2	/
	26-22 mm B	S-10kHz-12V-42dB	297,0	388,6	/
	26-22 mm A	O-5kHz-12V-42dB	305,0	399,1	/
	26-22 mm A	SA-8kHz-12V-42dB	305,0	399,1	/
	36-31 mm capsule A	DSA-8kHz-12V-42dB	311,0	406,9	/
	36-31 mm capsule B	O-3kHz-12V-28dB	305,0	399,1	/
	36-31 mm capsule B	SA-5kHz-12V-28dB	304,0	397,8	/
	51-45 mm capsule	DSA-5kHz-12V-28dB	289,0	378,2	/
	51-45 mm capsule	SA-5kHz-12V-28dB	293,0	383,4	/
	19-16 mm mastic	GAU-15khz-12V-28dB	300,0	406,0	/
	19-16 mm mastic	SA-10kHz-12V-28dB	297,0	401,9	/
	26-22 mm capsule mastic	DSA-12kHz-12V-28dB	296,0	400,6	405,5
	26-22 mm capsule mastic	O-5kHz-12V-28dB	296,0	400,6	405,5
	26-22 mm capsule mastic	SA-5kHz-12V-28dB	293,0	396,5	401,2
	36-31 mm capsule A mastic	DSA-8kHz-12V-28dB	290,0	392,4	396,9

Tableau-A G-4 Récapitulatif des données de V_s dans deux directions pour le spécimen Slab1_7 avec et sans mastic (mastic)

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm			
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle	V_s corrigée
1	36-31 mm capsule A mastic	O-8kHz-12V-28dB	290,0	392,4	396,9
	36-31 mm capsule A mastic	SA-8kHz-12V-28dB	288,0	389,7	394,0
	36-31 mm capsule B mastic	DSA-12kHz-12V-28dB	296,0	400,6	405,5
	36-31 mm capsule B mastic	O-5kHz-12V-28dB	293,0	396,5	401,2
	51-45 mm capsule mastic	DSA-8kHz-12V-28dB	279,0	377,6	381,2
	51-45 mm capsule mastic	O-3kHz-12V-14dB	281,0	380,3	384,0
3 Hauteur réelle : 104,66 mm Épaisseur mastic : 3,16 mm	26-22 mm B	O-5kHz-12V-28dB	320,0	418,6	
	26-22 mm A	DSA-12kHz-12V-28dB	329,0	430,4	
	26-22 mm A	O-5kHz-12V-28dB	327,0	427,8	
	26-22 mm A	SA-5kHz-12V-28dB	332,0	434,3	
	26-22 mm capsule	DSA-10kHz-12V-28dB	329,0	430,4	
	26-22 mm capsule	SA-5kHz-12V-28dB	330,0	431,7	
	51-45 mm capsule	DSA-3kHz-12V-28dB	330,0	431,7	
	51-45 mm capsule	O-3kHz-12V-28dB	335,0	438,3	
	19-16 mm mastic	GAU-15khz-12V-28dB	314,0	423,2	428,8
	19-16 mm mastic	SA-10kHz-12V-28dB	308,0	415,1	420,3
	26-22 mm A mastic	DSA-12kHz-12V-28dB	309,0	416,5	421,7
	26-22 mm A mastic	SA-8kHz-12V-28dB	308,0	415,1	420,3
	26-22 mm capsule mastic	DSA-15kHz-12V-28dB	315,0	424,6	430,3
	26-22 mm capsule mastic	O-8kHz-12V-28dB	317,0	427,3	433,1
	36-31 mm capsule A mastic	DSA-8kHz-12V-28dB	310,0	417,8	423,1
	36-31 mm capsule A mastic	SA-8kHz-12V-28dB	308,0	415,1	420,3
	36-31 mm capsule B mastic	SA-5kHz-12V-28dB	318,0	428,6	434,5
	36-31 mm capsule B mastic	DSA-12kHz-12V-28dB	319,0	430,0	436,0
	51-45 mm capsule mastic	DSA-2kHz-12V-28dB	314,0	424,9	430,6
	51-45 mm capsule mastic	DSA-3kHz-12V-28dB	319,0	431,7	437,8
	51-45 mm capsule mastic	DSA-8kHz-12V-28dB	321,0	434,4	440,7
	51-45 mm capsule mastic	O-3kHz-12V-14dB	325,0	439,8	446,4

Tableau-A G-5 Récapitulatif des données de V_s dans la direction 3
pour le spécimen Slab1_8

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm		
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
3 Hauteur réelle : 104,51 mm	26-22 mm	DSA-12kHz-12V-28dB	324,0	423,3
	26-22 mm	SA-8kHz-12V-28dB	324,0	423,3
	36-31 mm	O-5kHz-12V-28dB	324,0	423,3
	36-31 mm	O-3kHz-12V-28dB	312,0	407,6
	36-31 mm	SA-5kHz-12V-28dB	320,0	418,1
	51-45 mm	DSA-8kHz-12V-28dB	312,0	407,6
	51-45 mm	O-3kHz-12V-14dB	317,0	414,1
	51-45 mm	SA-5kHz-12-14dB	319,0	416,8

Tableau-A G-6 Récapitulatif des données de V_s dans deux directions pour le spécimen Slab1_9

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm		
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1 Hauteur réelle : 106,22 mm	26-22 mm A	DSA-8kHz-12V-28dB	294,0	390,4
	36-31 mm capsule	O-3kHz-12V-28dB	310,0	411,6
	36-31 mm capsule	SA-5kHz-12V-28dB	308,0	409,0
	38-34 mm capsule	DSA-8kHz-12V-28dB	296,0	393,0
	51-45 mm capsule	DSA-5kHz-12V-28dB	295,0	391,7
	51-45 mm capsule	SA-5kHz-12-14dB	291,0	386,4
3 Hauteur réelle : 104,57 mm	26-22 mm A	DSA-10kHz-12V-28db	318,0	415,7
	26-22 mm A	O-8kHz-12V-28dB	322,0	420,9
	36-31 mm capsule	DSA-8kHz-12V-28dB	320,0	418,3
	36-31 mm capsule	SA-3kHz-12V-28dB	323,0	422,2
	51-45 mm capsule	DSA-5kHz-12V-28dB	315,0	411,8
	51-45 mm capsule	SA-8kHz-14dB	317,0	414,4

Tableau-A G-7 Récapitulatif des données de V_s dans deux directions pour le spécimen Slab1_10

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm		
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1 Hauteur réelle : 104,20 mm	26-22 mm C	DSA-8kHz-12V-28dB	297,0	387,3
	26-22 mm C	SA-8kHz-12V-28dB	297,0	387,3
	26-22 mm B	O-5kHz-12V-28dB	298,0	388,6
	26-22 mm B	SA-8kHz-12V-28dB	299,0	389,9
	36-31 mm capsule	SA-5kHz-12V-28dB	305,0	397,7
	51-45 mm capsule	DSA-5kHz-12V-28dB	311,0	405,6
	51-45 mm capsule	SA-5kHz-12V-28dB	315,0	410,8
3 Hauteur réelle : 103,86 mm	26-22 mm C	DSA-8kHz-12V-28dB	302,0	392,1
	26-22 mm C	SA-8kHz-12V-28dB	302,0	392,1
	26-22 mm B	DSA-12kHz-12V-28dB	295,0	383,0
	26-22 mm B	O-5kHz-12V-28dB	295,0	383,0
	36-31 mm capsule	DSA-8kHz-12V-28B	306,0	397,3
	36-31 mm capsule	SA-5kHz-12V-28dB	305,0	396,0
	51-45 mm capsule	DSA-5kHz-12V-28dB	301,0	390,8
	51-45 mm capsule	O-5kHz-12V-28dB	303,0	393,4

APPENDICE H

DONNÉES RELATIVES AUX ESSAIS SUR LES SPÉCIMENS SLAB2_1 À SLAB2_4 – CHAPITRE 7

Tableau-A H-1 Récapitulatif des données de V_s dans trois directions
pour le spécimen Slab2_1

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm		
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1 Hauteur réelle : 110,70 mm	19-16 mm	GAU-15k-12V-42dB	320,0	442,8
	19-16 mm	O-15k-12V-42dB	317,0	438,6
	26-22 mm	DSA-25k-12V-42dB	321,0	444,2
	26-22 mm	O-10k-12V-42dB	317,0	438,6
	26-22 mm	SA-10k-12V-42dB	318,0	440,0
	36-31 mm	DSA-15k-12V-42dB	325,0	449,7
	36-31 mm	O-5k-12V-42dB	323,0	446,9
	36-31 mm	GAU-8k-12V-42dB	331,0	458,0
2 Hauteur réelle : 113,37 mm	19-16 mm	DSA-15k-12V-42dB	337,0	477,6
	19-16 mm	GAU-10k-12V-42dB	335,0	474,8
	19-16 mm	SA-10k-12V-42dB	332,0	470,5
	26-22 mm	O-5k-12V-42dB	339,0	480,4
	26-22 mm	GAU-10k-12V-42dB	342,0	484,7
	26-22 mm	SA-10k-12V-42dB	336,0	476,2
	36-31 mm	DSA-8k-12V-42dB	338,0	479,0
	36-31 mm	SA-5k-12V-42dB	335,0	474,8
3 Hauteur réelle : 145,72 mm	19-16 mm	GAU-15kHz-12V-42dB	248,0	451,7
	19-16 mm	O-10kHz-12V-42dB	247,0	449,9
	26-22 mm	DSA-15k-12V-42dB	246,0	448,1
	26-22 mm	GAU-10k-12V-28dB	242,0	440,8
	36-31 mm	DSA-8k-12V-42dB	241,0	439,0
	36-31 mm	DSA-15k-12V-42dB	243,0	442,6

Tableau-A H-2 Récapitulatif des données de V_s dans trois directions pour le spécimen Slab2_2

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm		
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1 Hauteur réelle : 113,12 mm	19-16 mm	O-10k-12V-42dB	303,0	428,4
	19-16 mm	SA-10k-12V-42dB	304,0	429,8
	26-22 mm	DSA-15-12V-42dB	296,0	418,5
	26-22 mm	O-10kHz-12V-42dB	295,0	417,1
	26-22 mm	SA-10kHz-12V-42B	296,0	418,5
	36-31 mm	DSA-3k-12V-42dB	302,0	427,0
	36-31 mm	DSA-8k-12V-42dB	300,0	424,2
	36-31 mm	GAU-5k-12v-28db	300,0	424,2
	36-31 mm	O-3kHz-12V-42dB	305,0	431,3
2 Hauteur réelle : 114,66 mm	19-16 mm	DSA-15k-12V-42dB	326,0	467,2
	19-16 mm	SA-10k-12V-42dB	327,0	468,7
	26-22 mm	DSA-3k-12V-42dB	331,0	474,4
	26-22 mm	GAU-15k-12v-42db	332,0	475,8
	26-22 mm	SA-15kHz-12V-42dB	332,0	475,8
3 Hauteur réelle : 144,30 mm	19-16 mm	SA-5k-12V-42dB	252,0	454,5
	19-16 mm	GAU-5k-12V-42dB	253,0	456,3
	26-22 mm	SA-15k-12V-42dB	250,0	450,9
	26-22 mm	SA-15k-12V-42dB-2	254,0	458,1
	36-31 mm	DSA-8k-12V-42dB	251,0	452,7
	36-31 mm	SA-5k-12V-28dB	253,0	456,3

Tableau-A H-3 Récapitulatif des données de V_s dans trois directions pour le spécimen Slab2_3

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm		
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1 Hauteur réelle : 113,88 mm	19-16 mm	GAU-25k-12V-42dB	305,0	434,2
	19-16 mm	O-5k-12V-42dB	298,0	424,2
	26-22 mm	DSA-15kHz-12V-42dB	299,0	425,6
	36-31 mm	DSA-8kHz-12V-42dB	299,0	425,6
	36-31 mm	DSA-15k-12V-42dB	298,0	424,2
	36-31 mm	O-3k-12V-28dB	297,0	422,8
2 Hauteur réelle : 114,35 mm	19-16 mm	GAU-10k-12V-42dB	336,0	480,3
	19-16 mm	SA-10k-12V-42dB	331,0	473,1
	19-16 mm	DSA-15k-12V-42dB	338,0	483,1
	26-22 mm	DSA-10k-12V-42dB	329,0	470,3
	26-22 mm	DSA-25k-12V-42dB	333,0	476,0
3 Hauteur réelle : 139,53 mm	19-16 mm	SA-10kHz-12V-42dB	258,0	450,0
	19-16 mm	GAU-25kHz-12V-42dB	260,0	453,5
	26-22 mm	DSA-15k-12V-42dB	256,0	446,5
	26-22 mm	O-10k-12V-42dB	253,0	441,3
	26-22 mm	O-5k-12V-42dB	256,0	446,5
	36-31 mm	DSA-8kHz-12V-42dB	264,0	460,5
	36-31 mm	O-3k-12V-28dB	265,0	462,2

Tableau-A H-4 Récapitulatif des données de V_s dans trois directions pour le spécimen Slab2_3 avec mastic bitumineux

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm			
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle	V_s corrigée
1 Hauteur réelle : 113,88 mm Épaisseur mastic : 4,00 mm	19-16 mm	DSA-15kHz-12V-28dB	284,0	418,5	424,5
	19-16 mm	GAU-10kHz-12V-42dB	282,0	415,5	421,4
	26-22 mm	O-5kHz-12V-28dB	287,0	422,9	429,2
	26-22 mm	GAU-15kHz-12V-42dB	286,0	421,4	427,6
	36-31 mm	DSA-5kHz-12V-28dB	287,0	422,9	429,2
	36-31 mm	SA-5kHz-12V-14dB	285,0	419,9	426,1
2 Hauteur réelle : 114,35 mm Épaisseur mastic : 5,00 mm	19-16 mm	DSA-25kHz-12V-28dB	316,0	465,6	477,5
	26-22 mm	DSA-10kHz-12V-28dB	312,0	459,7	471,0
	26-22 mm	GAU-15kHz-12V-28dB	314,0	462,7	474,3
	36-31 mm	DSA-15kHz-12V-28dB	316,0	465,6	477,5
	36-31 mm	O-3kHz-12V-14dB	316,0	465,6	477,5
	36-31 mm	SA-5kHz-12V-28dB	316,0	465,6	477,5
3 Hauteur réelle : 139,53 mm Épaisseur mastic : 4,00 mm	19-16 mm	DSA-15kHz-12V-28dB	253,0	453,9	460,8
	19-16 mm	GAU-15kHz-12V-28dB	249,0	446,8	453,2
	26-22 mm	O-5kHz-12V-28dB	249,0	446,8	453,2
	26-22 mm	DSA-25kHz	245,0	439,6	445,7
	36-31 mm	DSA-5kHz-12V-28dB	245,0	439,6	445,7
	36-31 mm	SA-5kHz-12V-28dB	251,0	450,3	457,0

Tableau-A H-5 Récapitulatif des données de V_s dans trois directions pour le spécimen Slab2_4

Direction	Transducteurs	Hauteur d'analyse 80,00 mm		
		Signal émis	V_s exp.	V_s réelle
1 Hauteur réelle : 112,53 mm	19-16 mm	GAU-5k-12V-42dB	309,0	434,7
	19-16 mm	GAU-15k-12V-42dB	307,0	431,8
	26-22 mm	DSA-15k-12V-42dB	303,0	426,2
	26-22 mm	GAU-15k-12V-42dB	305,0	429,0
	26-22 mm	O-10k-12V-42dB	299,0	420,6
	26-22 mm	SA-10k-12V-42dB	305,0	429,0
	36-31 mm	DSA-8k-12V-42dB	309,0	434,7
	36-31 mm	O-5k-12V-42dB	308,0	433,2
	36-31 mm	SA-5k-12V-28dB	305,0	429,0
2 Hauteur réelle : 114,14 mm	19-16 mm	DSA-25k-12V-42dB	325,0	463,7
	19-16 mm	GAU-15kHz-12V-42dB	328,0	468,0
	19-16 mm	O-5kHz-12V-42dB	326,0	465,1
	26-22 mm	DSA-10k-12V-42dB	323,0	460,9
	26-22 mm	DSA-25kHz-12V-42dB	331,0	472,3
	26-22 mm	GAU-15kHz-12V-42dB	324,0	462,3
3 Hauteur réelle : 136,17 mm	19-16 mm	GAU-15k-12V-42dB	261,0	444,3
	19-16 mm	DSA-15k-12V-42dB	262,0	446,0
	26-22 mm	DSA-15k-12V-42dB	266,0	452,8
	26-22 mm	GAU-5k-12V-42dB	258,0	439,1
	36-31 mm	DSA-8k-12V-42dB	265,0	451,1
	36-31 mm	GAU-8k-12V-42dB	268,0	456,2
	36-31 mm	SA-5k-12V-42dB	265,0	451,1

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abd Elhafeez, T., Amer, R., Saad, A., El Kady, H., & Madi, M. (2014). Evaluation of Flexible Pavement Mixtures Using Conventional Test and Ultrasonic Wave Propagation. *Advances in Civil Engineering Materials*, 3(1), 20p, DOI: 10.1520/ACEM20130076
- Alanazi, N., Kassem, E., & Jung, S. J. (2018). Evaluation of the Anisotropy of Asphalt Mixtures. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 144(2), 7p. DOI: 10.1061/JPEODX.0000053
- Al-Mufti, R. L., & Fried, A. N. (2016). Non-Destructive Evaluation of Reclaimed Asphalt Cement Concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(6), 770–78. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1219877>
- Alvarez, A. E., Macias, N., & Fuentes, L. G. (2012). Analysis of connected air voids in warm mix asphalt," *Dyna*, 79(172), 29-37.
- Alvarez-Lugo, A. E., Carjaval-Muñoz, J. S., & Walubita, L. F. (2014). Comparison of the air voids characteristics of different hot mix asphalt (HMA) mixture types. *Ingeniare Revista chilena de ingeniería*, 22(1), 74-87.
- American Association of State Highway and Transportation (1999). *Official Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. AASHO T-307. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation.
- American Association of State Highway and Transportation. (2017). *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. AASHTO T 378-17. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- APC International Ltd. (2002). *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*. PA, États-Unis d'Amérique : APC International Ltd.
- Arulnathan, R., Boulanger, R. W., & Riemer, M. F. (1998). Analysis of Bender Element Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 21(2), 120-131
- Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association. (1997). *A basic asphalt emulsion manual* (3^{ème} edition). États-Unis d'Amérique: Asphalt Insitute.

ASTM International. (2011). *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test*. ASTM D7369-11. West Conshohocken, PA: ASTM International

ASTM International. (2015). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*, ASTM D6927-15. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2017) *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures*. ASTM D6931-17. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2019). *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. ASTM C215-19. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2021). *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*. ASTM D4015-21. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Baćić, M., Librić, L., Kaćunić, D. J., & Kovačević, M. S. (2020). The Usefulness of Seismic Surveys for Geotechnical Engineering in Karst: Some Practical Examples. *Geosciences*, 10(10), 406, DOI:10.3390/geosciences10100406

Baranyi, A., Kopecskó, K., & Csetényi, L. (2024). Assessing setting times of cementitious materials using semi-adiabatic calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 9193-9201, DOI: 10.1007/s10973-024-13375-2

Barnes, C. L., & Trottier, J-F. (2010). Evaluating in-service asphalt concrete damage using surface waves. *International Journal of Pavement Engineering*, 11(6), 449-458, DOI: 10.1080/10298430903254125

Ben Yahya, M., Lamothe S., & Lachance-Tremblay E. (2025). Effect of temperature and relative humidity on cement-bitumen treated materials produced in the laboratory using emulsion of foamed bitumen. *Construction and Building Materials*, 468, 140433, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140433

Bhasin, A., Izadi, A., & Bedgaker, S. (2011). Three dimensional distribution of the mastic in asphalt composites. *Construction and Building Materials*, 25, 4079-4087, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.046

Bitume Québec. (2007). Chartre 4 Dosage Types. Dans *Le retraitement à froid des chaussées souples* (2p.). Sainte-Julie, Quebec: Bitume Québec

Bitume Québec. (2017). L'entretien des chaussées bitumineuse, Techno bitume 11. Bulletin Technique. Sainte Julie, QC: Bitume Québec. 8p.

Bitume Québec. (2020). Retraitement type 1 - Recyclage à froid. Fiche descriptive. Sainte Julie, QC: Bitume Québec. 4p.

Bitume Québec. (2020). Retraitement type 2 – Décohésionnement / stabilisation. Fiche descriptive. Sainte Julie, QC: Bitume Québec. 4p.

Blake, W. D., & Gilbert, R. B. (1997). Investigation of Possible Relationship between Undrained Shear Strength and Shear Wave Velocity for Normally Consolidated Clays. Dans *Proceeding Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 5-8, 1997* (Vol. 1, pp. 411-420).

Brandenberg, S. J., Kutter, B. L., & Wilson, D. W. (2008). Fast Stacking and Phase Corrections of Shear Wave Signals in a Noisy Environment. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(8), 1145-1165, DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:8(1154)

Brown, S., & Needham, D. (2000). A study of cement modified bitumen emulsion mixtures. *Asphalt Paving Technology*, 69, 92-121

Bureau de Normalisation du Québec. (2002). *Granulats – Matériaux recyclés produits à partir de résidus de béton, d'enrobés bitumineux et de briques – Classification et caractéristiques*. Norme du Québec, NQ 2560-600. Québec, QC: Bureau de Normalisation du Québec.

Cardone, F., Grilli, A., Bocci, M., & Graziani, A. (2015). Curing and temperature sensitivity of cement-bitumen treated materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(10), 868-880. DOI: 10.1080/10298436.2014.966710

Carret, J-C., Di Benedetto, H., & Sauzeat, C. (2018a). Multi Modal Dynamic Linear Viscoelastic Back Analysis for Asphalt Mixes. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(35), 11p, DOI: 10.1007/s.10921-018-0491-3

Carret, J-C., Di Benedetto, H., & Sauzeat, C. (2018b). Charcterization of Asphalt Mixes Behaviour from Dynamic Tests and Comparison with Conventional Cyclic Tension-Compression Tests. *Applied Science*, 8, 18p, DOI: 10.3390/app8112117

Carret, J-C., Di Benedetto, H., & Sauzeat, C. (2020). Linear viscoelastic behavior of asphalt mixes from dynamic frequency response functions. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 44, 1019-1031, DOI: 10.1002/nag.3045

Carter, A., Bueche, N., & Perraton, D. (2013). Laboratory Characterization of CIR and FDR Materials. Dans *Proceedings, Annual Conference-Canadian Society for Civil Engineering, Montréal* (Vol. 5, pp. 4459-4468). Surrey, BC: Canadian Society for Civil Engineering

- Carter, A., Herman, A., Perraton, D., & Ortega, F. (2008). Rutting Resistance and Complex Modulus of Cold-In-Place Recycled Materials. Dans *Proceedings of the Fifty-Third Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA): Saskatoon, Saskatchewan, November 17-19, 2008* (pp. 313-331). West Kelowna, BC: Canadian Technical Asphalt Association.
- Carter, A., & Perraton, D. (2002). La mesure du module complexe des enrobés bitumineux. Dans *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering, Montréal* (pp. 1135-1144). Surrey, BC: Canadian Society for Civil Engineering
- Carter, A., Donovan, H., MacInnis, K., & Strynadka, T. (2021) *Hot Mix Asphalt* (1^{ère} édition). Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)
- Comité français pour les techniques routières (CFTR). (2003). *Retraitemen en place à froid des anciennes chaussées – Guide technique*. France: Service d'Étude techniques des routes et autoroutes (SETRA).
- Cox, B. C., Howard, I. L., & Battey, R. (2015). In-Place Recycling Moisture-Density Relationships for High-Traffic Applications. Dans *IFCEE 2015, San Antonio, Texas* (pp. 349-358). Reston, VA: American Society of Civil Engineering (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784479087.035>
- Cox, B. C., Howard, I. L., & Campbell, C. S. (2016). Cold In-Place Recycling Moisture-Related Desing and Construction Considerations for Single or Multiple Component Binder Systems. *Journal of the Transportation Research Board*, 2575, 27-38. DOI: 10.3141/2575-04
- Di Benedetto, H., Sauzéat, C., & Clec'h, P. (2016). Anisotropy of bituminous mixture in the linear viscoelastic domain. *Mech Time-Depend Mater*, 20, 281-297. DOI: 10.1007/s11043-016-9305-0
- Di Benedetto, H., Sauzéat, C., & Sohm, J. (2009). Stiffness of Bituminous Mixtures Using Ultrasonic Wave Propagation. *Road Materials and Pavement Design*, 10(4), 789-814. DOI: 10.1080/14680629.2009.9690227
- Diefenderfer, B. K., Bowers, B. F., Schwartz, C. W., Farzaneh, A., & Zhang, Z. (2016). Modulus of Recycled Pavement Mixtures. *Journal of transportation Research Board*, 2575, 19-26. DOI: 10.3141/2575-03
- Diffiné, T. (2012). *Analyse des déformations d'une chaussée contenant des matériaux bitumineux recyclés à froid*. (Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada).

- Dyvik, R., & Madshus, C. (1985). Lab Measurements of Gmax Using Bender Elements. Dans *Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions*. New York: American Society of Civil Engineers.
- Elbeggø, D., Hussien, M.N., Ethier, Y., Karray, M. (2019). Robustness of the P-RAT in the Shear-Wave Velocity Measurement of Soft Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(5), 14p, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002017
- Elbeggø, D., Ethier, Y., Dubé J-S., & Karray, M. (2022). Critical insights in laboratory shear wave velocity correlations of clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 59, 935-951, DOI: 10.1139/cgj-2020-0033
- Elbeggø, D., Ethier, Y., Karray, M., & Dubé, J-S. (2023). Assessment of existing Vs-Lab correlations regarding Eastern Canadian clays. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, 14p, DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107607
- Ethier, Y. (2009). *La mesure en laboratoire de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement*. (Thèse de doctorat en génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada)
- Feisthauer, B., Lacroix, D., Carter, A., & Perraton, D. (2013). Simulation and Influence of Early-Life Traffic Curing for Cold InPlace Recycling and Full-Depth Reclamation Materials. Dans *Proceedings, Annual Conference-Canadian Society for Civil Engineering, Montréal* (Vol. 5, pp. 4469-4478). Surrey, BC: Canadian Society for Civil Engineering
- Ferjani, A., Carter, A., Vaillancourt, M., Dardeau, A., & Gandi, A. (2019). Effect of Cement Content on Cracking Resistance of Full-Depth Reclamation Materias Using the Semicircular Bending Test. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(1), 411-422. DOI: 10.1520/ACEM20190062
- Ferroti, G., Grilli, A., Mignini, C., & Graziani, A. (2020). Comparing the Field and Laboratory Curing Behaviour of Cold Recycled Asphalt Mixtures for Binder Courses. *Materials*, 13(21), 19p, DOI : 10.3390/ma13214697
- Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T., & Halles, F. A. (2010). Investigation of the Curing Mechanism of Foamed Asphalt Mixes Based on Micromechanics Principles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 29-38. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.19435533.0000009

- Gandi, A., Kagabo, J., Carter, A., & Singh, D. (2015). Study of Post-Compaction and of the Use of Confining Pressure when Measuring the Complex Modulus of a Full-Depth Reclamation Material. Dans *Proceedings of the Sixty Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA): Ottawa, Ontario, November 16-18, 2015* (pp. 413–432). West Kelowna, British Columbia: Canadian Technical Asphalt Association.
- Gandi, A., BenSalem, F., Bressi, S., Carter, A., & Bueche, N. (2016). Double Coating of Full DepthReclamation Materials. Dans *Proceedings of Sixth Eurasphalt & Eurobitume Congress Prague, République Tchèque* (pp. 13). Doi: 10.14311/EE.2016.227
- Gao, L., Ni, F., Charmot, S., & Luo, H. (2014). Influence on Compaction of Cold Recycled Mixes with Emulsion Using the Superpave Gyratory Compaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), 8p. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000987
- Gao, L., Ni, F., Luo, H., & Charmot, S. (2015). Characterization of air voids in cold-in-place recycling mixtures using X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 84, 429-436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.081
- Godenzoni, C., Cardone, F., Graziani, A., & Bocci, M. (2016). The Effect of Curing on the Mechanical Behavior of Cement-Bitumen Treated Materials. Dans *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials* (pp. 879-890). Springer Netherland. DOI: 10.1007/978-94-017-7342-3_70
- Goli, A., Sasidharan, D., Raj Kumar, B., & Bharath, G. (2023). Effect of curing regime on mechanical characteristics of cold recycled bituminous mixes. *Materials and Structures*, 56(138), 14p. DOI: 10.1617/s11527-023-02229-2
- Graziani, A., Godenzoni, C., Cardone, F., Bocci, E., & Bocci, M. (2017). An application of the Michaelis-Menten model to analyze the curing process of cold recycled bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10, 62-74. DOI: 10.1016/j.ijprt.2016.09.002
- Graziani, A., Iafelice, C., Raschia, S., Perraton, D., & Carter, A. (2018). A procedure for characterizing the curing process of cold recycled bitumen emulsion mixtures. *Construction and Buildings Materials*, 173, 754-762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.091
- Graziani, A., Raschia, S., Mignini, C., Carter, A., & Perraton, D. (2020). Use of fine aggregate matrix to analyse the rheological behavior of cold recycled materials. *Materials and Structures*, 53(72), 17. DOI: 10.1617/s11527-020-01515-7

- Guatimosim, F. V., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. L. B., & Jenkins, K. J. (2016). Laboratory and field evaluation of cold recycling mixtures with foamed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 19(2), 385-399. DOI: 10.1080/14680629.2016.1261726
- Gudmarsson, A., Ryden, N., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Tapsoa, N., & Birgisson, B. (2014). Comparing Linear Viscoelastic Properties of Asphalt Concrete Measured by Laboratory Seismic and Tension-Compression Tests. *Journal Nondestructive Eval*, 33, 571-582. DOI: 10.1007/s10921-014-0253-9
- Hassan, N. A., Airey, G. D., Khan, R., & Collop, A. C. (2012). Nondestructive characterisation of the effect of asphalt mixture compaction on aggregate orientation and segregation using x-ray computed tomography. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(2), 84-92.
- Hao, L., Yingcheng, L., Pan, L., Tao, M., & Guoqiang, L. (2024). Evaluation on tension-compression anisotropic behavior of recycled asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 451, 10p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138729
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991) *Introduction à la géotechnique*. Montréal, Québec : Presses internationales Polytechniques
- Hou, S., Deng, Y., Jin, R., Shi, X., & Luo, X. (2022). Relationships between Physical, Mechanical and Acoustic Properties of Asphalt Mixtures Using Ultrasonic Testing. *Buildings*, 12(3), 306. DOI: 10.3390/buildings12030306
- Houel, A., & Arnaud, L. (2009). Damage Characterization of Asphalt in Laboratory by Ultrasonic Wave Propagation. Présenté dans *Seventh International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30–July 3, 2009* (pp. 6).
- Huang, J., Pei, J., Li, Y., Yang, H., Li, R., Zhang, J., & Wen, Y. (2020). Investigation on aggregate particles migration characteristics of porous asphalt concrete (PAC) during vibration compaction process. *Construction and Building Materials*, 243, 8p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118153
- Hussien, M. N., & Karray, M. (2016). Shear Wave Velocity as a Geotechnical Parameter: An Overview. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(2), 252–272. doi: 10.1139/cgj-2014-0524
- Jain, S., & Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280, 20p. DOI: 10.1016/j.clepro.2020.124378

- Jiang, Z., Ponniah, J., Cascante, G., & Haas, R. (2011). Nondestructive Ultrasonic Testing Methodology for Condition Assessment of Hot Mix Asphalt Specimens. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(7), 751–761. Doi: <https://doi.org/10.1139/l11-046>
- Jiang, J., Zhao, Z., Jiang, X., Leng, Z., Yang, B., & Ni, F. (2023). Moisture migration characterization of bitumen emulsion-based cold in-place recycling mixture over curing. *Materials and Structures*, 56(122), 19p. DOI: 10.1617/s11527-023-02212-x
- Juntao, L., Tanzhong, W., Jinxiang, H., Yongli, Z., & Jiapang, L. (2015). Research on development mechanism of early-stage strength for cold recycled asphalt mixture using emulsion asphalt. *Construction and Building Materials*, 99, 137-142. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.019
- Karacasu M., Okur, V., & Er, A. (2015). A study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures. *The Scientific World Journal*. 2015, 9p, DOI: 10.1155/2015/258586
- Karray, M., & Lefebvre, G. (2009). Détection des cavités sous les pavages par l'analyse modal des ondes de Rayleigh (MASW). *Revue canadienne de géotechnique*, 46, 424-437, DOI : 10.1139/T09-009
- Karray, M., Lefebvre, G., Ethier, Y., & Bigras, A. (2010). Assessment of deep compaction of the Péribonka dam foundation using “modal analysis of surface waves” (MASW). *Canadian Geotechnical journal*, 52, 1-16, DOI : 10.1139/T09-108
- Karray, M., Ben Romdhane, M., Hussien, M.H., Ethier, Y. (2015). Measuring shear wave velocity of granular material using the piezoelectric ring-actuator technique(P-RAT). *Canadian Geotechnical journal*, 52, 1-16. DOI: 10.1139/cgj-2014-0306
- Kim, D., & Kim, Y.R. (2017). Determination of Dynamic Modulus Values of Asphalt Mixtures Using Impact Resonance Testing of Thin Disk Specimens. *Journal of Testing and Evaluation*, 45(2), 509-520, DOI:10.1520/JTE20150076
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering* (1^{re} édition). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall
- Kuchiishi, A. K., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. L. B. (2021). Effect of mixture composition on the mechanical behavior of cold recycled asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(8), 984-994. DOI: 10.1080/10298436.2019.165564
- Lai, W. M., Rubin, D., & Krempel, E. (2010). *Introduction to Continuum Mechanics* (4^{ème} éd). Burlington, USA : Butterworth-Heinemann.

- Larcher, N., Takarli, M., Angellier, N., Petit, C., & Sebbah, H. (2013). High frequency shear modulus of bitumen by ultrasonic measurements. Présenté dans *5th European Asphalt Technology Association conference, Germany* (pp. 13).
- Larcher, N., Takarli, M., Angellier, N., Petit, C., & Sebbah, H. (2015). Towards a viscoelastic mechanical characterization of asphalt materials by ultrasonic measurements. *Materials and Structures*, 48, 1377-1388.
- Lecuru, Q. (2015). *Caractérisation des matériaux bitumineux retraités à froid au moyen de la vitesse des ondes de cisaillement*. (Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada).
- Li, Y., Lyv, Y., Fan, L., & Zhang, Y. (2019). Effects of Cement and Emulsified Asphalt on Properties of Mastics and 100% Cold Recycled Asphalt Mixtures. *Materials*, 12(5), 754-774. DOI: 10.3390/ma12050754
- Lin, M., Hu, C., Guan, H., Easa, S. M., & Jiang, Z. (2021). Impacts of Materials Orthotropy on Mechanical Behaviors of Asphalt Pavements. *Applied Sciences*, 11, 5481. DOI: 10.3390/app11125481
- Lin, S., Ashlock, J. C., and Williams, R. C. (2016). Nondestructive Quality Assessment of Asphalt Pavements Based on Dynamic Modulus. *Construction and Building Materials*, 112, 836–847. Doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.189
- Mangiafico, S., Babadopoulos, L. F. A. L., Sauzéat, C., & Di Benedetto, H. (2018). Nonlinearity of bituminous mixtures. *Mech Time-Depend Materials*, 22, 29-49. DOI: 10.1007/s11043-017-9350-3
- Masad, E., Tashman, L., Somedavan, N., & Little, D. (2002). Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(5), 374-383, DOI: 10.1016/(ASCE)0899-1561(2002)14:5(374)
- Mhenni, A., Hussien, M. N., & Karray, M. (2015). Improvement of the Piezo-Electric Ring Actuator Technique (P-RAT) Using 3D Numerical Simulations Présenté dans *68th Canadian Geotechnical Conference, Québec, Canada, Septembre 20–23, 2015* (pp. 7).
- Ministère des Transports de l'Ontario. (2015). *Construction specification for cold-in-place recycling*. OPSS.MUNI 333. Toronto, ON: Ministère des Transports de l'Ontario.
- Ministère des Transports du Québec. (1996). *Retraitement en place des chaussées*. Québec, Canada: Ministère des Transports du Québec.

Ministère des Transports et Mobilité durable du Québec. (2023). *Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire*. LC 26-003. Québec, QC: Ministère des Transports et Mobilité durable

Ministère des Transports et Mobilité durable du Québec. (2023). *Détermination de la teneur en bitume par ignition*. LC 26-006. Québec, QC: Ministère des Transports et Mobilité durable

Ministère des Transports et Mobilité durable du Québec. (2023). *Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés*. LC 26-040. Québec, QC: Ministère des Transports et Mobilité durable

Ministère des Transports et Mobilité durable du Québec. (2023). *Détermination de la densité maximale*. LC 26-045. Québec, QC: Ministère des Transports et Mobilité durable

Ministère des Transports et Mobilité durable du Québec. (2024). *Préparation d'éprouvettes pour la méthode Marshall*. LC 26-020. Québec, QC: Ministère des Transports et Mobilité durable

Mounier, D., Di Benedetto, H., & Sauzéat, C. (2012). Determination of bituminous mixtures linear properties using ultrasonic wave propagation. *Construction and Buildings Materials*, 36, 638-647. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.136

Mounier, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., & Bilodeau, K. (2016). Observation of Fatigue of Bituminous Mixtures Using Wave Propagation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 7p. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001353

Naji, S., Khayat, K. H., & Karray, M. (2017a). Assessment of Static Stability of Concrete Using Shear Wave Velocity Approach. *ACI Materials Journal*, 114(1), 105-115, DOI: 10.14359/51689244

Naji, S., Karray, M., & Khayat, K. H. (2017b). Versatility of Piezoelectric Ring Actuator Technique (P-RAT). *Advances in Civil Engineering Materials*, 6(1), 189-212, DOI: 10.1520/ACEM20160039

Naji, S., Khayat, K. H., & Karray, M. (2018). Effect of piezoelectric ring sensor size on early-age property monitoring of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 115(6), 813-824, DOI: 10.14359/51706939

Nazarian, S., Tandon, V., & Yuan, D. (2005). Mechanistic Quality Management of Hot Mix Asphalt Layers with Seismic Methods. *Journal of ASTM International*, 2(9), 90-101

- Nguyen, L. N., Nguyen, M. H., Dao, D. V., Nguyen, P. Q., Nguyen, T. M. T., & Tran, T. D. (2023). Effect of curing regimes on the dynamic modulus of entirely RAP cold recycled asphalt mixture. *Journal of Materials: Design and Applications*, 237(9), 1975-1989. DOI: 10.117/14644207231167256
- Nguyen, Q. T., Nguyen, M. L., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Chailleux, E., & Hoang T. T. N. (2019). Nonlinearity of bituminous materials for small amplitude cyclic loadings. *Road Materials and Pavement Design*, 20(7), 1571-1585. DOI: 10.1080/14680629.2018.1465452
- Nguyen, Q. T., Pham, N. H., Di Benedetto, H., & Sauzéat, C. (2020). Anisotropic Behavior of Bituminous Mixtures in Road Pavement Structures. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(1), 178-188. DOI: 10.1520/JTE20180828
- Nguyen, T. L., Szymkiewicz, F., Reiffsteck, P., Bourgeois, E., & Mestat, P. (2011). Caractérisation et effet de l'anisotropie sur le comportement de sols reconstitués. *Revue canadienne de géotechnique*, 48, 1520-1536, DOI : 10.1139/T11-051
- Orosa, P., Orozco, G., Carret, J-C., Carter, A., Pérez, I., & Pasadín, A. R. (2022a). Compactability and mechanical properties of cold recycled mixes prepared with different nominal maximum sizes of RAP. *Construction and Building Materials*, 339, 16p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127689
- Orosa, P., Pérez, I., & Pasadín, A. R. (2022b). Short-term resilient behaviour and its evolution with curing in cold in-place recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 323, 14p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126559
- Orosa, P., Pérez, I., & Pasadín, A. R. (2023). Evaluation of water loss and stiffness increase in cold recycled mixes during curing. *Case Studies in Construction Materials*, 18, 11p. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01877
- Oruc, S., Celik, F., & Akpinar, M. V. (2007). Effect of cement on emulsified asphalt mixtures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(5), 578-583
- Pennington, D. S., Nash, D. F. T., & Lings, M. L. (1997). Anisotropy of G_0 shear stiffness in Gault Clay. *Géotechnique*, 47(3), 391-398
- Pérez, J.-P. (2001). *Mécanique : fondements et applications : avec 300 exercices et problèmes résolus* (6^{ème} édition). Paris, France : Dunod
- Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Nguyen, Q. T., & Pouget, S. (2018). Three-Dimensional Linear Viscoelastic Properties of Two Bituminous Mixtures Made with the Same Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 11p. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002515

Pham, N. H., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., González-León, J. A., Barreto, G., Nicolaï, A., & Jakubowski, M. (2015). Analysis and modeling of 3D complex modulus tests on hot and warm bituminous mixtures. *Mech Time-Depend Mater*, 19, 167-186. DOI: 10.1007/s11043-015-9258-8

Quinteros, V. S., & Carraro, J. A. H. (2021). The initial fabric of undisturbed and reconstituted fluvial sand. *Géotechnique*, 73(1), 1-15, DOI: 10.1680/jgeot.20.P.121

Raschia, S., Graziani, A., Carter, A., & Perraton, D. (2019). Laboratory mechanical characterization of cold recycled mixtures produced with different RAP sources. *Road and Materials and Pavement Design*, 20(1), 233-246, DOI: 10.1080/14680629.2019.158875

Raschia, S., Mignini, C., Graziani, A., Carter, A., Perraton, D., & Vaillancourt, M. (2019). Effect of gradation on volumetric and mechanical properties of cold recycled mixtures (CRM). *Road Materials and Pavement Design*, 20, 740-754. Doi: 10.1080/14680629.2019.1633754

Raschia, S., Perraton, D., Graziani, A., & Carter, A. (2020). Influence of low production temperatures on compactibility and mechanical properties of cold recycled mixtures. *Construction and Building Materials*, 232, 11p. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117169

Raschia, S., Perraton, D., Di Benedetto, H., Lamothe, S., Graziani, A., & Carter, A. (2021). Visco-Elasto-Plastic Characterization in the Small Strain Domain of Cement-Treated Materials Produced at Low Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(4) ,13p. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003653

Raschia, S., Moghaddam, T. B., Perraton, D., Baaj, H., Carter, A., & Graziani, A. (2021). Effect of RAP Source on Compactability and Behavior of Cold-Recycled Mixtures in the Small Strain Domain. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(4), 11p. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003614

Richart, F. E., Hall, J. R., & Woods, R. D. (1970). *Vibration of soils and foundations*. New Jersey, États-Unis: Prentice-Hall inc.

Sangiorgi, C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., & Dondi, G. (2017). A laboratory and filed evaluation of Cold Recycled Mixture for base layer entirely made with Reclaimed Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, 138, 232-239, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.004

Santagata, E., Chiappinelli, G., Riviera, P. P., & Baglieri, O. (2010). Triaxial Testing for the Short Term Evaluation of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 11(1), 123-147. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690263

- Santamarina, J. C., Klein, K. A., & Fam, M. A. (2001). *Soils and waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring* (1ère édition). Chichester, Angleterre: John Wiley & Sons Ltd.
- Shanbara, H. K., Dulaimi, A., Al-Mansoori, T., Al-Busaltan, S., Herez, M., Sadique, M., & Abdel-Wahed, T. (2021). The future of eco-friendly cold mix asphalt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149(15), 14p. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111318
- Soliman, N. A., Khayat, K.H., Karray, M., & Omran, A. F. (2015). Piezoelectric ring actuator technique to monitor early-age properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, 63, 84-95, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.09.001
- St-Amand, A. (2008). *Physique des ondes* (2^eme édition). Québec, Canada: Les Presses de l'Université du Québec.
- Tavassoti-Kheiry, P., Solaimanian, M., & Qiu, T. (2014). *Nondestructive Evaluation of Warm Mix Asphalt through Resonant Column Testing* (Rapport de projet n° PSU-2012-02). Pennsylvanie: Pennsylvania State University.
- Tavassoti-Kheiry, P., Solaimanian, M., & Qiu, T. (2016). Characterization of High RAP/RAS Asphalt Mixtures Using Resonant Column Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(11), 7p, DOI: 10/1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001668.
- Tavassoti-Kheiry, P., Boz, I., Solaimanian, M., & Qiu, T. (2018). Evaluation of Nondestructiveness of Resonant Calomn Testing for Characterization of Asphalt Concrete Properties. *Journal of Testing and Evaluation*, 46(2), 631-640. DOI : 10.1520/JTE20160247
- Underwood, S., Heidari, A. H., Guddati, M., & Kim, R. (2005). Experimental Investigation of Anisotropy in Asphalt Concrete. *Journal of transportation Research Board*, 1929, 238-247. DOI : 10.3141/1929-28
- Wen, H. (2001). *Fatigue Performance Evaluation of WesTrack Asphalt Mixtures Based on Viscoelastic Analysis of Indirect Tensile Test*. (Thèse de doctorat, North Carolina State University, Raleigh, NC).
- Whimoyer, S. L., & Kim Y. R. (1994). Determining Asphalt Concrete Properties via the Impact Resonant Method. *Journal of Testing and Evaluation*, 22(2), 13p.
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., & Amirkhanian, S. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579-604. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006

Zargar, M., Banerjee, S., Bullen, F., & Ayers, R. (2019). An investigation into the Use of Ultrasonic Wave Transmission Techniques to Evaluate Air Voids in Asphalt. Dans *GCEC 2017, Proceedings of the 1st Global Civil Engineering Conference* (pp. 1427-1439). Springer. Doi : 10.107/978-981-10-8016-6_103