

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GENIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

PAR
Quentin LECURU

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX BITUMINEUX RETRAITÉS À FROID AU
MOYEN DE LA VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENT

MONTRÉAL, LE 11 DÉCEMBRE 2015

©Tous droits réservés, Quentin Lecuru, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

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

M. Mourad Karray, B.Ing., M.Sc.A., Ph.D., examinateur externe
Département de génie civil, Université de Sherbrooke

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

LE 23 NOVEMBRE 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de mémoire Alan Carter ainsi que mon co-directeur Yannic Ethier pour leur engagement dans ce projet ainsi que leur conseil et leur temps. De plus je remercie Mourad Karray pour ses conseils sur la méthode ainsi que son aide apportée tout au long du projet.

Mes remerciements vont également à Richard Prowt et John Lescelleur qui m'ont aidé lors de réalisation de mon montage expérimental ainsi qu'à Francis Bilodeau et Sylvain Bibeau sans qui je n'aurais pas pu réaliser mes divers échantillons.

Finalement, je souhaite remercier tous ceux avec qui j'ai collaboré de près ou de loin pour leur bonne volonté et bonne humeur.

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX BITUMINEUX RETRAITÉS À FROID AU MOYEN DE LA VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENT

Quentin LECURU

RÉSUMÉ

L'utilisation de Matériaux Recyclés (MR) dans la réfection des chaussées étant écologiquement et économiquement préférable, de plus en plus de routes seront rénovées avec des enrobés bitumineux (EB) recyclés et notamment, à froid. Cependant, très peu de littérature fait état du comportement de ces matériaux en jeune âge. Une évaluation du comportement de ces EB, dont les caractéristiques en jeune âge peuvent rendre difficile l'analyse par les tests classiques couramment utilisés, est donc importante.

Des techniques non destructives existent, notamment celles utilisant la propagation d'ondes mécaniques. Utilisées pour ausculter les bétons hydrauliques ou bien évaluer le comportement des sols, ces méthodes ont trouvé leur place et ont démontré leur efficacité. Fort de ce constat, ces procédés ont été importés dans le domaine des chaussées et des expériences ont déjà été menées sur des enrobés à chaud.

L'étude se propose de déterminer si la méthode d'analyse d'ondes mécanique de cisaillement générées par des anneaux piézoélectriques peut être utilisée dans l'étude des enrobés bitumineux recyclés à froid de type MR-7 traités à l'émulsion de bitume.

L'eau représentant au moins 10% du volume de l'EB lors de l'élaboration de celui-ci, l'utilisation d'ondes de cisaillement est préconisée. Du fait de l'incompressibilité de l'eau et car les ondes de cisaillement ne se propageront que dans les granulats et le bitumes, cela permettrait de ne caractériser que ces 2 derniers. Enfin, la rapidité de la mesure et l'absence d'un volumineux matériel d'analyse permet de réaliser des tests dès la compaction de l'EB.

La méthode met en évidence un lien fort entre la disparition de l'eau au sein du mélange et l'évolution de la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement au sein du matériau. De plus on peut facilement lier la disparition de l'eau à l'évolution de E^* au sein du matériau, permettant de caractériser celui-ci grâce à la connaissance de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement.

Mots clés : onde de cisaillement, enrobé recyclé à froid, eau, analyse fréquentielle, éléments piézoélectriques.

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX BITUMINEUX RETRAITÉS À FROID AU MOYEN DE LA VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENT

Quentin LECURU

ABSTRACT

More ecological and economic, rehabilitation of pavement with MR will without a doubt be used more and more, and especially cold recycling. However, little information concerning the behaviour of such material in early age exists. A better understanding of the behaviour of these materials, whose characteristics in early age bring complication when running classical tests, is important.

Non-destructive techniques exist, such as those using mechanical wave propagation. Used for concretes or to evaluate the behaviour of soils, these methods have proven their efficiency. Keeping that in mind, these methods have been used in the pavement field and some experiments have already been done on hot mix asphalt.

The aim of this study is to evaluate if a method based on the analysis of mechanical shear wave generated by piezoelectric rings can be used to characterize a Cold In Place Replacement (CIR) material with an asphalt emulsion. The water content of such material is a least 10% before compaction, which recommends the use of shear waves. Indeed, water is incompressible so shear waves will only propagate through bitumen and aggregates, allowing us to characterize these two only. Finally, measurements can be obtained rapidly and do not require heavy and expensive equipment to be run, allowing to start testing samples right after compaction.

The tests show a strong link between water disappearance inside the sample and the evolution of shear wave propagation velocity in the sample. Moreover, water disappearance can be easily related to the evolution of E^* in the sample, allowing us to characterize this material using the evolution of the shear wave propagation velocity.

Keywords: shear waves, cold recycled asphalt pavement, water, frequency analysis, piezoelectric elements.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 État des connaissances	5
1.1 Les chaussées et leur réfection.....	5
1.1.1 Chaussée rigide et souple.....	5
1.1.2 La réfection des chaussées.....	6
1.2 Le recyclage des enrobés bitumineux.....	7
1.2.1 Généralités	7
1.2.2 Les matériaux recyclés.....	7
1.2.3 Composition d'un enrobé recyclé	10
1.3 Les enrobés recyclés à froid (ERF).....	10
1.3.1 Émulsion de bitume	11
1.3.2 Le recyclage à froid en place	15
1.3.3 L'eau dans les CIR avec émulsion de bitume	18
1.4 Essai courants sur les enrobés bitumineux.....	19
1.4.1 L'essai de stabilité Marshall	19
1.4.2 Essai triaxial.....	21
1.4.3 Essai de module complexe.....	22
1.4.4 Essai de traction indirecte (Indirect Tensile Test)	24
1.4.5 Déflectomètre à masse tombante (FWD).....	27
1.4.6 Conclusion partielle	28
1.5 Utilisation des ondes pour la caractérisation des géomatériaux	29
1.5.1 Propagation des ondes.....	29
1.5.2 Ondes de corps.....	29
1.5.3 Résonance	31
1.5.4 Ondes de surface.....	32
1.5.5 Dispersion, vitesse de phase et de groupe.....	33
1.6 Essais utilisant les ondes dans les enrobés bitumineux	34
1.6.1 Onde de compression.....	34
1.6.2 Ondes de cisaillement	37
1.6.3 Méthode de l'impact de résonance	37
1.6.3.1 Ondes de compression et de cisaillement	37
1.6.3.2 Approche énergétique	39
1.6.4 Méthodes issues de l'étude des sols.....	40
1.7 L'utilisation d'éléments piézoélectriques	41
1.7.1 Définition et description	41
1.7.2 Transducteurs piézoélectriques d'ondes de cisaillement	41
1.7.3 Type de mesures avec des éléments piézoélectriques.....	43
1.7.4 Méthode piezoelectric ring actuator (P-RAT)	44
CHAPITRE 2 Programme expérimental.....	49

2.1	Généralités	49
2.2	Caractéristiques des échantillons testés	50
	2.2.1 Caractéristiques des EB	50
	2.2.2 Réalisation des éprouvettes.....	50
2.3	Montage expérimental et composantes.....	57
	2.3.1 Réalisation des transducteurs.....	57
	2.3.2 Motivation et choix des dimensions des transducteurs.....	59
	2.3.3 Plaque support, porte transducteur et bouchons	60
	2.3.4 Génération et acquisition des signaux.....	62
2.4	Déroulement des essais.....	65
	2.4.1 Procédure de la mesure	65
	2.4.2 Cas particulier des plaques d'enrobé	67
CHAPITRE 3 Tests préliminaires et développements		69
3.1	Génération et acquisition des signaux.....	69
3.2	Première approche avec une méthode temporelle	73
3.3	Analyse fréquentielle des signaux	75
3.4	Test des transducteurs « à vide »	78
3.5	Test avec les échantillons.....	81
3.6	Recherche d'améliorations de la mesure	85
	3.6.1 Test énergie.....	85
	3.6.2 Test avec le mastic bitumineux.....	89
3.7	Conclusion partielle	93
CHAPITRE 4 Essais sur les plaques		95
4.1	Introduction.....	95
4.2	Instrumentation des plaques et observations physiques.....	96
	4.2.1 Commentaires sur la plaque 1	96
	4.2.2 Commentaires sur la plaque 2.....	98
4.3	Analyse des résultats.....	103
	4.3.1 Mesure de la masse d'eau	103
	4.3.2 Mesure de la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement	107
	4.3.3 Mesure de la température, de l'amplitude et de la fréquence de résonance.....	121
4.4	Résumé.....	128
CHAPITRE 5 Discussion.....		129
CONCLUSION.....		137
ANNEXE I	Courbes de tendances et équations des courbes de masse d'eau	141
ANNEXE II	Analyse fréquentielle plaque 1, transducteurs 22-16 mm.....	145
ANNEXE III	Analyse fréquentielle plaque 1, transducteurs 38-34 mm.....	163

ANNEXE IV	Analyse fréquentielle plaque 1, transducteurs 51-45	181
ANNEXE V	Analyse fréquentielle plaque 2, transducteurs 38-34 mm.....	189
ANNEXE VI	Analyse fréquentielle plaque 2, transducteurs 51-45 mm.....	209
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		227

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Utilisation des matériaux recyclés dans une chaussée9
Tableau 1.2	Dosages types pour un retraitement en place de type I avec émulsion.....18
Tableau 2.1	Compositions des échantillons cylindriques.....51
Tableau 2.2	Composition de la plaque 1 réalisée le 2015/02/2355
Tableau 2.3	Composition de la plaque 2 réalisée le 2015/04/1356
Tableau 2.4	Dimensions des transducteurs utilisés59
Tableau 3.1	Fréquences de résonance et amortissement propres à chaque paires de transducteurs79
Tableau 3.2	Relations entre la fréquence du signal émis et l'étalement du spectre fréquentiel.....86
Tableau 4.1	Évolution des pertes d'eau dans les plaques.....105
Tableau 4.2	Évolution de la pente de la courbe de masse d'eau pour la plaque 1.....106
Tableau 4.3	Évolution de la pente de la courbe de masse d'eau pour la plaque 2106
Tableau 4.4	Hauteur réelle de la plaque au niveau des transducteurs111
Tableau 4.5	Comparaison des valeurs obtenues117

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Schéma de la structure d'une chaussée.....6
Figure 1.2	Classification et désignation des matériaux recyclés.....8
Figure 1.3	Représentation des phases d'agglomération et de floculation des billes de bitume14
Figure 1.4	Représentation de la phase de coalescence des billes de bitume15
Figure 1.5	Caractéristiques des trois catégories de retraitement en place à froid au Québec.....17
Figure 1.6	Représentation schématique du test d'essai triaxial21
Figure 1.7	Schéma de principe de l'essai de module complexe en traction compression23
Figure 1.8	Schéma de l'essai de traction indirecte.....25
Figure 1.9	Courbes typiques de chargement et de déformation pour un test de traction indirecte en chargement répété26
Figure 1.10	Schéma de principe du déflectomètre à masse tombante.....28
Figure 1.11	Comportement des ondes a) de compression et b) de cisaillement30
Figure 1.12	Comportement des ondes c) de Rayleigh et d) de Love32
Figure 1.13	Disposition classique d'un test utilisant des ondes de compression ou de cisaillement35
Figure 1.14	Modèle 2S2P1S.....35
Figure 1.15	Schéma du test de l'impact de résonance38
Figure 1.16	Illustration du principe de Poisson dans le cas d'un anneau piézoélectrique42
Figure 2.1	Échantillon de 63 mm obtenu à la presse Marshall Test réalisé le jour de la compaction.....52

XVIII

Figure 2.2	a) Presse à cisaillement giratoire et moule b) Échantillon de 107mm obtenu à la PCG	53
Figure 2.3	Compacteuse de plaque LPC	54
Figure 2.4	Protocole de compaction de la compacteuse LPC	56
Figure 2.5	Plaque d'EB après compaction et sortie du moule	57
Figure 2.6	Jeu de transducteurs 51-45 mm.....	58
Figure 2.7	Plaque support avec porte transducteur 22-16 au milieu, bouchon en avant. a) dessous ; b) dessus.....	61
Figure 2.8	Porte transducteurs; a) vue en coupe du porte transducteur 38-34 mm; b) porte transducteur 22-16 mm.....	62
Figure 2.9	Schéma du dispositif d'acquisition.....	63
Figure 2.10	Signaux utilisés pour l'émission. a) Demi Sinus Arrondi, b) Demi Sinus, c) Ondelette, d) Sinus Arrondi, e) Sinus.....	64
Figure 2.11	Échantillons de 107 mm équipé des transducteurs 51-45 mm. Le serre-joint permet de maintenir les transducteurs face à face.....	66
Figure 2.12	Plaque sur la balance pour mesurer la masse.....	67
Figure 2.13	Plaque d'EB instrumentée	68
Figure 3.1	Acquisition de la réponse à un Demi Sinus Arrondi-5kHz-12V-14dB Plaque de 50 mm avec mastic bitumineux, transducteur 38-34 mm, 3jours.....	70
Figure 3.2	Schéma de principe du phénomène de modulation.....	71
Figure 3.3	Cas de résonance, on remarque que le signal rouge est très lentement amorti (8 ms ici) Échantillon de 107 mm de longueur, Sinus-5kHz-12V-28dB, transducteurs 51-45 mm, 3 jours.....	72
Figure 3.4	Présence d'une légère réplique dans le signal reçu (rouge et jaune) Plaque de 50 mm de hauteur, Sinus Arrondi-10kHz-12V-42dB, transducteurs 22-16 mm, 5 jours.....	73
Figure 3.5	Plaque 2, Demi Sinus Arrondi-5kHz-12V-14db, transducteurs 38-34 mm, 6 jours	74
Figure 3.6	Interface du programme d'analyse fréquentielle P-RAT	76

Figure 3.7	Décalage de phase dans un sable Pérignon en utilisant la méthode P-RAT Adaptée de Karray <i>et al.</i> (2015)78	78
Figure 3.8	Transducteurs 38-34. Test à vide; a) Demis Sinus Arrondi 5Khz-12V-42dB; b) Sinus Arrondi 5kHz-12V-42dB.....80	80
Figure 3.9	Émission et réception de signaux pour les 3 couples de transducteurs.....82	82
Figure 3.10	Illustration du problème lié à la faible bande passante d'échange d'énergie84	84
Figure 3.11	Essai sur l'échange d'énergie; en haut : transducteurs 22-16 mm et en bas : transducteurs 51-45 mm.....86	86
Figure 3.12	Test sur l'énergie échangée, essai de réduction du phénomène de résonance.....88	88
Figure 3.13	Test avec mastic bitumineux Transducteurs 38-34 mm, échantillon 107 mm89	89
Figure 3.14	Résultats pour le test avec le mastic bitumineux, transducteurs 22-16 mm91	91
Figure 3.15	Résultats pour le test avec le mastic bitumineux, transducteurs 38-34 mm92	92
Figure 4.1	Transducteur 51-45 supérieur, présence de fissures Plaque 1, 20 heures après compaction97	97
Figure 4.2	Fissure du côté des transducteur 51-45 mm. Plaque 1, 18 jours après compaction.....97	97
Figure 4.3	Fissure en surface de la plaque 2 près du transducteur 51-45 mm; a) 2 jours après compaction; b) 37 jours après compaction. Les flèches bleues délimitent la fissure99	99
Figure 4.4	Transducteur supérieur 22-16 mm après avoir été séparé de la plaque 1100	100
Figure 4.5	Transducteur inférieur 51-45 mm après avoir été séparé de la plaque 1101	101
Figure 4.6	Transducteur inférieur 38-34 mm ainsi que son entretoise (pièce marron) après avoir été séparés de la plaque 2101	101
Figure 4.7	Dessous de la plaque 2. On remarque les 3 emplacements des portes transducteurs, là où de la matière manque102	102

Figure 4.8	De gauche à droite, dessous et dessus de la plaque 2 45 jours après compaction	102
Figure 4.9	Évolution de la masse d'eau au sein des plaques d'enrobés	104
Figure 4.10	Plaque 1, transducteurs 51-45 mm. Présence de 2 pics de résonance.....	109
Figure 4.11	Test plaque 1, transducteurs 22-16 mm	112
Figure 4.12	Test plaque 2, transducteurs 38-34 mm	113
Figure 4.13	Test plaque 2, transducteurs 51-45 mm	114
Figure 4.14	Signaux temporels reçus pour un signal émis demi sinus arrondi-5kHz-12V-14dB.....	116
Figure 4.15	Résultats de l'analyse fréquentielle pour la plaque 1. a) Évolution de V_s en fonction du temps; b) Évolution de V_s en fonction de la masse d'eau dans la plaque	119
Figure 4.16	Résultats de l'analyse fréquentielle pour la plaque 2. a) Évolution de V_s en fonction du temps; b) Évolution de V_s en fonction de la masse d'eau dans la plaque	120
Figure 4.17	Évolution de la température en surface des plaques en fonction du temps, a) Plaque 1; b) Plaque 2.....	122
Figure 4.18	Évolution de la fréquence de résonance en fonction du temps a) Plaque 1 transducteurs 22-16 mm; b) Plaque 1 transducteurs 38-34 mm; c) Plaque 2 transducteurs 38-34 mm; d) Plaque 2 transducteurs 51-45 mm.....	123
Figure 4.19	Plaque 1, transducteurs 38-34 mm. Évolution de l'amplitude du signal reçu pour un sinus arrondi 5kHz-12V-14dB en fonction de a) le temps; b) la masse d'eau; c) V_s	125
Figure 4.20	Plaque 2, transducteurs 38-34 mm. Évolution de l'amplitude du signal reçu pour un demi sinus arrondi 5kHz-12V-14dB en fonction de a) le temps; b) la masse d'eau; c) V_s	126
Figure 4.21	Plaque 2, transducteurs 51-45 mm. Évolution de l'amplitude du signal reçu pour une ondelette 2kHz-12V-14dB en fonction de a) le temps; b) la masse d'eau; c) V_s	127

Figure 5.1	Résultats de l'analyse fréquentielle. a) Évolution de la masse d'eau en fonction du temps; b) Évolution de Vs en fonction du temps pour la plaque 1; c) Évolution de Vs en fonction du temps pour la plaque 2.....	131
Figure 5.2	Comparaison des couples de transducteurs pour les 2 plaques: a) 22-16 mm; b) 38-34 mm; c) 51-45 mm	135

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CIR : Cold In Place Replacement

E : Module d'Young

E* : Module complexe

EB : Enrobé Bitumineux

EBR : Enrobé Bitumineux Recyclé

ERF : Enrobé Recyclé à Froid

f : Fréquence

FDR : Full Depth Reclamation

FWD : Falling Weight Deflectometer

GBR : Granulats d'enrobés recyclés

HMA : Hot Mix Asphalt

LPC : Laboratoire des ponts et chaussées

MASW : Multi Channel Analysis of Surface Waves

MR : Matériaux recyclés

M_r : module résilient

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

SASW : Spectral Analysis of Surface Waves

t : Temps

V_{gr} : Vitesse de groupe

XXIV

V_p : Vitesse de l'onde de compression

V_{ph} : Vitesse de phase

V_s : Vitesse de l'onde de cisaillement

WMA : Warm Mix Asphalt

$\phi(f)$: Phase

φ : Déphasage entre la partie réelle et imaginaire

ρ : Masse volumique

ν : Coefficient de Poisson

ω : Pulsation

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE LONGUEUR

m mètre
mm millimètre
 μm micromètre

UNITÉ DE MASSE

g gramme

UNITÉS MECANIQUES

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 TEMPERATURE

$^{\circ}\text{C}$ degré Celsius

UNITÉS DE TEMPS

s seconde

min minute

h heure

UNITÉS FREQUENTIELLES

Hz Hertz

kHz kiloHertz

UNITÉ DE GAIN

dB décibel

INTRODUCTION

Reconnu depuis des années déjà comme étant un procédé économiquement et écologiquement avantageux, le recyclage des enrobés bitumineux (EB) dans le but de recréer de nouvelles routes suscite un intérêt grandissant chez les chercheurs et les industriels. Les enrobés bitumineux sont des matériaux aux propriétés évolutives et aux caractéristiques multiples, aussi bien du fait de leurs compositions que de leurs utilisations sur le terrain. Une caractérisation précise de ces matériaux est donc importante et de nombreuses études ont été menées dans ce sens. Des modèles rhéologiques ont vu le jour et la connaissance de ces matériaux s'est approfondie.

Les enrobés bitumineux recyclés (EBR) ne sont pas exempts de ces préoccupations. Il aurait été trop simple que ceux-ci possèdent des comportements similaires aux enrobés bitumineux à chaud classiques. En effet, il existe de nombreuses manières de réinsérer des matériaux bitumineux dans des nouvelles chaussées. Ces différentes manières apportent chacune leurs avantages et, malheureusement, leurs inconvénients.

On distingue généralement deux grands types de recyclage, ceux qui se déroulent à chaud et ceux à froid. Le plus écologique de tous est le recyclage à froid et, dans ce cas, peut être réalisé sur l'emplacement même de l'ancienne chaussée. L'utilisation d'émulsions de bitumes ou de mousses de bitumes va de pair avec le recyclage à froid. Cependant, l'utilisation de tels produits confère à l'enrobé bitumineux nouvellement créé et mis en place un caractère très évolutif, le faisant évoluer d'un matériau non lié à un matériau possédant une cohésion propre aux enrobés bitumineux classiques.

La forte utilisation de ces matériaux par les états et les industriels et le comportement très évolutif de ces premiers nous imposent de chercher à mieux connaître leurs comportements. Il est intéressant de rappeler qu'au Québec, lors de la mise en place d'un tel enrobé, la circulation est ré-ouverte seulement 4 heures après la pose. Cela renforce l'importance de connaître le comportement de ces matériaux et d'autant plus en très jeune âge.

La présente étude se propose d'examiner la caractérisation non destructive des matériaux bitumineux retraités à froid à l'aide d'émulsions de bitumes. L'étude se focalisera sur l'application d'une méthode issue du domaine géotechnique utilisant des ondes mécaniques de cisaillement. On cherche ici à déterminer l'évolution de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement au sein d'un enrobé bitumineux retraité à froid en fonction du temps et de la teneur en eau de l'enrobé. De plus l'étude s'efforcera de caractériser les enrobés au plus jeune âge possible après la compaction.

Le premier chapitre du présent document consistera en un état des connaissances. Tout d'abord la réfection des chaussées et les enrobés bitumineux recyclés seront présentés. Ensuite les tests courants réalisés sur les enrobés bitumineux seront décrits et les résultats des essais ayant été effectués sur des enrobés bitumineux recyclés à froid (EBRF) seront mis en avant. Des rappels sur les ondes mécaniques et les propriétés importantes de celles-ci pour la suite de l'étude seront présentés. Des tests utilisant des ondes mécaniques ont été utilisés depuis des dizaines d'années dans l'étude de géomatériaux. Certains de ces tests ont été adaptés pour être utilisés sur les enrobés bitumineux. Les résultats et les conditions d'application de ces tests sont rassemblés dans cette partie. Ce chapitre se termine sur la présentation des éléments piézoélectriques et de la méthode qui sera utilisée dans la suite de l'étude.

Le deuxième chapitre consiste en la présentation des objectifs du mémoire et du programme expérimental. Les caractéristiques des matériaux étudiés sont présentées ici. Le montage expérimental et toutes ses composantes sont par la suite introduits. Les motivations derrière la réalisation de chaque élément sont également discutées. Finalement le déroulement des essais est présenté.

La méthode Piezoelectric Ring Actuator (P-RAT) utilisée dans l'étude est issue de l'étude des sols. Elle a notamment servi à étudier des échantillons d'argile. Il convient donc de vérifier que cette méthode est utilisable puis exploitable dans l'étude des enrobés bitumineux retraités à froid. Le troisième chapitre compilera les tests préliminaires nécessaires à cette évaluation. Tout d'abord les tests sur les transducteurs seuls sont réalisés afin de s'assurer de

leur bon fonctionnement. Ensuite des tests sur des échantillons cylindrique de plusieurs hauteurs seront présentés afin d'établir si la méthode est exploitable ou non dans le cas de l'utilisation des matériaux en question. Finalement les observations et les problèmes rencontrés seront discutés et des améliorations seront apportées à la méthode.

La méthode étant utilisable, dans le sens où les signaux obtenus sont exploitables, les tests visant à caractériser les enrobés bitumineux retraités à froid peuvent débuter. Seront présentés dans le 4^{ème} chapitre les résultats et l'analyse de ces tests. Tout d'abord les observations physiques sur l'évolution des plaques sont présentées. Les résultats des analyses fréquentielles sont ensuite mis en avant, à savoir l'évolution de V_s en fonction du temps et de la masse d'eau. De plus d'autres paramètres tels que les températures de surface des plaques, l'amplitude des signaux et l'évolution de la fréquence de résonance seront discutés.

Dans le 5^{ème} chapitre, les différents résultats sont comparés aux informations concentrés dans l'état des connaissances du 1^{er} chapitre. Une conclusion suit.

CHAPITRE 1

État des connaissances

Ce chapitre fera état des différentes méthodes de tests visant à caractériser les enrobés bitumineux. Certains résultats observés lors d'essais menés sur les matériaux retraités à froid seront présentés en se focalisant le plus possible sur les essais en jeune âge.

1.1 Les chaussées et leur réfection

1.1.1 Chaussée rigide et souple

On distingue généralement deux types de chaussées, les rigides et les souples. La principale différence est la composition du corps de la chaussée.

En effet, les chaussées rigides sont constituées d'une fondation granulaire recouverte d'une dalle de béton.

Les chaussées souples sont composées quant à elles, de deux couches de matériaux granulaires, généralement non traitées, appelées couches de Fondation et de Sous Fondation. Ces deux couches vont apporter une résistance mécanique à l'ensemble de la chaussée pour contrer les efforts générés par le trafic et permettre une répartition progressive des charges vers le sol support. Ces couches granulaires sont recouvertes d'une ou deux couches d'enrobés bitumineux, qui ont pour objectif d'isoler et de protéger les fondations, puis par un couche de roulement qui assure la sécurité et le confort des usagers.

La figure 1.1 représente la structure classique d'une chaussée souple.

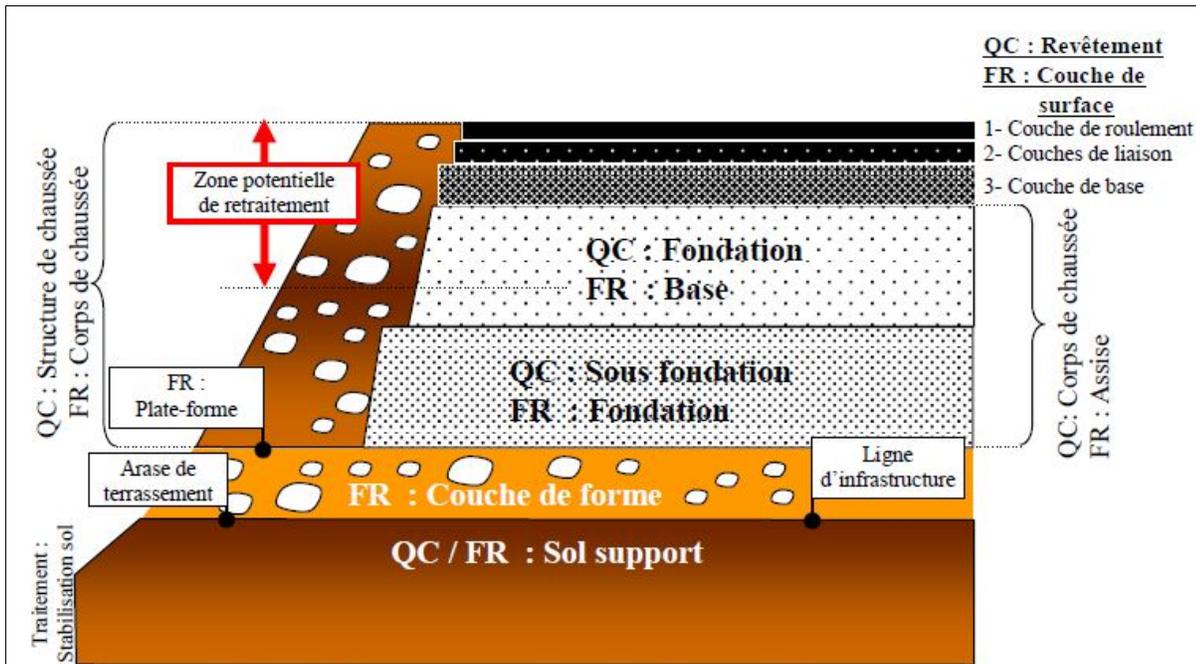


Figure 1.1 Schéma de la structure d'une chaussée
Tirée de Bitume Québec (2007)

Il existe également des chaussées dites « mixtes » qui correspondent à des chaussées rigides sur lesquelles des couches de base et de roulement en enrobé bitumineux sont appliquées.

1.1.2 La réfection des chaussées

L'état d'une chaussée se dégradant au fil de sa vie, il est important d'intervenir au bon moment et d'effectuer des travaux de réfections. En effet, la réfection de chaussée est moins coûteuse pour le propriétaire et moins perturbante pour le trafic des usagers que la reconstruction de l'ensemble de la chaussée. Ainsi, on se doit de trouver des solutions pour rénover les chaussées usagées.

Il convient donc d'identifier les causes des problèmes observés sur la chaussée. En effet, si seul le profil de la chaussée est abimé, alors une réfection est envisageable. Cependant, si la cause du problème est située dans l'infrastructure alors une simple réfection ne suffira pas et une reconstruction est à envisager. Il est important de noter que des réfections fréquentes

permettent de réduire les risques d'une reconstruction totale de la chaussée et donc de réduire le coût d'entretien (Bitume Québec, 2010).

Dans le cas où la réfection est possible et nécessaire, et après avoir identifié la nature du problème, il convient de retirer les couches défailtantes et de les remplacer. Deux choix majeurs s'offrent aux concepteurs, apporter des matières premières neuves ou réutiliser les matériaux issus des couches retirées.

La seconde solution est la plus répandue de nos jours. Elle permet en effet de réduire la consommation en matières premières et donc de réaliser des économies et de réduire l'impact écologique de la chaussée en réduisant la quantité de rebuts (Bitume Québec, 2010).

1.2 Le recyclage des enrobés bitumineux

1.2.1 Généralités

On distingue deux grandes catégories de recyclage, à chaud et à froid. Le recyclage à chaud ressemble assez à la création d'un enrobé bitumineux à chaud classique dans le sens où les éléments vont être chauffés à une température de 160-180°C. Le recyclage à froid permet de réduire l'énergie calorifique apportée en introduisant le liant bitumineux sous forme de mousse de bitume ou d'émulsion de bitume qui nécessitent, lors de leur confection, des températures inférieures à 100°C. Le recyclage à froid est donc une alternative plus écologique car il permet de consommer moins d'énergie (Bitume Québec, 2010).

1.2.2 Les matériaux recyclés

Au Québec, les matériaux recyclés (MR) sont classés selon la norme NQ 2560-600 (BNQ, 2002). Celle-ci fait apparaître sept catégories de matériaux recyclés, MR-1 à MR-7, en fonction du pourcentage de la masse de leurs constituants à savoir les résidus d'enrobés bitumineux, les résidus de béton et les granulats naturels. La figure 1.2 présente les différentes possibilités de mélanges.

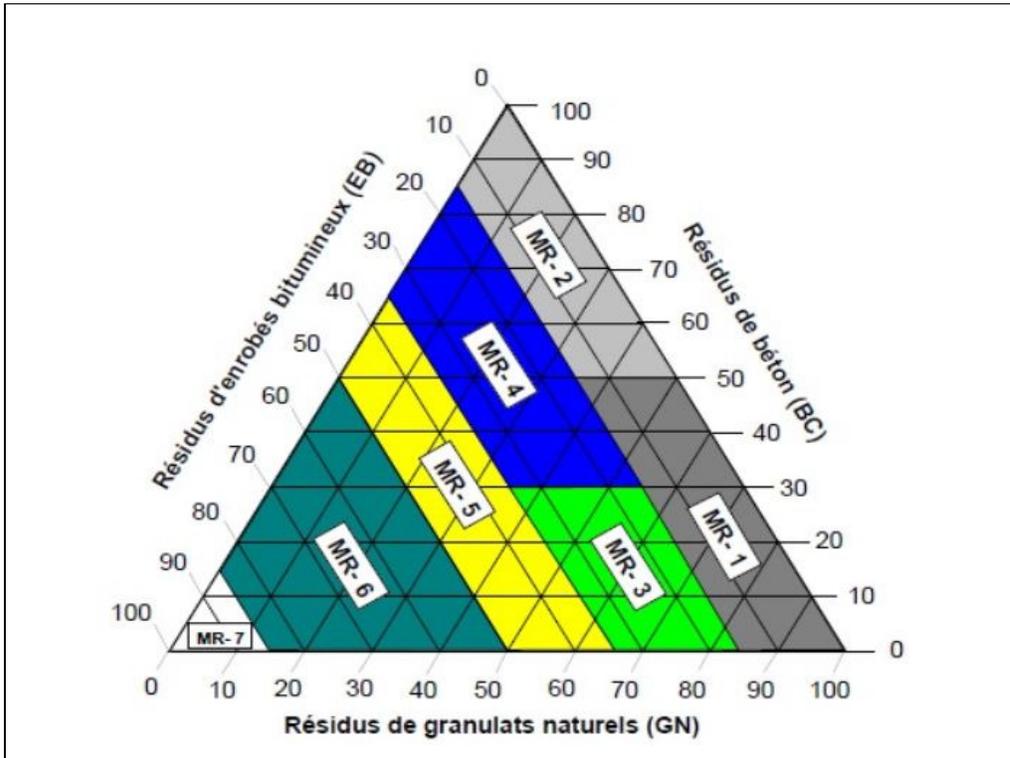


Figure 1.2 Classification et désignation des matériaux recyclés
Issue de la norme NQ 2560-600 (BNQ, 2002)

Il est important de noter que les MR-7 et MR-5 sont les plus utilisés au Québec. Le choix du MR est lié à l'utilisation que l'on prévoit pour celui-ci. Ainsi le tableau 1.1 présente les recommandations de la norme pour l'utilisation des MR.

Tableau 1.1 Utilisation des matériaux recyclés dans une chaussée
Issu de la norme NQ 2560-600 (BNQ, 2002)

Utilisation	Catégorie de matériaux recyclés						
	MR-1	MR-2	MR-3	MR-4	MR-5	MR-6	MR-7
Couche de roulement granulaire (routes non revêtues)	X	X	X	X	X	4	4
Fondation	X	X	2	2	2	4	4
Sous-fondation et transition	X	X	X	X	X	4	4
Coussin, enrobement de conduite et couche anticontaminante	X	X	X	X	X	4	4
Couche filtrante autour d'une conduite perforée	4	4	4	4	4	4	4
Accotement	X	X	X	X	X	1	1
Remblai	X	X	X	X	X	3	3
Légende							
X	Recommandé dans toutes les circonstances.						
1	Recommandé dans les endroits où le risque d'érosion est élevé (aux points bas du profil, dans les pentes, à l'intérieur des courbes et à proximité des ponceaux).						
2	Recommandé sous réserve d'une vérification de l'épaisseur du revêtement bitumineux prévue dans le projet. Peut impliquer une augmentation de l'épaisseur de l'enrobé bitumineux.						
3	Peu recommandable pour des épaisseurs de plus d'un mètre (densifié par couches ne dépassant pas 300 mm d'épaisseur).						
4	Non recommandé						

Les MR-5 seront donc principalement utilisés en tant que couches de fondation, les MR-7 quant à eux, en couches de base. Les MR peuvent être traitées ou non avec un liant hydrocarboné. Le cas échéant, on parle d'enrobés retraités.

1.2.3 Composition d'un enrobé recyclé

Les propriétés souhaitées de la chaussée étant connues, on utilise un MR bien précis. Celui-ci peut être composé, comme vu précédemment, de résidus d'enrobés bitumeux (c-à-d granulats enrobés de bitume), de résidus de granulats naturels (c-à-d granulats non enrobés) et de résidu de béton. Ainsi le MR contient une certaine quantité de bitume et est composé d'un squelette granulaire précis.

Cependant afin de répondre aux critères de performance du nouvel enrobé, certaines conditions doivent être remplies. Par exemple il est important de respecter, selon les normes québécoises, le Volume de Bitume Effectif (VBE) ou encore le squelette granulaire établi. Ainsi, en plus du bitume déjà présent on ajoute un liant dit « d'apport », sous forme de bitume classique pour un recyclage à chaud et sous forme de mousse de bitume ou d'émulsion de bitume pour le recyclage à froid. Ce liant d'apport doit également permettre à l'enrobé recyclé d'avoir des propriétés homogènes, et pour cela le liant d'apport doit permettre au bitume issu du MR de s'intégrer à l'EB et jouer son rôle de liant.

Afin d'améliorer l'enrobage des granulats par le liant, une eau dite « d'ajout » est intégrée au mélange. Concernant le respect du squelette granulaire, on peut également rajouter des granulats neufs et des fillers.

1.3 Les enrobés recyclés à froid (ERF)

Utilisés dans de nombreux pays pour la réfection de chaussées, cette technique se caractérise par l'utilisation d'un liant d'apport sous forme de mousse de bitume ou d'émulsion de bitume. Écologiquement favorable de par la réutilisation des matériaux issus de la chaussée, ce procédé l'est encore plus car la fabrication et la mise en place d'une émulsion ou de la

mousse nécessite moins d'énergie calorifique que s'il fallait chauffer le MR ainsi que le bitume à des températures de 160°C – 180°C.

Les ERF sont utilisés pour rectifier le profil d'une chaussée et rétablir les performances de la chaussée. Ils peuvent être utilisés pour remplacer des couches de roulement fissurées ou présentant des ornières profondes (Diffiné, 2012).

Après la pose des ERF, une cure est nécessaire afin de permettre à la nouvelle couche de gagner en cohésion. Cela est dû à la forte concentration en eau de ces mélanges, notamment lors de l'utilisation d'émulsions de bitume. Les ERF peuvent être fabriqués sur place ou en centrale. Seul le premier cas nous intéresse, le second ne sera donc pas abordé dans la suite.

1.3.1 Émulsion de bitume

Une émulsion est par définition un mélange de deux liquides non miscibles. L'un des deux liquides se trouve dispersé dans l'autre. Dans notre cas, le bitume est dispersé dans de l'eau.

Une émulsion de bitume contient de 55% à 70% de bitume et le reste en eau. La quantité de bitume dépendra de l'utilisation que l'on réserve à l'émulsion.

L'eau et le bitume n'étant pas miscibles, il est nécessaire en premier lieu, d'apporter une énergie mécanique afin d'obtenir ce résultat. C'est ensuite l'ajout d'un tensio-actif qui permettra de conserver l'émulsion sous sa forme. On ajoute également un acide ou une base au mélange selon le type d'émulsion que l'on souhaite utiliser, comme décrit plus loin dans cette partie.

Les molécules des tensio-actifs sont composées de deux parties distinctes. Une tête polaire ionisable dans l'eau qui est dite hydrophile (attirée par l'eau) constituée d'un ou plusieurs hétéroatomes (atomes possédant un doublet d'électron mais qui n'est ni du carbone ni de l'hydrogène) ainsi qu'une queue dite hydrophobe (qui fuira l'eau) qui est une longue chaîne hydrocarbonée.

Dans la pratique, le bitume étant un hydrocarbure, la queue composée de carbone et d'hydrogène va être attirée par le bitume et donc les queues vont venir « se planter » dans les billes de bitume. La tête quant à elle, va rester dans l'eau et de par sa propriété ionisable va créer une charge électrique en surface de la bille de bitume. Ainsi on observe des billes de bitumes possédant une charge électrique en leurs surfaces.

En fonction du tensio-actif utilisé, on obtiendra des charges différentes. On distingue alors plusieurs types d'émulsions en fonction du tensio-actif utilisé.

Les émulsions anioniques :

Elles sont caractérisées par une charge négative en surface des billes 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. 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.

Les émulsions cationiques :

Elles sont caractérisées par une charge positive en surface des billes de bitume du fait de l'utilisation d'un tensio-actif de type sel aminé $R-NH_2$ dont la chaîne carbonée R est la queue de la molécule et le groupe amine NH_2 en est la tête. Celle-ci va s'ioniser en présence d'eau pour donner une tête chargée positivement NH_3^+ . L'ionisation doit se produire cette fois-ci en présence d'un acide, généralement l'acide chlorhydrique HCl est utilisé. Le pH est inférieur à 4.

Il existe ensuite deux autres types : celles avec une tête non ionisable et celle de type amphotère, c'est-à-dire que la tête ionisable peut soit donner un anion ou un cation en fonction du milieu dans lequel l'émulsion est insérée.

Ces charges sont importantes pour la stabilité de l'émulsion car, au sein d'un mélange et de par la présence d'un seul type de tensio-actif, il s'opère une répulsion électrostatique des billes de bitumes les unes par rapport aux autres. Cela permet au mélange de rester sous forme d'émulsion et donc d'être stocké.

Rupture de l'émulsion :

Comme expliqué dans les paragraphes précédents, le type d'émulsion de bitume est lié au pH du mélange. Ainsi, pour entraîner la rupture de l'émulsion, un changement de pH (acide vers basique et vice versa) annulera la répulsion électrostatique. Ce sont donc les éléments que l'on ajoute à l'émulsion qui vont être responsable de ce changement. Les granulats possèdent une polarité. En effet certains sont plutôt chargés positivement et d'autres négativement. L'introduction des granulats dans l'émulsion va donc provoquer une variation du pH qui conduira à la rupture de l'émulsion.

Plus précisément, la rupture de l'émulsion se décompose en trois étapes.

L'agglomération des billes de bitume par sédimentation. C'est ce qui se déroule naturellement lors du stockage. Du fait de la gravité et des différences de densité de la phase dispersée (le bitume) et de la phase dispersante (l'eau) les billes de bitumes sont attirées vers le fond du réservoir. Les plus grosses billes coulent en premier et cela s'accélère plus la différence de densité est importante. Il est à noter qu'une simple agitation du mélange permet de contrer ce phénomène, l'émulsion étant encore stable à ce moment (*Voir figure 1.3*).

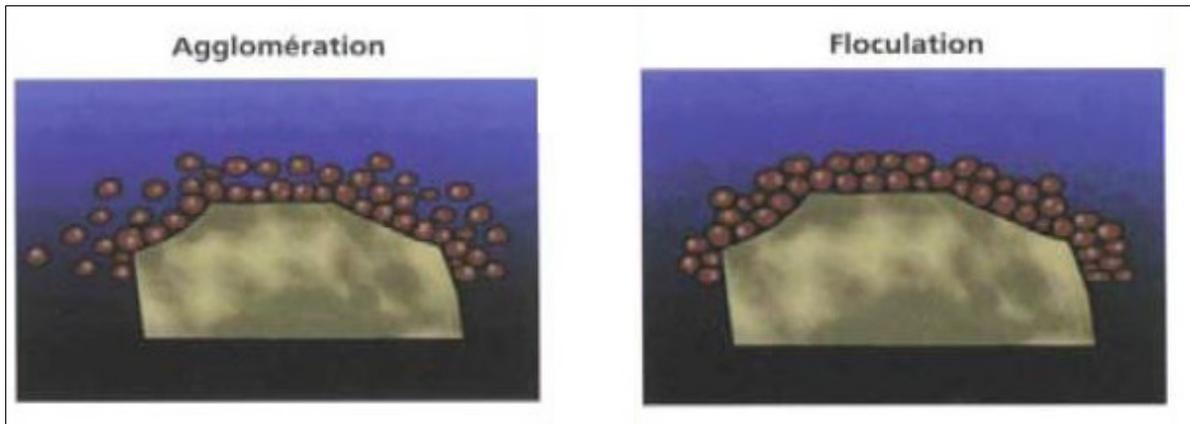


Figure 1.3 Représentation des phases d'agglomération et de floculation des billes de bitume
Adaptée de Le Bec (2012)

La floculation représente également une agglomération des billes de bitume, non plus régie par la gravitation, mais par des forces d'attraction entre les billes (force de Van der Waals). L'insertion dans le mélange d'éléments perturbant le pH global de celui-ci va provoquer une diminution de la force de répulsion électrostatique liée aux charges recouvrant les billes de bitumes. Cela permet donc l'apparition d'une prépondérance des forces de Van der Waals, d'où la floculation des billes de bitume. Ce phénomène est également réversible si on rectifie le pH, cependant on considère que la rupture débute lors de cette phase (*Voir figure 1.3*).

La coalescence va amener la création d'un film continu de bitume, les billes s'étant rejointes. Cette phase apparaît lors de la mise en place de l'enrobé bitumineux et s'accompagne du départ de l'eau (*Voir figure 1.4*).

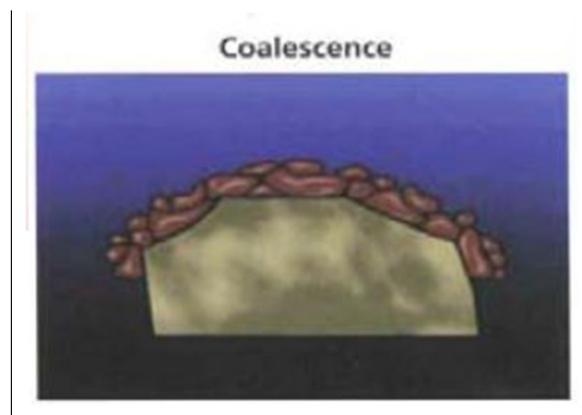


Figure 1.4 Représentation de la phase de coalescence des billes de bitume
Adaptée de Le Bec (2012)

Comme indiqué précédemment, le contact entre le granulat et l'émulsion amorce la rupture. Les granulats possédant une charge, les émulsions cationiques et anioniques vont réagir différemment en présence de ces granulats. Les émulsions cationiques réagissent en présence de granulats positifs et négatifs, alors que les émulsions anioniques ne vont réagir qu'en présence de granulats négatifs. Dans un souci de polyvalence, on utilise le plus souvent des émulsions cationiques.

De plus, lorsqu'on utilise des MR que l'on traite à froid avec une émulsion, on ajoute du ciment à hauteur de 0,5% à 1,5%. Hormis la rapide montée en cohésion du mélange grâce à une rapide disparition de l'eau, le ciment est fortement basique ce qui va accélérer la rupture de l'émulsion cationique qui est globalement acide.

1.3.2 Le recyclage à froid en place

La réutilisation des matériaux issus de la chaussée à remplacer est pertinente, économiquement et écologiquement. Cependant s'il n'est pas nécessaire de transporter les résidus d'EB et les autres résidus issus de la chaussée, les économies d'énergies, d'argent et de temps augmentent encore. C'est l'atout majeur du retraitement en place.

En effet, une seule machine va réaliser les opérations de décohesionnement de la chaussée, d'introduction du liant d'apport et des autres éléments aux agrégats d'enrobés, du malaxage et de l'épandage. Cette machine est suivie d'un rouleau compacteur.

Le recyclage à froid en place se décompose au Québec en trois techniques appelées type 1 à 3 (*Voir figure 1.5*). Le type de technique dépend de la profondeur de chaussée que l'on souhaite traiter (Bitume Québec, 2007).

Si seulement des défauts superficiels ont été diagnostiqués, un type 1 est effectué. C'est l'enrobé bitumineux à chaud présent sur la chaussée qui sera broyé et réutilisé. Un type 1 s'effectue pour une profondeur comprise entre 75 mm et 150 mm. Ce procédé est généralement utilisé lors de la pose d'un MR-7.

Si des défauts structurels sont présents, un type 2 est effectué. En plus de l'EB, les couches de fondations sont également attaquées. On obtient donc un mélange d'EB et de granulats. On peut ou non par la suite traiter le MR (en général un MR-5) obtenu avec une émulsion de bitume ou de la mousse de bitume. Un type 2 s'effectue pour une profondeur comprise entre 100mm et 300mm.

Le type 3 se distingue du type 2 par l'ajout d'une étape de fraisage de la couche supérieure, lorsque celle-ci est trop importante et que trop de MR serait alors produit.

Après la pose de l'ERF en place, il est nécessaire d'effectuer une cure. Au Québec elle consiste à laisser la chaussée à l'air libre pendant 2 semaines. Cette durée peut être réévaluée en cas de forte pluie. Nous verrons dans la partie 1.4.3 que c'est l'eau qui importe quant à l'obtention des performances de l'ERF. Une fois cette cure effectuée, on pose sur la couche d'ERF une couche de roulement en enrobé à chaud qui jouera un rôle de protection et d'imperméabilisation des couches inférieures. Les pratiques concernant le temps d'attente avant le recouvrement de l'ERF dépendent de la région où l'on se trouve. Par exemple, en

Ontario il faut attendre que la fraction massique d'eau dans l'ERF soit inférieure ou égale à 1,5%.

La pose de la couche de roulement est déconseillée lors de la cure, cependant la chaussée est rouverte au trafic dès la fin du compactage de l'ERF.

TYPE DE RETRAITEMENT		OPÉRATIONS	
I		I INTERVENTION UNIQUE	<p>Opération qui consiste à rétablir les profils de surface et à fragmenter en une seule opération les enrobés bitumineux en place tout en introduisant un liant hydrocarboné ou un liant composé qui gagne en cohésion après le curage. Le matériau traité est épanché mécaniquement au moyen d'un finisseur intégré selon l'alignement et la pente spécifiques. La compactité est obtenue par des rouleaux compacteurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Fraisage / Reprofilage 2- Malaxage / Injection 3- Repandage / Mise en forme 4- Compactage
		D INTERVENTION DOUBLE	<p>Opération qui consiste à fragmenter l'enrobé bitumineux en place et de malaxer simultanément une partie de la fondation granulaire sous-jacente. Le matériau obtenu est mis en forme et compacté. Lorsque requis, l'ajout de granulats de correction est prévu à cette étape.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Decollement 2- Déblai en urban 3- Mise en forme 4- Compactage
III		F INTERVENTION TRIPLE	<p>Opération qui consiste à rétablir les profils de surface, à fragmenter et enlever en tout ou en partie la couche d'enrobés bitumineux existante.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Frisage / Reprofilage <p>Opération qui consiste à fragmenter les enrobés bitumineux en place et de malaxer simultanément une partie de la fondation granulaire sous-jacente. Le matériau obtenu est nivelé et compacté.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Decollement 2- Déblai en urban 3- Mise en forme 4- Compactage
		D INTERVENTION TRIPLE	<p>Opération qui permet d'introduire un liant hydrocarboné ou composite au matériau fragmenté qui gagne en cohésion après curage. Le matériau traité est nivelé mécaniquement au moyen d'une niveleuse selon l'alignement, la pente et le bombement spécifiques. La compactité est obtenue par des rouleaux compacteurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Malaxage / Injection 2- Mise en forme 3- Compactage
		I INTERVENTION TRIPLE	<p>Opération qui permet d'introduire un liant hydrocarboné ou composite au matériau fragmenté qui gagne en cohésion après curage. Le matériau traité est nivelé mécaniquement au moyen d'une niveleuse selon l'alignement, la pente et le bombement spécifiques. La compactité est obtenue par des rouleaux compacteurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Malaxage / Injection 2- Mise en forme 3- Compactage

Figure 1.5 Caractéristiques des trois catégories de retraitement en place à froid au Québec
Tirée de Bitume Québec (2007)

1.3.3 L'eau dans les CIR avec émulsion de bitume

La forte présence d'eau dans les enrobés recyclés à froid s'explique par la nécessité d'avoir un bon enrobage des granulats. En effet, même si une émulsion est aqueuse, elle permet très rarement un bon enrobage à elle seule. De plus, l'ajout d'eau permet de réduire la quantité d'énergie nécessaire au malaxage car les granulats sont lubrifiés et trouvent plus facilement leur place (Gaonach, 2012).

Prenons par exemple, un retraitement en place de type I avec émulsion de bitume. Les dosages types pour ce retraitement sont indiqués dans le tableau 1.2. Ce tableau permet, en fonction de l'épaisseur de la couche, d'obtenir les quantités d'émulsion et d'eau totale à insérer au mélange.

Tableau 1.2 Dosages types pour un retraitement en place de type I
avec émulsion
Tiré de Bitume Québec (2007)

	Émulsion (L/m ²)*			Ciment (kg/m ²)	Eau (L/m ²)		
	Teneur en bitume résiduel ajoutée (%)			Taux d'ajout (%)	Teneur en eau totale (%)		
Épaisseur traitée (mm)	0,8%	1,0%	1,4%	0,5%	4,5%	5,5%	6,5%
75	2	2	3	1	7	9	10
100	3	3	5	1	10	12	14
150	4	5	7	2	14	17	21
200	5	7	9	2	19	23	27
250	7	8	12	3	24	29	34
Volume d'eau moyen par volume d'EB (L/m³)					95,5	116,9	136,9

* Émulsion à 60% de teneur en bitume

Les teneurs indiquées dans le tableau 1.2 sont massiques. Cependant, si on regarde la quantité d'eau totale du mélange (eau contenue dans l'émulsion à laquelle on ajoute l'eau d'ajout) de façon volumique, on obtient une teneur volumique de l'ordre de 9,5% à 13%, ce qui est important.

Aussi importante et nécessaire que soit l'eau dans le mélange, une trop grande quantité d'eau dans une chaussée amène des soucis. En effet, de par les températures très froides en hiver que subit le Québec, une trop forte présence d'eau risquerait d'endommager la structure de la chaussée. De plus, c'est avec la disparition de cette eau que la cohésion de l'EB va croître. Juste après la pose, la cohésion est donc très faible. Enfin, lors de la réalisation d'un ERF de type I, une émulsion de type très lente (SS) est utilisée. La rupture plus lente permet d'avoir du temps supplémentaire pour la mise en place, mais cela retarde la montée en cohésion.

Le compactage joue un rôle d'essorage de l'EB et va permettre d'éliminer une partie de l'eau. La rupture plus lente et la forte présence d'eau, même après compactage, font que ces types d'enrobés à très jeune âge sont assimilables à des matériaux non liés.

1.4 Essai courants sur les enrobés bitumineux

Ayant pointé que la cohésion des enrobés bitumineux retraités à froid grâce à une émulsion de bitume n'était pas optimale en très jeune âge (quelques heures après la pose), il est judicieux de se demander si les tests plébiscités par les normes sont adaptés à ce type de matériaux. La présente partie fera décrit les tests usuels et les résultats obtenus dans le cas des ERF.

1.4.1 L'essai de stabilité Marshall

Relativement aux matériaux retraités à froid, au Québec, cet essai est régi par la norme LC 26-002 (MTQ, 2001). Celle-ci précise que pour ce test, par teneur de bitume, six échantillons doivent être réalisés à l'aide d'une presse Marshall (50 coups de chaque côté). Les échantillons doivent ensuite subir une cure à l'aire libre pendant 24h dans leurs moules à

température de la pièce puis être démoulés et placés dans une étuve à 38°C pour une cure de 24 heures. La moitié des échantillons subissent le test de la stabilité Marshall à sec. Pour cela ils doivent être, après la cure, ramenés à une température de 22°C. Les échantillons sont ensuite placés entre les mors de la presse et vont subir une compression. La stabilité Marshall est définie comme la valeur de la charge maximale lors de la rupture de l'éprouvette. L'autre moitié des éprouvettes subiront un test de densité brute puis vont être immergées pendant une heure à une pression équivalente à 100 mm de mercure suivie d'une heure à pression atmosphérique. Ces échantillons vont ensuite subir un essai de stabilité Marshall dit humide. On peut également déterminer, grâce à cet essai, le fluage Marshall qui est la valeur de l'affaissement lors de la rupture de l'éprouvette.

Feisthauer *et al.* (2013) ont utilisé ce test lors de leur étude. Le but étant de simuler l'effet de cure en jeune âge, ils ont essayé de se rapprocher au mieux des conditions de la chaussée à cet âge. Les essais de stabilité ont été menés sur un MR5 (50% de résidus d'EB, 50% de résidus de granulat) et un MR7 (100% de résidus d'EB) traités à l'émulsion de bitume. Afin de reproduire un ERF utilisé en chantier, 1% de ciment Portland a été ajouté, pour obtenir plus rapidement une bonne cohésion et éliminer plus rapidement l'eau présente.

Les échantillons de MR7 ont été obtenus grâce à une presse Marshall. La cure a été aménagée afin de se rapprocher de la situation sur chantier : 24 heures dans le moule, 29 heures à l'air libre. Le MR 5 a été compacté à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire (PCG), une cure de 24 heures à 38°C a été effectuée. On remarque donc que pour réaliser ce type de test, il faut nécessairement effectuer une cure sur les échantillons, et donc s'éloigner du jeune âge de l'EB.

La norme mise à part, les éprouvettes n'auraient pas assez de rigidité et de cohésion pour subir efficacement le test. En effet, la cohésion d'un MR retraité à froid augmente lorsque la teneur en eau diminue et pour se faire, il faut une cure (Cardenas, 2013).

Enfin la présence d'eau dans le mélange nécessite d'apporter des modifications à la presse Marshall, ainsi qu'à la PCG, afin de permettre à l'eau de s'évacuer. En effet, l'eau étant incompressible et fortement présente, si elle n'est pas évacuée des pressions internes peuvent apparaître et rendre difficile le bon compactage de l'échantillon. De plus, cela peut abîmer les équipements.

1.4.2 Essai triaxial

Généralement utilisé pour caractériser les matériaux non liés, l'essai triaxial vise à déterminer le module résilient d'un matériau. Les enrobés bitumineux recyclés à froid en très jeune âge peuvent être considérés comme des matériaux granulaires du fait de l'absence de cohésion du mélange. L'adaptation de ce test aux EB est donc sensée (Santagata *et al.*, 2010). Afin de reproduire le comportement de compression au sein du sol, l'essai est réalisé sous confinement. Il permet dans le cas des EB de reproduire la compression exercée par le reste de la chaussée sur l'échantillon analysé. Le confinement est exercé par une contrainte radiale constante (σ_3) ainsi qu'une contrainte axiale de compression constante ($\sigma_{compression}$) appliquées sur l'échantillon (*Voir* figure 1.6).

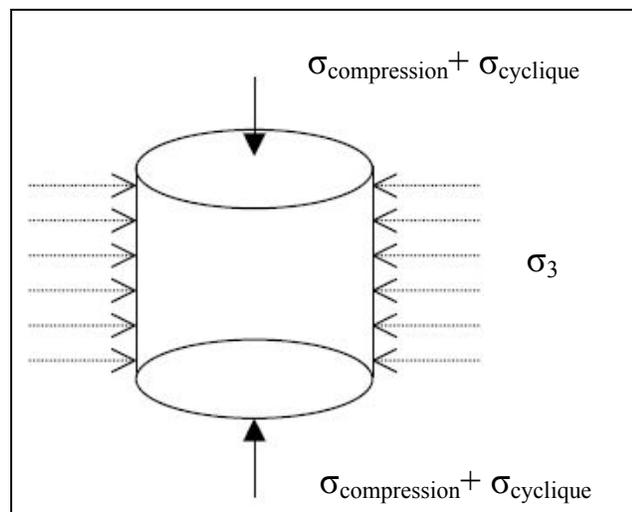


Figure 1.6 Représentation schématique du test d'essai triaxial
Adaptée de Wen (2001, p. 8)

Afin de réaliser le test, une contrainte $\sigma_{cyclique}$ est exercée axialement sur l'échantillon pendant un temps t_c suivie d'un temps de repos t_r . Le module résilient M_r est obtenu en faisant le rapport de la contrainte exercée et de la déformation élastique ϵ :

$$M_r = \frac{\sigma_{cyclique}}{\epsilon} \quad (1.1)$$

Cet essai a été par la suite utilisé pour caractériser les EB (Calderon, 2009).

Des essais ont été menés sur des MR traités à l'émulsion de bitume ayant subis des cures de 1 à 2,5 heures à des températures de 20, 40 et 60 °C.

Il ressort de cette étude des problèmes liés à la compaction des échantillons. En effet l'essai adapté aux enrobés bitumineux prévoit la compaction de l'échantillon à la PCG (30 tours). De plus, le test impose un ratio hauteur/diamètre supérieur à 2 et, du fait de la taille de certains résidus d'enrobé bitumineux, il a été choisi de prendre un diamètre de 100 mm donc une hauteur de 200 mm. Il en découle une inhomogénéité de la compaction des échantillons (Santagata et al., 2010). Cette inhomogénéité provoque également un mauvais contrôle de la contrainte appliquée. En effet, le matériau testé se compacte au lieu de simplement se déformer.

1.4.3 Essai de module complexe

Les essais de module complexe cherchent à caractériser le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux à différentes températures et pour des fréquences de sollicitations différentes. Les déformations imposées sont de petite taille, on se situe ainsi dans le domaine viscoélastique linéaire. La rigidité est donc indépendante vis à vis des déformations et de la contrainte. 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 , soit $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$

Du fait du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux, il a été montré mathématiquement que le passage dans le domaine complexe est nécessaire si on souhaite conserver une relation du même type qui se rapproche au mieux de la réalité.

Le module complexe est défini comme étant le rapport entre la contrainte complexe et la déformation complexe à une température et à une fréquence donnée. Il se décompose en 2 éléments : la partie réelle (E_1) est considérée comme étant l'aspect élastique de l'EB, la partie imaginaire (E_2) représente quant à elle l'aspect visqueux.

On a : $E^* = E_1 + i E_2$ (Carter et Perraton, 2002)

Au Québec, les essais sont réalisés en traction/compression, la déformation est imposée suivant une loi sinusoïdale de faible amplitude ($\epsilon < 100 \mu\text{def}$). La figure 1.7 présente le principe de l'essai.

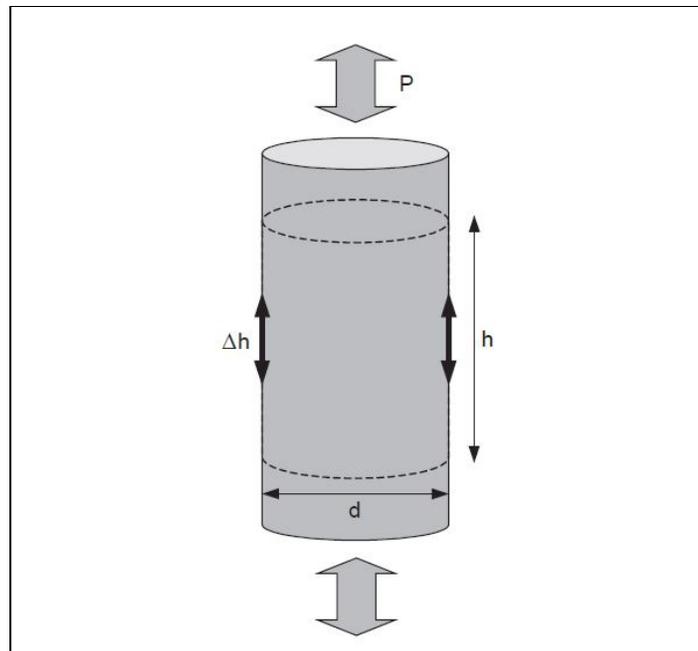


Figure 1.7 Schéma de principe de l'essai de module complexe en traction compression
Tirée de la norme LC 26-700 (MTQ, 2009)

En vertu du principe d'équivalence temps-température, on peut obtenir des courbes décrivant le comportement d'un enrobé bitumineux à des températures et des fréquences non accessibles lors des essais. On obtient ainsi des courbes dite maîtresses de l'enrobé qui expriment la valeur de la norme du module complexe en fonction de la fréquence des sollicitations. Ces courbes sont généralement tracées à une température donnée.

Ce genre d'essais est mené sur des MR de type Cold In place Replacement (CIR) et Full Depth Reclamation (FDR), respectivement type 1 et 2-3 au Québec. Cependant, il faut noter que les matériaux ont subis des cures, suivant les normes de chaque test. Les matériaux n'ont donc pas été testés en très jeune âge. Il a été montré que la caractérisation de ce type de matériaux en laboratoire donne des résultats de valeur de module complexe de l'ordre d'un tiers comparativement à l'enrobé de départ dont sont issus les Granulats d'enrobé recyclés (GBR) utilisés (Carter *et al.*, 2013).

D'autres documents montrent cependant que des MR traités à la mousse de bitume en central donneraient, pour des températures basses ou de hautes fréquences, des résultats semblables à ceux des enrobés à chaud dont pourraient être issus les GBR (Todd, 2015).

De par sa nature, le test de caractérisation du module complexe n'est pas adapté aux MR en très jeune âge. Effectivement, dès le premier cycle l'échantillon serait brisé, s'il ne s'est pas effondré sur lui-même avant. Une cure est indispensable avant d'effectuer le test.

1.4.4 Essai de traction indirecte (Indirect Tensile Test)

L'essai de traction indirecte est un essai de compression réalisé diamétralement dans le sens de la longueur sur un échantillon cylindrique prélevé sur la chaussée à tester ou bien réalisé en laboratoire. L'échantillon testé peut être une éprouvette Marshall, une éprouvette obtenue grâce à la PCG ou une carotte de chantier. La figure 1.8 présente le principe de l'application de la charge sur l'échantillon. La vue est une coupe diamétrale.

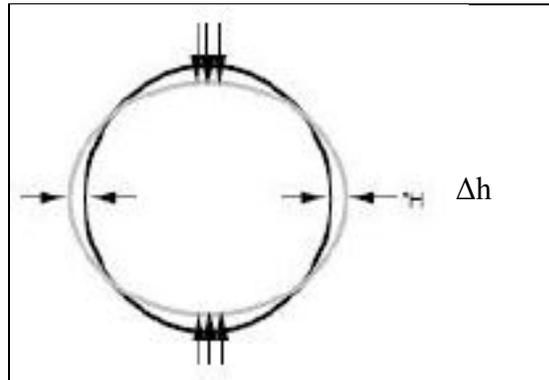


Figure 1.8 Schéma de l'essai de traction indirecte

Il existe plusieurs déclinaisons de cet essai.

Résistance à la traction indirecte (Indirecte tensile strength) :

Ce test consiste à appliquer une déformation évoluant de façon constante sur l'échantillon jusqu'à la rupture de celui-ci. La résistance à la traction est homogène à une pression et est calculée de la sorte :

$$S = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \quad (1.2)$$

avec d le diamètre (m), t la hauteur de l'échantillon (m) et P la charge appliquée lors de la rupture (N). Cet essai suit la norme AASHTO TP31 (Wen, 2001).

Chargement répété en traction indirect (Repeated load Indirect tensile) :

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. (Voir figure 1.9) On obtient par cet essai le module résilient de l'échantillon qui correspond au rapport de l'amplitude de la contrainte imposée sur la micro déformation élastique relevée. Cela correspond à l'équation 1.1 avec, rappelons-le, M_r le module résilient (MPa), σ_{cyclique} la contrainte sinusoïdale (MPa) et ε la micro déformation relevée (m/m).

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 (Wen, 2001; Rojas, 1999).

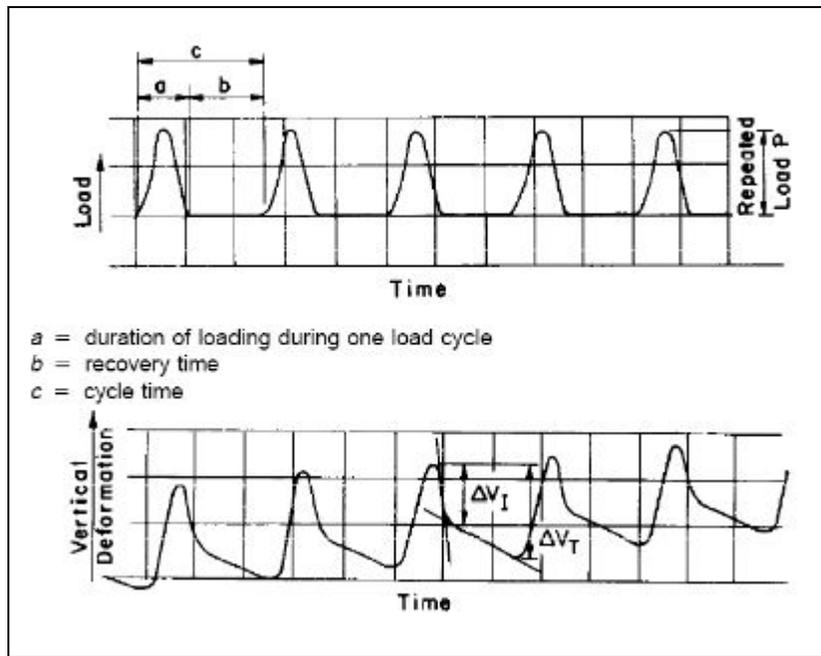


Figure 1.9 Courbes typiques de chargement et de déformation pour un test de traction indirecte en chargement répété
 Tiré de Rojas (2009)

Ce test suit la norme ASTM D7369-11 (ASTM International, 2012).

Test de fatigue :

Le montage peut être utilisé afin de déterminer la tenue à la fatigue de l'échantillon. On impose une certaine déformation et on relève le nombre de cycles lors de la rupture. On peut ainsi tracer la droite de Wöhler qui donne les couples fréquence d'utilisation / contrainte appliquée à ne pas dépasser (Wen, 2001). Pour les enrobés à chaud, ce sont les directives de la norme AASHTO TP9-96 que ces tests ont suivi (Wen, 2001)

Ainsi, le manque de cohésion au sein de l'échantillon ne permettrait pas, encore une fois, de mener à bien la réalisation des essais de ce genre. De plus, dans le cas du test de chargement répété ou du test de fatigue, la répétition des déformations pourrait, dans cas d'un ERF en très jeune âge, continuer la compaction de l'ERF et donc modifier radicalement ses propriétés.

1.4.5 Défectomètre à masse tombante (FWD)

Simulant le passage d'un essieu de camion sur la chaussée, le FWD va permettre de mesurer le champ de déflexion engendrée par celui-ci. L'essieu est simulé par une masse de 50 à 300 kilogrammes tombant d'une hauteur de 20 à 400 mm sur un disque en acier posé sur la chaussée. Cependant, ce test ne permet pas de reproduire l'effet de rotation des roues sur la chaussée.

En faisant varier ces 2 paramètres, on peut modifier l'énergie développée lors de l'impact. Des transducteurs (géophones) répartis sur la chaussée vont mesurer la déformation de la chaussée en plusieurs points le long d'une ligne (*Voir* figure 1.10). Grâce à ces informations sur la déformation de la chaussée on peut, à l'aide d'autres paramètres tels que le coefficient de Poisson et la hauteur des couches d'enrobés, déterminer les modules via des rétro-calculs (Diffiné, 2012).

Les équations utilisées présentant de nombreuses inconnues, et une erreur d'appréciation de la hauteur de la chaussée de quelques millimètres peuvent modifier la valeur du module obtenu de 15 à 20% (Diffiné, 2012).

Ce test doit être réalisé in situ et est non destructif ce qui permet de garder l'intégrité de la chaussée (Loizos et Papavasiliou, 2006).

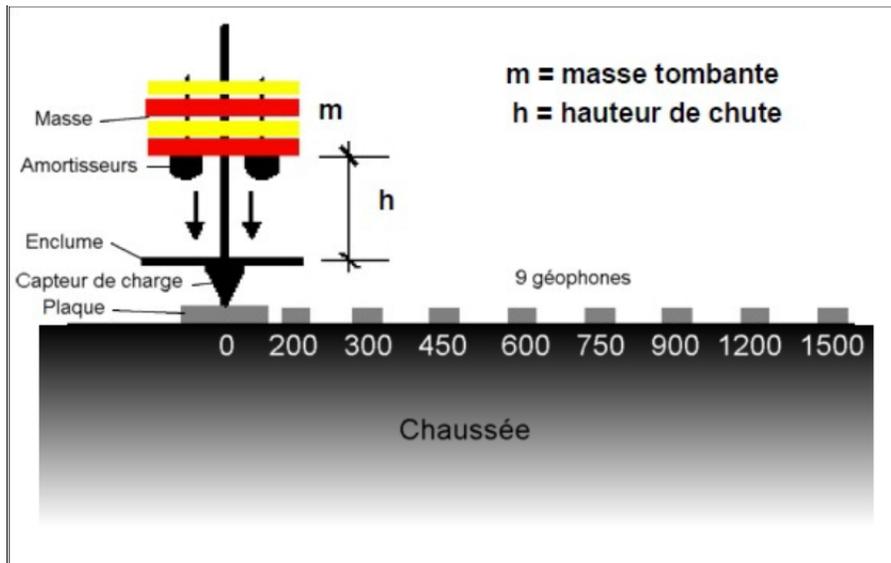


Figure 1.10 Schéma de principe du déflectomètre à masse tombante
Tirée de Diffiné (2012, p. 51)

1.4.6 Conclusion partielle

Il apparaît que les tests courants ne sont pas adaptés pour la caractérisation en très jeune âge des enrobés recyclés à froid. Tout d'abord, de par les normes et recommandations qui encadrent les tests, une cure est toujours effectuée, même si elle est quelques fois modifiée et raccourcie pour se rapprocher au mieux des conditions d'ouvertures des chantiers routiers. De plus, la forte présence d'eau dans ces matériaux et le comportement non lié qui en découle rendant difficile la préparation d'échantillons et la manipulation de ceux-ci en très jeune âge.

Des solutions peuvent être envisagées, tels que le confinement des échantillons, non sans rappeler les tests triaxiaux, ou encore une compaction des échantillons plus longue. Cependant, ceci risque de modifier les propriétés des matériaux étudiés et de ne pas rendre compte fidèlement du comportement sur chantier dont on souhaite se rapprocher le plus possible.

Une autre approche doit donc être envisagée.

1.5 Utilisation des ondes pour la caractérisation des géomatériaux

1.5.1 Propagation des ondes

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. Ainsi on distingue les ondes linéaires, planes et sphériques respectivement des ondes se propageant dans une, deux et trois dimensions (St-Amand, 2008).

On classe généralement les ondes en deux catégories : les ondes de corps et les ondes de surface.

1.5.2 Ondes de corps

En sismologie, une onde de corps est une onde qui se propage au sein d'un même milieu. Soit v la vitesse de déplacement local de la matière du milieu considéré.

Si c et v sont parallèles, on dit que l'onde observée est longitudinale ou de compression, que l'on note onde P. On observe donc un déplacement de matière dans le même sens que celui de propagation de l'onde. La propagation du son est une onde longitudinale.

Si c et v sont perpendiculaires, on dit que l'onde est transversale ou de cisaillement que l'on note onde S. La matière se déplace donc perpendiculairement par rapport à la direction de propagation de l'onde. Une image qui s'en rapproche est l'onde créée lorsque l'on jette un caillou dans une mare même si ce n'est, pas dans ce cas, une onde de corps mais une onde de surface.

La figure 1.11 illustre le comportement de ces deux ondes.

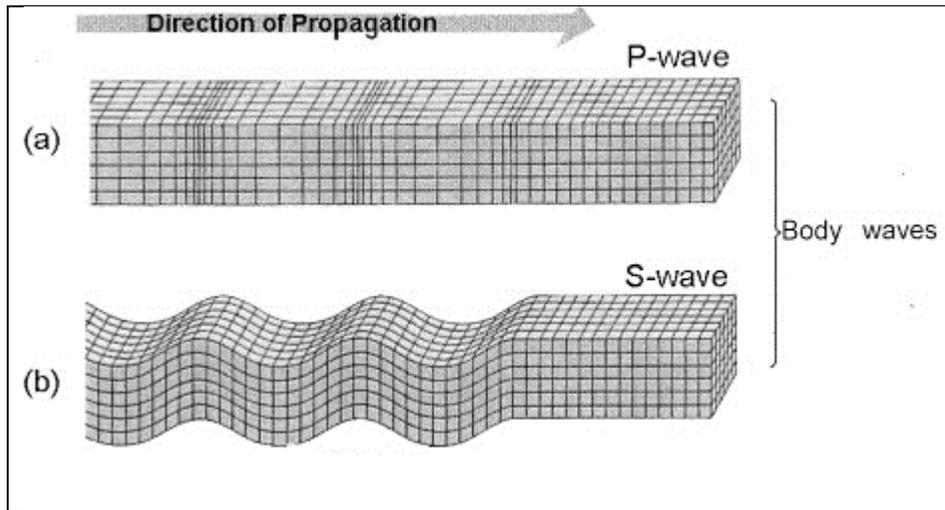


Figure 1.11 Comportement des ondes a) de compression et b) de cisaillement
Adaptée de Ethier (2009, p.18)

Une des propriétés des ondes transversales est la polarisation. Cela signifie que la déformation du milieu peut se produire dans différentes directions. Ainsi un milieu traversé par une onde S Horizontale subira une déformation dans le plan horizontal et s'il est traversé par une onde S Verticale, la déformation se produira selon le plan vertical. Les ondes de compression se déplacent plus rapidement que les ondes de cisaillement au sein d'un même milieu. Les ondes de cisaillement ne se propagent pas dans les milieux liquides.

Enfin les ondes P et S sont soumises à la conversion de mode, c'est-à-dire qu'une onde P peut devenir une onde S et vice versa si certaines conditions, géométriques notamment, sont rassemblées (Ethier, 2009; Kramer, 1996).

On peut exprimer la célérité des ondes P et S en fonction du module d'Young E , de la masse volumique ρ et du coefficient de Poisson ν (Jiang *et al.*, 2011).

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.3)$$

avec G le module de cisaillement

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (1.4)$$

avec M le module contraint

Le bitume étant un milieu viscoélastique, l'utilisation du module complexe est nécessaire. On obtient donc (Mounier *et al.*, 2012):

$$V_s = \frac{1}{\cos \frac{\varphi}{2}} \sqrt{\frac{|E^*|}{2\rho(1+\nu)}} \quad (1.5)$$

$$V_p = \frac{1}{\cos \frac{\varphi}{2}} \sqrt{\frac{|E^*|(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.6)$$

avec φ le déphasage entre le signal de la contrainte appliquée et de la déformation relevée.

Ces équations ne sont valables qu'en milieu viscoélastique linéaire. Il est donc préférable d'utiliser ces équations avec des EB ayant subi une cure.

1.5.3 Résonance

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 ou propre, notée f_r ou f_0 . Dans ce cas, le système va être le siège d'oscillations de plus en plus importantes pouvant amener la rupture du système.

Si on soumet un système résonant à un degré de liberté à une impulsion ou une percussion, le système sera alors le siège d'oscillations amorties sur une fréquence proche de sa fréquence de résonance et retournera progressivement à son état stable.

1.5.4 Ondes de surface

Une onde de surface est une onde qui se propage à l'interface entre deux milieux (air/sol, liquide/liquide de densité différente, etc). On distingue généralement deux types d'ondes surfaciques qui peuvent apparaître : les ondes de Rayleigh et les ondes de Love.

Les ondes de Rayleigh génèrent à la fois un mouvement longitudinal et transversal dans le milieu où elles se propagent (*Voir* figure 1.12 c)). On peut représenter le mouvement induit par le passage de l'onde par un déplacement dans le sens anti horaire des particules si l'onde se déplace de la gauche vers la droite. Plus on s'éloigne de la surface, moins l'amplitude de la déformation est grande.

Les ondes de Love sont le résultat de l'interaction d'une multitude d'ondes S-H (*Voir* figure 1.12 d)). Il en résulte un mouvement des particules du milieu semblable à celui que subiraient les particules d'un milieu traversé par une onde S-H, l'amplitude des déformations s'affaiblissant à mesure que l'on s'éloigne de la surface (Ethier, 2009; Kramer, 1996).

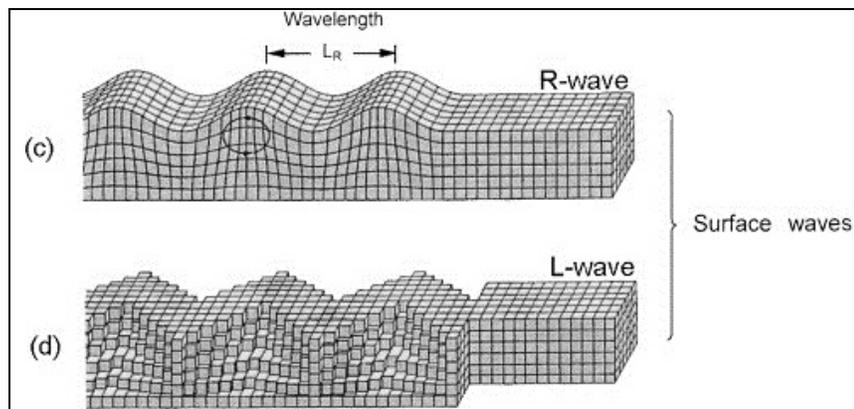


Figure 1.12 Comportement des ondes c) de Rayleigh et d) de Love
Adaptée de Ethier (2009, p. 18)

La méthode SASW (spectral analysis of surface waves) repose sur le principe de dispersion des ondes de Rayleigh dans un système multi couche. Cette méthode permet d'obtenir une courbe de dispersion par l'analyse des ondes de surfaces. En imposant des paramètres fixes

aux couches, on peut par calcul obtenir une courbe théorique. Par itération, on modifie les paramètres des couches jusqu'à obtenir un même résultat pour la théorie et la pratique. Cette méthode ne présente pas de solution unique. De plus cette méthode n'utilise que 2 transducteurs, cela peut conduire à des effets indésirables tels que la présence d'onde de corps qui perturbent l'analyse (Barnes et Trottier, 2010).

Une amélioration, consistant à envoyer plusieurs signaux a vu le jour: la méthode MASW (Multichannel Analysis Surface Waves). Cette méthode repose sur le même principe que la SASW, mais avec plus de signaux donc potentiellement une solution unique (Barnes et Trottier, 2010).

Une autre amélioration de la méthode SASW existe, la méthode Modal Analysis of Surface Waves (MASW). Dans ces méthodes, des ondes de Rayleigh sont utilisées à des fréquences différentes et un spectre énergétique est établi pour chacune de ces fréquences. La présence de plusieurs pics d'énergie montre l'existence de plusieurs groupes d'ondes. La vitesse de phase et de groupe de chaque pic d'énergie sont déterminés pour chaque fréquence, permettant d'établir les courbes de dispersion des différents modes de Rayleigh. Une fois ces courbes obtenues, des rétro-calculs sont effectués pour obtenir la vitesse de propagation de l'onde (Karray *et al.*, 2010).

1.5.5 Dispersion, vitesse de phase et de groupe

La dispersion est un phénomène qui s'observe dans un milieu où des ondes de différentes fréquences se propagent à des vitesses différentes. Ainsi dans un milieu non dispersif, les ondes se propageront à la même vitesse, peu importe leur fréquence.

Il faut donc différencier ici deux types de vitesse. La vitesse de phase correspond au déplacement en fonction du temps de points caractéristiques du signal tel qu'un pic ou un creux. Un groupe d'onde peut également être généré et posséder la même fréquence. Ce

groupe d'onde est considéré comme un ensemble et se déplace selon sa vitesse dite de groupe (Kramer, 1996; Ethier, 2009).

La vitesse de groupe est reliée à la vitesse de phase par l'équation suivante :

$$V_{gr} = V_{ph} + k \frac{dV_{ph}}{dk} \quad (1.7)$$

avec V_{gr} la vitesse de groupe ($m.s^{-1}$), V_{ph} la vitesse de phase ($m.s^{-1}$), k le nombre d'onde

Soit λ (m) la longueur d'onde, le nombre d'onde est définie par : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

1.6 Essais utilisant les ondes dans les enrobés bitumineux

1.6.1 Onde de compression

On cherche ici à évaluer le module complexe d'un enrobé bitumineux. On place sur un échantillon d'EB des éléments piézoélectriques qui ne produisent que des ondes de compressions de part et d'autre. L'un va servir d'émetteur et l'autre de récepteur (*Voir* figure 1.13). Un signal sinusoïdal amplifié est envoyé dans l'émetteur qui va ainsi créer une onde de compression dans l'échantillon. Le récepteur va envoyer un signal électrique dès lors qu'il sera touché par cette onde. On peut ainsi déterminer le temps que l'onde a mis pour se propager d'un bout à l'autre en comparant les 2 signaux. En connaissant la longueur de l'échantillon, on peut déterminer la vitesse de l'onde. Une mesure dans le domaine temporel est réalisée ici car le temps de propagation est déterminé dès que le signal reçu émet une variation (Mounier *et al.*, 2012).

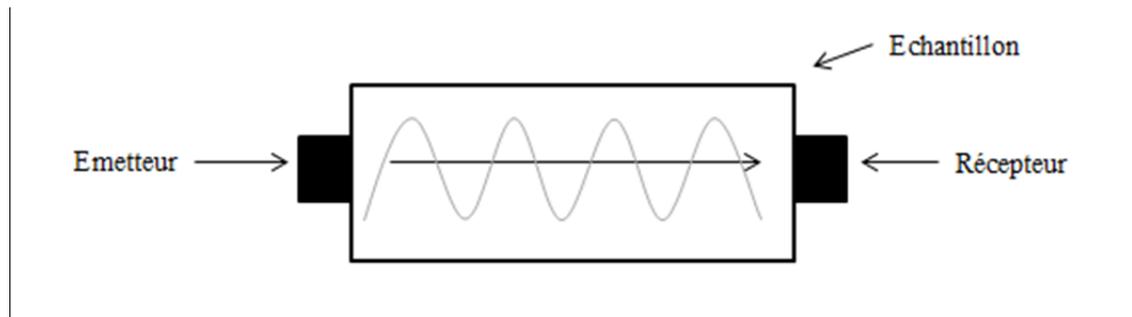


Figure 1.13 Disposition classique d'un test utilisant des ondes de compression ou de cisaillement

En supposant que les déformations restent petites, on peut considérer que le matériau est dans le domaine viscoélastique. Enfin, en faisant l'hypothèse que le matériau est isotrope, on peut utiliser l'équation (1.6). Cette méthode requiert cependant de déterminer au préalable le coefficient de Poisson et le déphasage φ entre la déformation et la contrainte grâce au modèle 2S2P1D (Voir figure 1.14) (Mounier *et al.*, 2012).

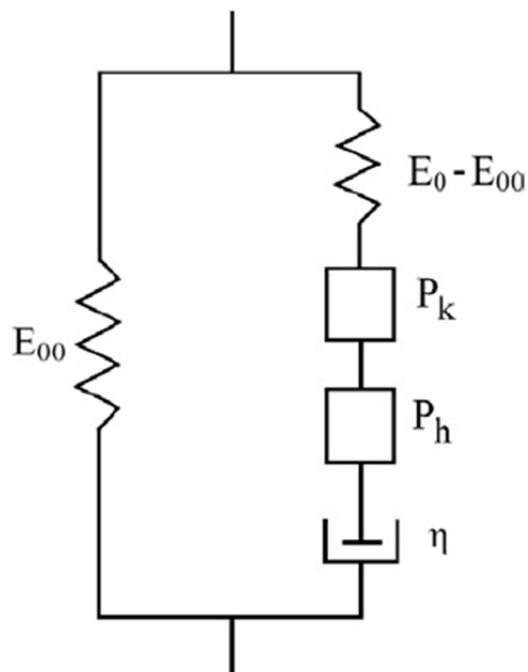


Figure 1.14 Modèle 2S2P1S
Adapté de Mounier *et al.* (2012, p.14)

Ce modèle rhéologique est une amélioration du modèle Huet-Sayegh. Il est composé de deux ressorts, deux éléments de fluage parabolique et d'un amortisseur (*Voir* figure 1.14). Ce modèle est utilisé pour déterminer le comportement linéaire viscoélastique, dans le cas des petites déformations, des EB et des bitumes (Mounier *et al.*, 2012).

Mounier *et al.* (2012) ont observé, pour une même fréquence de l'onde, des différences entre les valeurs de V_p déterminées expérimentalement et celles obtenues à l'aide du modèle 2S2P1D de 5 à 30 %. Cela varie également en fonction de la température de mesure : entre 10% et 17% d'erreur pour les 5 échantillons à -20°C , alors qu'on observe entre 3% et 10% pour 0°C et entre 10% et 30% d'erreur à 40°C .

Jiang *et al.* (2011) ont réalisé des tests sur des échantillons d'EB à chaud obtenus en suivant les protocoles Super Pave. Les protocoles Super Pave sont des procédés qui suivent les recommandations de l'AASHTO (American Association Highway and Transportation Official). Les tests ont été conduits sur des échantillons de hauteur et de compaction différentes. Dans cette étude, ils se sont focalisés sur cinq paramètres des ondes. Deux sont paramètres temporels avec la vitesse de groupe de l'onde de compression et l'amplitude pic à pic de la réponse. Trois sont des paramètres fréquentiels obtenus à partir du spectre fréquentiel avec l'amplitude maximale spectral, la fréquence de résonance et l'aire spectrale, c-à-d l'aire sous la courbe.

Ces cinq paramètres sont comparés au module complexe, au nombre de girations que subissent les échantillons et à la masse volumique des échantillons. Il ressort de cette étude que l'évolution de l'amplitude pic à pic est proportionnelle à la valeur du module complexe. De plus selon cette étude, il n'y a pas une bonne corrélation entre le nombre de girations et la vitesse de l'onde de compression. Ceci permet aux auteurs d'avancer que la vitesse seule n'est pas suffisante afin d'évaluer un échantillon d'enrobé bitumineux (Jiang *et al.*, 2011).

1.6.2 Ondes de cisaillement

On génère cette fois-ci une onde de cisaillement dans l'échantillon considéré. Dans le même ordre d'idées qu'avec les ondes de compression on place de part et d'autre de l'échantillon des transducteurs piézoélectriques, on va déterminer le temps mis par l'onde pour parcourir l'échantillon d'un bout à l'autre de façon temporelle. Le temps de propagation de l'onde S est déterminé par rapport au premier minimum du signal reçu. Afin de générer des ondes S en limitant les perturbations causées par des ondes P, une légère compression axiale sur l'échantillon est à préconiser (Mounier *et al.*, 2012).

Dans cette étude, Mounier *et al.* (2012) ont cherché à déterminer expérimentalement le coefficient de Poisson en utilisant la propagation des ondes S. On peut en effet déterminer le coefficient de Poisson de l'échantillon en réalisant le quotient des formules (1.5) et (1.6)

Les premiers calculs ont montré des erreurs de 13% à 37% par rapport au modèle 2S2P1D car les fréquences des ondes P et S n'étaient pas les mêmes. Des seconds calculs ont été réalisés en déterminant, grâce au modèle 2S2P1D, la vitesse de l'onde P à la fréquence désirée. Les erreurs relatives oscillent entre 1.9% et 13%.

Cette méthode s'avère efficace, si les mêmes fréquences pour les ondes P et S sont utilisées, sinon l'analyse reste dépendante du modèle 2S2P1D.

1.6.3 Méthode de l'impact de résonance

1.6.3.1 Ondes de compression et de cisaillement

La méthode va ici consister à générer une excitation sur une des surfaces de l'échantillon et de récupérer le signal de l'autre côté. L'excitation est générée par le choc entre une bille rigide (en verre par exemple) et l'échantillon (*Voir* figure 1.15). L'impact a lieu sur une des bases du cylindre de telle sorte que la bille tape perpendiculairement la surface. L'impact va générer une onde que l'on récupère avec un transducteur piézoélectrique. Il s'agit ici de

déterminer la fréquence de résonance, f_r , de l'enrobé testé. Pour se faire, on opère une décomposition en séries de Fourier sur le signal obtenu. Grâce à cette fréquence et connaissant la longueur d'onde et ayant calculé au préalable les coefficients correcteurs à l'aide du coefficient d'amortissement et d'un modèle de dispersion de l'onde en relation avec la géométrie de l'échantillon, on peut déterminer le module complexe de l'échantillon (Mounier *et al.*, 2012).

De plus les résultats de cette première étude montrent que les paramètres correctifs amènent autant de différences avec le modèle 2S2P1D qu'ils n'en corrigent (de l'ordre de +/- 5%)

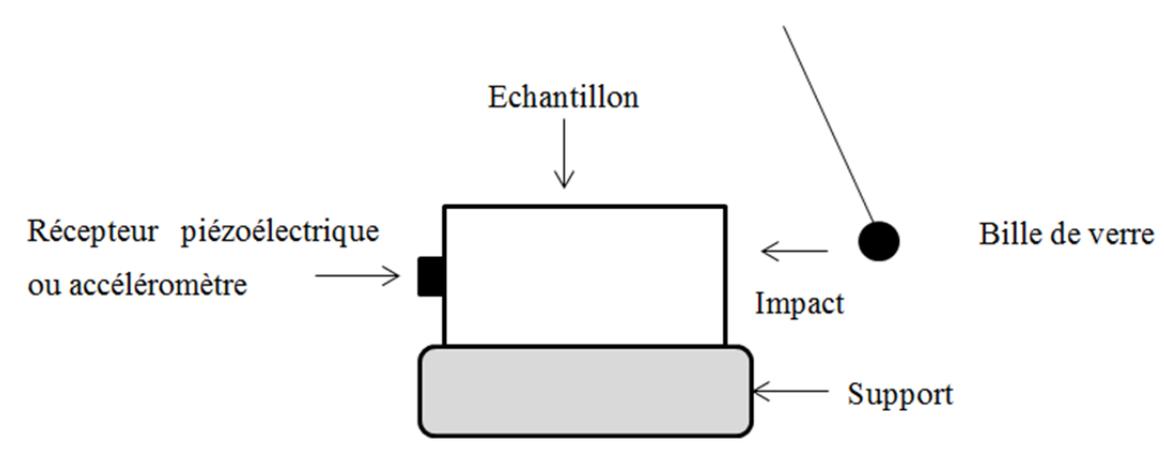


Figure 1.15 Schéma du test de l'impact de résonance

Comparativement au modèle 2S2P1D, cette méthode donne des résultats avec jusqu'à 20% d'erreur à des températures de -19°C et 40°C , alors que pour des températures de 0°C et 20°C la marge d'erreur ne dépasse pas les 10% (Mounier *et al.*, 2012).

Whimoyer et Kim (1994) ont utilisé un accéléromètre afin de récupérer les déformations générées par l'onde. De plus ils ont suivi la norme ASTM C 215, régissant la technique de l'impact de résonance dans les bétons hydrauliques.

Ils ont évalué l'impact du support sur les caractéristiques de l'EB. Le type de support (dans cette étude, une éponge, du caoutchouc ou bien une barre en aluminium) n'impacte pas la

fréquence de résonance de l'échantillon mais influence légèrement le coefficient d'amortissement relevé. Un support plus rigide amène un coefficient d'amortissement plus faible. Cela doit être dû par le fait que le système Support et Échantillon amortit une partie de l'onde.

Whimoyer et Kim (1994) ont également réalisé des essais d'impact mais avec des ondes S. Pour ce faire, la bille accrochée au fil tape l'échantillon non plus dans l'axe de celui-ci mais perpendiculairement à cet axe. L'accéléromètre est placé sur la surface cylindrique de l'échantillon. Une étude semblable à celle réalisée pour les ondes de compression est ensuite réalisée.

Les résultats sont cohérents quant au comportement connu des EB, une diminution de la valeur de E^* et G^* lorsque la température augmente, accompagnée d'une augmentation de l'amortissement de l'EB.

1.6.3.2 Approche énergétique

Lors de l'impact, plusieurs types d'ondes sont générés et on peut assimiler le tout à un champ d'onde. En une durée proche de l'impact, les ondes prépondérantes sont des ondes de Rayleigh et des ondes P. En un temps plus éloigné ces ondes de Rayleigh vont se dissiper et les ondes P vont, grâce à la conversion de mode, se transformer en ondes S qui seront par la suite majoritaires. L'impact donne à l'échantillon une quantité finie d'énergie qui va être en partie stockée et dissipée dans le milieu par les ondes, de façon rapide par les ondes P en « jeune temps » puis plus modérément par les ondes S en « temps lointain ». On en déduit donc des valeurs d'énergie stockée et dissipée pour les ondes P et les ondes S. Il est ensuite possible de lier ces énergies aux module complexe de cisaillement G^* et de compression E^* . Les dissipations et stockages d'énergies étant liées à l'agencement de l'EB testé, on peut utiliser cette méthode pour optimiser la composition de l'EB (Dos Reis *et al.*, 1999).

1.6.4 Méthodes issues de l'étude des sols.

De nombreux tests généralement utilisés en étude des sols ont été empruntés afin de caractériser les enrobés bitumineux. Les méthodes SASW et MASW, applicable in situ, ont été discutés dans la partie 1.5.4. Les prochains paragraphes abordent plutôt des méthodes de laboratoire.

Colonne de résonance

La colonne de résonance est un test de laboratoire utilisé pour déterminer le module de cisaillement élastique ainsi que la propriété d'amortissement des sols. Un échantillon cylindrique est fixé par ses 2 extrémités. Celle du haut est excitée en torsion ou en vibration longitudinale, celle du bas mesure la réponse du sol. La fréquence de vibration provenant du haut est graduellement augmentée afin de faire rentrer l'échantillon en résonance. En connaissant la géométrie de l'échantillon, on peut déterminer la vitesse de propagation des ondes de cisaillement. On peut ensuite déterminer le module de cisaillement. L'essai suit les recommandations de la norme ASTM D4015 (Ethier, 2009; Murat *et al.*, 2015). De plus il est à noter que l'essai demande un appareillage complexe et de l'expérience afin d'analyser les résultats (Ethier, 2009).

Des tests sur des EB ont été réalisés par Pezhouhan *et al.* (2014) sur une colonne de résonance améliorée afin de mieux correspondre au comportement des EB. Parmi les 4 échantillons, un seul était un enrobé bitumineux à chaud et les trois autres étaient des enrobés bitumineux tièdes, dont un à la mousse de bitume et les deux autres à base d'additifs. Les quatre échantillons ont subi une cure d'une journée à la température de la pièce.

Les résultats de l'étude mènent à penser que la colonne de résonance est adaptée pour déterminer le module de cisaillement des EB. Cependant ces tests sont coûteux et difficiles à mettre en place, surtout dans le cas des MR en jeune âge quand la cohésion de l'échantillon est très faible. La colonne de résonance donne des valeurs de module de cisaillement.

1.7 L'utilisation d'éléments piézoélectriques

1.7.1 Définition et description

Un matériau piézoélectrique possède la capacité de se polariser électriquement lorsqu'il subit une contrainte mécanique. A l'inverse, si ce matériau est placé dans un champ électrique, il subira une contrainte, qui mène à une déformation.

Une onde mécanique étant la propagation d'une déformation dans un milieu, lorsque l'élément piézoélectrique recevra une impulsion électrique et s'il est en contact avec un matériau, il y aura propagation d'une onde au sein de ce matériau. Si on place un autre élément piézoélectrique en contact avec ce matériau, il recevra l'onde mécanique, ce qui induira une déformation et donc générera une tension électrique.

Les éléments piézoélectriques peuvent donc être utilisés par paires afin de déterminer la vitesse de propagation des ondes au sein d'un matériau.

1.7.2 Transducteurs piézoélectriques d'ondes de cisaillement

Les cellules de mesures piézoélectriques sont de plus en plus utilisées dans l'étude des sols. Contrairement aux autres types de transducteurs utilisés dans ce domaine, les éléments piézoélectriques évitent d'avoir à inciser les échantillons testés afin d'y insérer ces transducteurs. Cela réduit donc le caractère intrusif de la mesure (Ethier, 2009).

En fonction de la géométrie de l'élément piézoélectrique utilisé (plaques, cylindres, anneaux ...) et de la façon dont celui-ci sera utilisé, on générera un certain type d'onde. Comme expliqué dans la partie 2.1, ces ondes n'ont pas la même célérité, on pourrait donc légitimement avancer, qu'il faille viser une fenêtre de mesure précise afin de capter la bonne onde. Dans le cas de l'utilisation d'ondes S, ce n'est pas complètement possible car, même si les ondes P se déplacent plus vite et donc on pourrait réussir à isoler les ondes S, il y a encore le problème de la conversion de mode des ondes (*Voir 1.5.2*).

Ainsi, si on ne contrôle pas les ondes créées, on peut se retrouver avec tous les types d'ondes qui sont générées, ce qui rend plus difficile voire impossible l'interprétation des résultats obtenus.

La génération de multiples ondes est liée notamment au coefficient de Poisson de l'élément piézoélectrique, donc pour chaque compression/extension dans une direction, le matériau subira une déformation dans un autre sens.

Par exemple, si on comprime radialement un cylindre plein, il y aura une élévation de sa hauteur. Dans cette situation, si on avait juste souhaité créer une onde de cisaillement, générée par la compression radiale, on se retrouve également avec une onde de compression, générée par le contact entre l'élévation du cylindre et de l'échantillon. La figure 1.16 illustre le principe de Poisson dans le cas d'un anneau piézoélectrique.

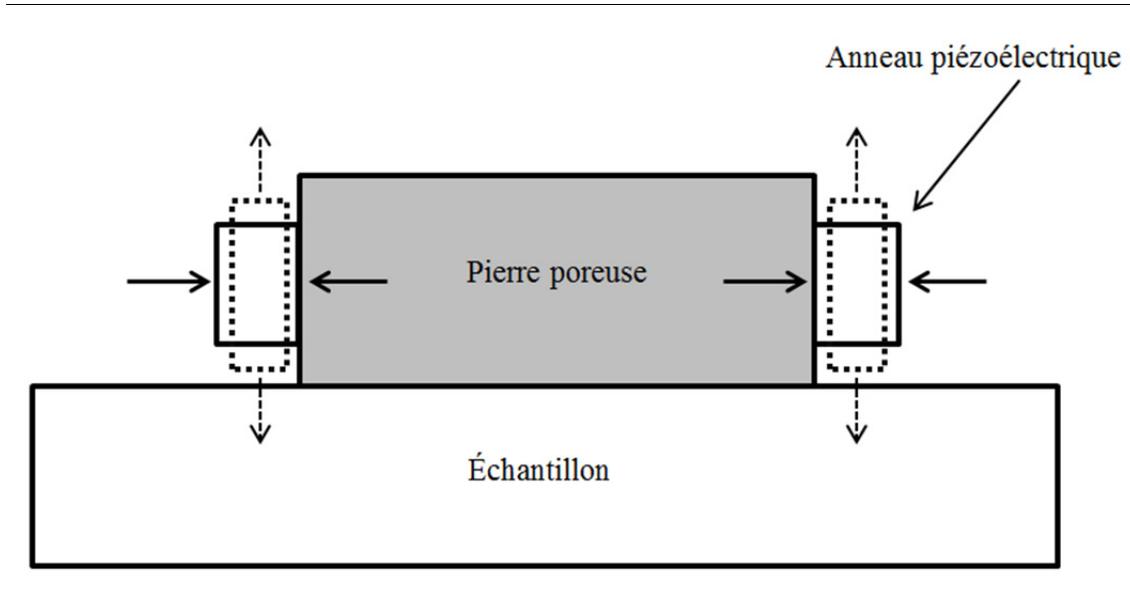


Figure 1.16 Illustration du principe de Poisson dans le cas d'un anneau piézoélectrique

Ainsi, afin de générer une onde purement de cisaillement, il faut pouvoir empêcher le contact direct entre l'élément piézoélectrique et l'échantillon. L'utilisation d'anneaux

piézoélectriques apparaît bien adaptée dans ce cas. En effet, il est facilement possible d'insérer un élément qui fera le lien entre l'élément piézoélectrique et l'échantillon, transmettant l'onde de cisaillement uniquement.

L'insertion d'un cylindre dans l'anneau permet de réaliser cela (Ethier, 2009; Karray *et al.*, 2015). L'insertion d'un cylindre permet également d'augmenter la distance entre les 2 éléments piézoélectriques, ce qui réduit d'avantage l'influence des autres ondes.

1.7.3 Type de mesures avec des éléments piézoélectriques

Lorsque des ondes sont utilisées, on peut choisir de les analyser dans deux domaines différents : le domaine temporel et le domaine fréquentiel.

Dans le domaine temporel, on cherche généralement à mesurer le temps de propagation de l'onde, comme dans les parties 1.6.1 et 1.6.2. La méthode la plus classique, consiste à déterminer le temps de première arrivée, qui correspond au temps nécessaire à l'apparition de la première variation du signal reçu.

D'autres approches se veulent plus précises telles que la mesure pic à pic ou encore l'utilisation de points caractéristiques des ondes. La difficulté majeure rencontrée ici, est l'absence d'exactitude quant à la détermination de ces instants. En effet, il est difficile de pouvoir affirmer à quel pic de la réponse correspond tel ou tel pic du signal émis. Cela est principalement dû aux effets de champ proche à basse fréquence et à l'apparition de bruit dans le signal pour de hautes fréquences. (Karray *et al.*, 2015). Les méthodes temporelles permettent néanmoins de donner une bonne estimation de la vitesse de propagation de l'onde (Ethier, 2009).

Les méthodes fréquentielles font appels à des décompositions de l'onde en harmoniques. De ces harmoniques on peut déduire des données telles que l'amplitude, la fréquence de résonance, la phase du signal et donc le décalage de phase entre 2 signaux. Ce décalage de

phase peut servir à déterminer le temps de propagation d'une onde, comme par exemple dans la méthode de corrélation croisée (cross correlation en anglais). Cette technique permet de déterminer la vitesse de propagation des ondes de cisaillements en comparant 2 signaux émis à la même fréquence.

La vitesse peut être obtenue grâce à la formule suivante (Ethier, 2009; Karray, 2015)

$$V_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{\phi(f)} \quad (1.8)$$

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

1.7.4 Méthode piezoelectric ring actuator (P-RAT)

Théoriquement un matériau peut être considéré comme un système dynamique. On peut donc, par la suite, associer une fonction de transfert à ce système. Une fonction de transfert est une façon mathématique d'exprimer la réponse d'un système $Y(j\omega)$ en fonction d'une excitation d'entrée $X(j\omega)$, avec j l'unité imaginaire et ω la pulsation (rad.s^{-1}). On note généralement la fonction de transfert sous la forme : $H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$

Une fonction de transfert peut être décrite par deux paramètres : son amplitude $A(\omega)$ et sa phase $\phi(\omega)$

On cherche ici à analyser la fonction de transfert de l'échantillon testé. Cependant, afin d'émettre et de recevoir le signal le traversant, il faut utiliser des transducteurs tels que ceux décrits dans la partie 1.7.2. 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 que l'échantillon voit. Ce que le transducteur émetteur transmet dans l'échantillon et ce qui est reçu par le récepteur après avoir traversé l'échantillon.

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

Dans notre cas, l'ensemble {Pierre poreuse, Anneau piézoélectrique, époxy} est considéré comme un système masse ressort amorti. Ce système possédant un simple degré de liberté, l'expression de la phase du système est la suivante :

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{2 \cdot \zeta \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad (1.9)$$

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

En se basant 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.

Il faut cependant faire la différence ici entre la vitesse de phase de l'onde et la vitesse intrinsèque de l'onde de cisaillement traversant l'échantillon. Rappelons qu'en effet la vitesse de phase V_{ph} , varie en fonction de la fréquence de l'onde.

Pour un ensemble émetteur/récepteur parfait, il ne devrait pas avoir déphasage et donc la vitesse de phase ne devrait pas varier avec la fréquence. Dans ce cas on aurait $V_s = V_{ph}(f)$.

Cependant, les transducteurs induisent leur propre décalage de phase. Toutefois, si le décalage peut être mesuré, une correction peut être apportée et la vitesse de phase corrigée.

Comme indiqué précédemment, une analyse par la méthode de corrélation croisée donnerait une valeur de la vitesse qui correspondrait à la vitesse de phase, or du fait du décalage $V_{ph}(f) \neq V_s$.

On a:

$$V_{ph} = \frac{2. \pi. f. d}{\phi_{exp}(f)} = \frac{2. \pi. f. d}{\phi_{th}(f) + \phi_{corr}(f)} \quad (1.10)$$

Et :

$$V_s = \frac{2. \pi. f. d}{\phi_{th}(f)} \quad (1.11)$$

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

En combinant les équations 1.10 et 1.11 on obtient :

$$\frac{2. \pi. d}{V_s} + \frac{\phi_{corr}(f)}{f} = \frac{\phi_{exp}(f)}{f} \quad (1.12)$$

Ainsi pour toutes les fréquences f_0 , f_1 , etc, on peut obtenir une équation. On remarque également qu'en soustrayant deux de ces équations, on en obtient une nouvelle qui relie $\phi_{corr}(f)$ et $\phi_{exp}(f)$ en fonction de la fréquence.

Ainsi par récurrence on obtient :

$$\phi_{corr}(f_{n+1}) = \phi_{exp}(f_{n+1}) - \frac{f_{n+1}}{f_n} (\phi_{exp}(f_n) - \phi_{corr}(f_n)) \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (1.13)$$

Cette équation ne nécessite que de connaître le décalage de phase lié aux transducteurs à une première fréquence qu'on notera f_0 , à ne pas confondre avec la fréquence propre du signal.

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.

CHAPITRE 2

Programme expérimental

2.1 Généralités

Les matériaux bitumineux retraités à froid grâce à des émulsions de bitume possèdent un comportement très évolutif. En effet en très jeune âge, ces matériaux peuvent être considérés comme étant granulaire. Cependant avec le vieillissement, leur comportement devient celui d'un matériau lié. Comme présenté dans le chapitre précédent, très peu de tests sont réalisés lorsque ces matériaux sont en très jeune âge. Il est cependant important de pouvoir comprendre le comportement de ces matériaux à cette période de leur vie. En particulier, cette connaissance peut aider à optimiser les temps d'ouverture de la chaussée, et peut permettre, en tant que moyen de contrôle, à vérifier rapidement si le cahier des charges de la chaussée est respectée.

L'utilisation d'éléments piézoélectriques a fait ses preuves dans le domaine de l'étude des sols. De plus des tests utilisant les ondes ont été réalisés sur les enrobés bitumineux. Cependant, ceux-ci mettaient en jeu des EB en général à chaud, et ayant subis des cures. On ne peut évidemment pas accepter les résultats obtenus comme étant les mêmes pour les MR à jeune âge.

Ainsi il convient de trouver une méthode d'analyse adaptée à ces matériaux en jeune âge. De par son côté non destructif, l'utilisation d'ondes est avantageuse. De plus la forte présence d'eau dans ces matériaux en très jeune âge nous dirige vers l'utilisation d'ondes de cisaillement. En effet les ondes de compression peuvent se propager dans l'eau et donc il se pourrait que, en jeune âge là où la cohésion est faible, que l'onde ne se propage que dans l'eau et donc ne caractérise pas le matériau. L'eau n'ayant pas de résistance au cisaillement, l'utilisation d'ondes de cisaillement permettrait d'obtenir une caractérisation du matériau et non de l'eau. La méthode P-RAT présentée à la partie 1.7.4 est toute indiquée.

L'étude se propose de chercher, à l'aide de cette méthode, à caractériser les matériaux bitumineux retraités à froid. Le but est ici d'évaluer l'évolution de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement en fonction du temps et de la teneur en eau des échantillons.

Dans un premier temps, il convient de tester la méthode P-RAT sur les matériaux étudiés, afin de déterminer si la méthode peut être utilisée, si elle est exploitable et quelles améliorations peut-on apporter. Finalement les tests visant à caractériser réellement le matériau seront effectués.

2.2 Caractéristiques des échantillons testés

2.2.1 Caractéristiques des EB

Les enrobés bitumineux testés sont des MR-7 traités à l'émulsion de bitume. Ils correspondent à un type 1. Les GBR utilisés proviennent de GBR Isidore 2014. L'émulsion de bitume est de type CSS (Cationic slow setting) à 67% de bitume. Une émulsion CRS (Cationic rapid setting) a été utilisée pour le premier échantillon testé.

Une composition semblable de tous les échantillons a été recherchée. Aussi bien au niveau des composants que de la teneur en vide. Ainsi tous les échantillons suivent les teneurs suivantes: 1,5% de bitume d'ajout, 6% d'eau, 1% de ciment.

Le GBR utilisé n'a en aucun cas été séché avant la préparation des éprouvettes. Tous les composants, ont été pris à température de la pièce.

2.2.2 Réalisation des éprouvettes

Différents types d'échantillons ont été réalisés quant à leur géométrie. Dans la première partie des tests, des échantillons cylindriques de différentes hauteurs ont été réalisés. Dans la seconde partie des plaques ont été réalisées. Les plaques permettent de négliger les effets de

bords et de disposer les trois types de transducteurs sur un même échantillon (*Voir* partie 2.3.1).

Échantillons cylindriques :

Trois échantillons de ce type ont été réalisés. Le tableau 2.1 présente la composition de ces échantillons.

Tableau 2.1 Compositions des échantillons cylindriques

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
GBR (g)	1000	1428	2011
Ciment (g)	10	14.3	20.11
Eau d'ajout (g)	60.6	86.5	121.9
Émulsion (g)	23.3	33.28	46.9
Hauteur (mm)	63	73	107
Moyen d'obtention	Marshall	Marshall	PCG
Date	2014/11/05	2014/11/24	2014/11/26

Les deux premiers échantillons ont été réalisés à la presse Marshall, suivant la norme LC-200. Le 2^{ème} étant cependant trop grand, la compaction a été réalisée à la main pour les 20 premiers coups car le moule n'entrait pas dans la machine. Les 30 derniers coups ont été réalisés dans la presse Marshall. La figure 2.1 montre le premier échantillon instrumenté.



Figure 2.1 Échantillon de 63 mm obtenu à la presse Marshall
Test réalisé le jour de la compaction

Afin de ne pas briser les échantillons, les moules ont été préservés le 1^{er} jour. Ils ont été retirés par la suite.

Le 3^{ème} échantillon a été réalisé à la presse à cisaillement giratoire (PCG) et a subi 36 girations (*Voir* figure 2.2). Les vides visés étaient de l'ordre de 10-12 %. Il a été démoulé directement après la compaction, cependant il a été choisi d'attendre 3 heures avant de retirer le capuchon inférieur et de commencer les mesures. En effet la taille de l'échantillon laissait présager à une rupture de celui-ci, les tests nécessitant de disposer les cylindres sur la tranche.

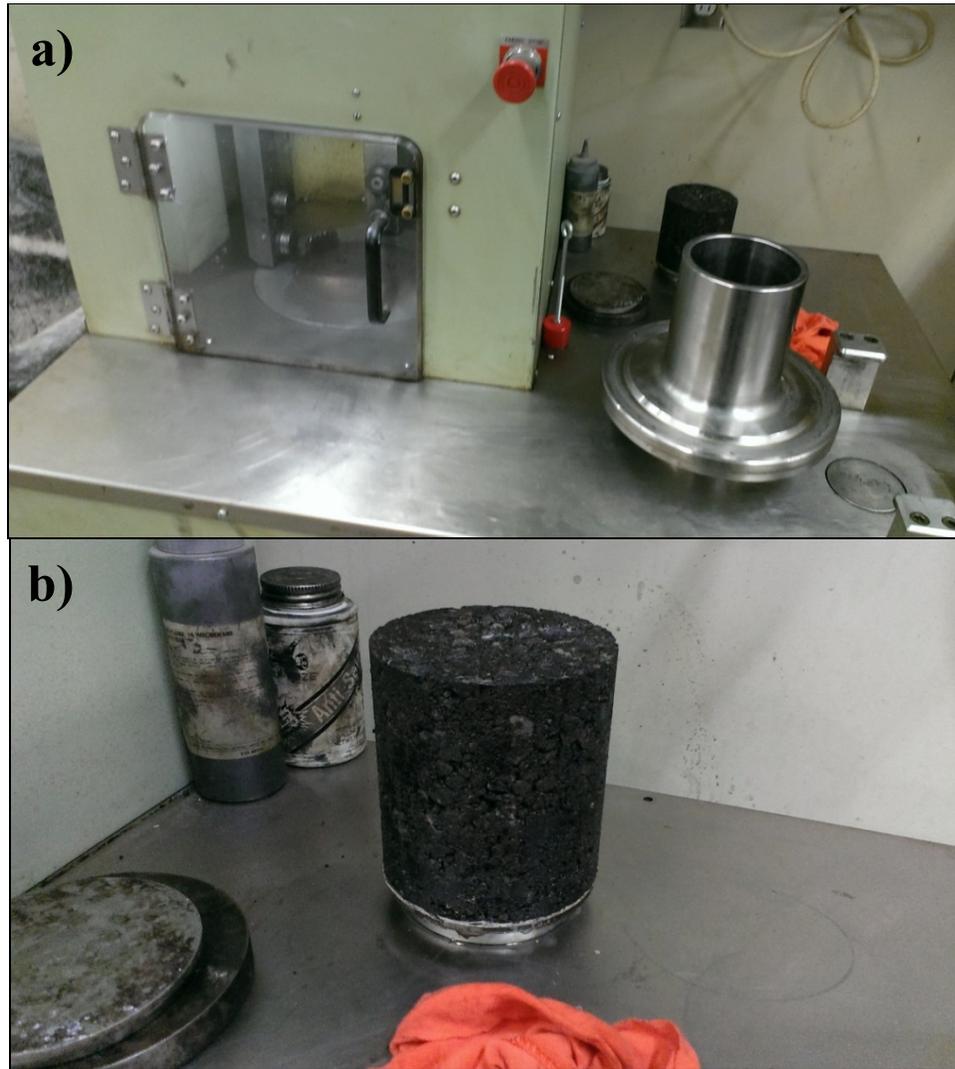


Figure 2.2 a) Presse à cisaillement giratoire et moule
b) Échantillon de 107mm obtenu à la PCG

Plaques d'enrobés bitumineux :

Le second type d'échantillons utilisés dans les tests a pris la forme de plaques d'enrobés bitumineux. Initialement les dimensions des plaques sont : 500 mm de longueur, 180 mm de large et 50 mm de hauteur. Cependant, la hauteur varie de quelques mm.



Figure 2.3 Compacteuse de plaque LPC

La compacteuse fonctionne de telle façon qu'afin d'obtenir la hauteur de plaque souhaitée, il faut mettre des planches (bois ou plastique) servant de cales dans le fond de la machine. En effet c'est la partie inférieure qui s'élève tandis que la roue compresse. Dans le présent cas, l'utilisation d'une plaque était indispensable.

De plus, les échantillons étant testés en très jeune âge, il est difficile de les déplacer sans briser les plaques. Ainsi la planche en plastique disposée dans le fond du moule permet de déplacer la plaque d'enrobé bitumineux lorsqu'on retire le moule en métal. Cette planche ne pouvant être enlevée tout de suite après la compaction, il a été décidé qu'elle ferait partie intégrante du montage expérimental.

Au cours de l'étude, deux plaques ont été réalisées. Afin de conserver les mêmes propriétés que les échantillons réalisés pour les précédentes expériences, les quantités visées sont les suivantes :

GBR : 8920 g ; ciment : 89,20g; bitume : 135,13 g, soit 201,7 g d'émulsion ; eau d'ajout : 474 g, ce qui donne 540,5g d'eau au total.

Vu la quantité de matière requise, 2 mélanges ont été réalisés séparément pour chaque plaque puis mélangés à la fin. Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent la composition réelle de ces plaques.

Tableau 2.2 Composition de la plaque 1 réalisée le 2015/02/23

Plaque 1	Mélange 1	Mélange 2	Total
GBR (g)	4460	4460	8920
Ciment (g)	44,8	44,4	89,20
Eau d'ajout (g)	237,2	237,0	474,2
Émulsion (g)	102,7	99,9	202,6
Mélangé à	11 : 01	11 : 49	
Début de compaction			13 : 35

Dans le cas de la première plaque, les 2 mélanges n'ont pas été réalisés en même temps car la plaque support (voir partie 2.3.3), rentrait difficilement dans la presse. Ainsi quelques opérations d'usinage ont dû être réalisées. Les bols contenant les mélanges ont été couverts avec une pellicule de plastique pour limiter la perte d'eau. La presse a été préparée et les deux mélanges ont été placés dans le moule 2,5 heures après la préparation du premier mélange. Pour la seconde plaque, la mise en place dans le moule a pu se faire plus rapidement (*Voir* tableau 2.3).

Les échantillons ont subi 30 passages de roue comme décrit dans le protocole (*Voir* figure 2.4)

Hauteur plaque 50 mm. DÉBUT=90mm
Hauteur plaque 100 mm. DÉBUT=160mm
Compactage Fort (Plaques de 500 X 180X ---mm,)

	Nombre de passes						Pression pneus (Bars)	Force vérin (Kn)	Départ	Position de la roue	Vérin	Hauteur plaque 50 mm	Hauteur plaque 100 mm
	Position Roue												
	Avant 1er	Arrière 2e	Centre 3e										
Cumulé	Cumulé	Cumulé	Cumulé										
1	1					6	1,5	droite	1	bloqué	65	130	
2		1									67	127	
3			1										
4	1											125	
5		1									62	123	
6				1									
7	2	4	2	4	1	3	6	5		3	libre	60	120
8	2	6	2	6	1	4						59	118
9.	4	10	4	10	2	6						56	113
10.	8	18	8	18	4	10						53	107
11	8	26	8	26	4	14						51	103
12	4	30	4	30	2	16						50	100

Figure 2.4 Protocole de compaction de la compacteuse LPC

Tableau 2.3 Composition de la plaque 2 réalisée le 2015/04/13

Plaque 2	Mélange 1	Mélange 2	Total
GBR (g)	4460	4460	8920
Ciment (g)	44,6	44,6	89,20
Eau d'ajout (g)	271,3	201,2	472,5
Émulsion (g)	101,2	100,8	202
Mélangé à	13 : 40	13 : 40	
Début de compaction			13 : 45

Le résultat obtenu après compaction et extraction de la presse est montré en figure 2.5.



Figure 2.5 Plaque d'EB après compaction et sortie du moule

2.3 Montage expérimental et composants

2.3.1 Réalisation des transducteurs

Inspirées des travaux de Ethier (2009) les cellules de transducteur sont constituées d'anneaux piézoélectriques fixés à l'aide de résine d'époxy à des cylindres, dans un premier temps en aluminium percés d'une croix en leur milieu, puis dans un deuxième temps en acier inoxydable (316L) frittés d'une porosité de 20 μm également percés d'une croix en leur milieu.

Par la suite on appellera « transducteur » l'ensemble pierre poreuse/cylindre lié à l'anneau piézoélectrique avec de l'époxy. La figure 2.6 présente le couple de transducteur 51-45 mm. Ces deux nombres correspondent respectivement au diamètre extérieur et intérieur de l'anneau piézoélectrique utilisé.

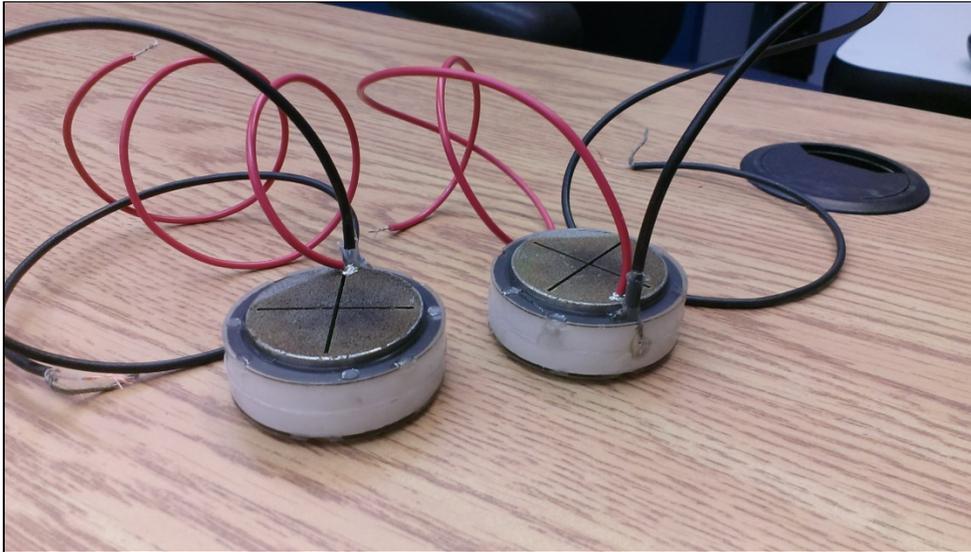


Figure 2.6 Jeu de transducteurs 51-45 mm

La croix permet d'obtenir une meilleure déformabilité du cylindre, et donc une meilleure propagation de l'onde de cisaillement. Pour les transducteurs 22-16 mm, la croix fait 0.75 mm de large, 1 mm de large pour les transducteurs 38-34 mm et 51-45 mm.

Le matériau fritté a été jugé souhaitable en raison de la teneur en eau importante des échantillons. En effet, les tests réalisés par Ethier (2009) sur des argiles utilisaient déjà ce genre d'éléments frittés afin d'empêcher des surpressions locales dues à l'eau. Rappelons que la cohésion des MR traités à l'émulsion est liée au départ de l'eau et que cette quantité d'eau est importante dans le cas des MR. La microporosité des éléments frittés permet le passage de l'eau et devait permettre de créer un bon couplage entre la pierre poreuse et l'échantillon.

Les cylindres et pierres poreuses ont été dimensionnés afin de permettre un enrobage de 1mm d'époxy autour des anneaux piézoélectriques afin de les rendre étanche.

La transmission du signal électrique à l'élément piézoélectrique est réalisée par un câble coaxial. Celui-ci est soudé directement sur l'anneau piézoélectrique. L'étanchéité de la soudure est réalisée par l'époxy enrobant l'anneau.

La pierre poreuse est quant à elle reliée au potentiel neutre par un simple fil conducteur. Cela a pour but d'empêcher la présence de répliques dans le signal. Ceci est expliqué plus en détails dans la partie 3.1.

Finally, afin de réaliser l'assemblage des capteurs, des moules en silicone ont été réalisés. Ceux-ci permettent un bon placement des différents éléments les uns par rapport aux autres.

2.3.2 Motivation et choix des dimensions des transducteurs

Trois formats d'anneaux piézoélectriques sont utilisés lors des tests (*Voir* tableau 2.4)

Tableau 2.4 Dimensions des transducteurs utilisés

Anneaux	22-16	38-34	51-45
D extérieur/D intérieur (mm)	22/16	38/34	51/45
Hauteur (mm)	3,5	3,5	14
Pierre poreuse			
Diamètre* (mm)	13,97	32,00	41,91
Hauteur* (mm)	11,94	11,94	21,08

* Les pierres poreuses ont été choisies suivant un choix de produit générique d'un fabricant, ce qui explique que les valeurs possèdent des décimales.

On parlera donc respectivement de transducteurs 22-16 mm, 38-34 mm et 51-45 mm.

Les tests de Ethier (2009) n'utilisaient que des transducteurs de petite taille, tels que les transducteurs 22-16 mm. Cependant, il n'est pas rare de trouver dans les GBR des granulats dont le diamètre est de l'ordre de 20 mm. Ainsi, si la pierre poreuse qui effectue le contact avec l'échantillon ne fait, dans le cas des transducteurs 22-16 mm, que 14 mm de diamètre, on ne peut pas affirmer que le contact sera optimal. L'onde étant potentiellement mal transmise, on ne peut être sûr que l'analyse qui en résultera sera, dans premier temps

réalisable et dans un second temps exploitable. C'est pour cela que deux autres tailles de transducteurs ont été fabriqués.

L'augmentation de la taille des anneaux piézoélectriques et donc de la taille des transducteurs, pose cependant des problèmes vis-à-vis de la fréquence de résonance de ceux-ci. En effet la fréquence de résonance est fortement liée à la géométrie des éléments. Ainsi, plus un élément sera volumineux, plus sa fréquence de résonance sera faible. Le transducteur 51-45 mm est donc plus sujet à résonner pour des basses fréquences.

2.3.3 Plaque support, porte transducteur et bouchons

Lors de l'utilisation de la compacteuse de plaque LPC, des calles sont situées sous l'enrobé afin d'obtenir la hauteur d'échantillon voulue. Une plaque spéciale a donc été fabriquée. En effet les enrobés étant testés dès la fin de la compaction, il est impossible de déplacer l'échantillon vers un quelconque autre emplacement sans l'utilisation d'une plaque support.

La plaque préparée possède 3 orifices dans lesquels des supports aux transducteurs sont insérés (*Voir* figure 2.7). Ces orifices peuvent aussi être bouchés par les bouchons.

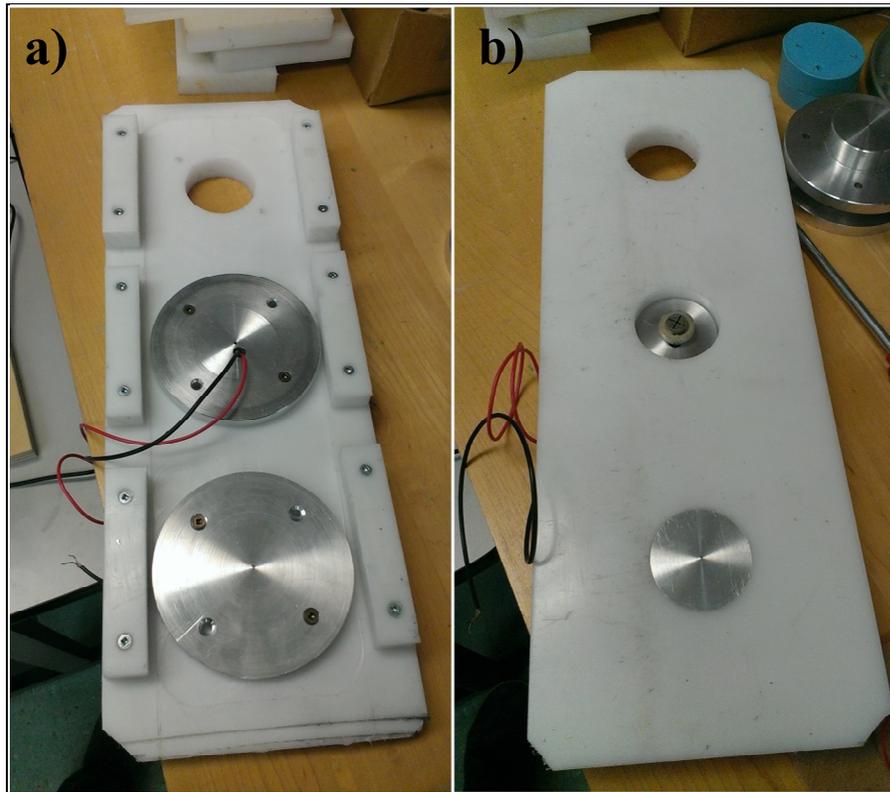


Figure 2.7 Plaque support avec porte transducteur 22-16 au milieu, bouchon en avant.
a) dessous ; b) dessus

Afin de mener à bien les mesures, l'utilisation de deux transducteurs est nécessaire : un en tant qu'émetteur et l'autre en tant que récepteur de l'onde. Un des deux transducteurs sera intégré à une pièce appelée « Porte Transducteur ». Cette pièce sert à rendre les mesures plus efficaces en permettant un bon positionnement du transducteur et la possibilité de changer rapidement de taille de transducteur. De plus, cela permet de ne pas exposer les transducteurs lors de la compression de la plaque grâce à l'interchangeabilité des bouchons et des porte-transducteurs (*Voir figure 2.8*).

Le transducteur récepteur sera quant à lui inséré dans un gabarit posé sur l'échantillon afin de le placer dans l'axe du transducteur émetteur. Un bon alignement est en effet important pour la bonne conduite des mesures.

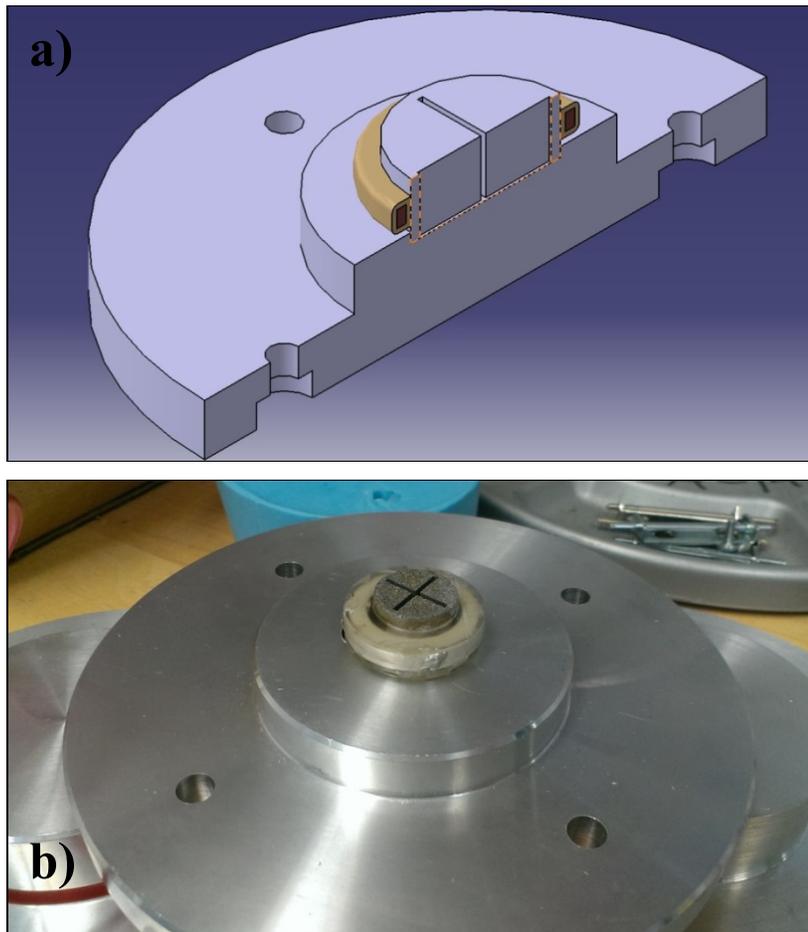


Figure 2.8 Porte transducteurs; a) vue en coupe du porte transducteur 38-34 mm;
b) porte transducteur 22-16 mm

Afin de ne pas déformer la plaque lors de la compaction, des entretoises ont été réalisées pour les porte transducteurs 38-34 mm et 22-16 mm.

2.3.4 Génération et acquisition des signaux

Les signaux sont générés 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.

La figure 2.9 schématise l'ensemble des éléments servant à l'acquisition des mesures. Les canaux CH1 et CH2 de l'oscilloscope correspondent respectivement au signal émis et au signal reçu par le transducteur récepteur.

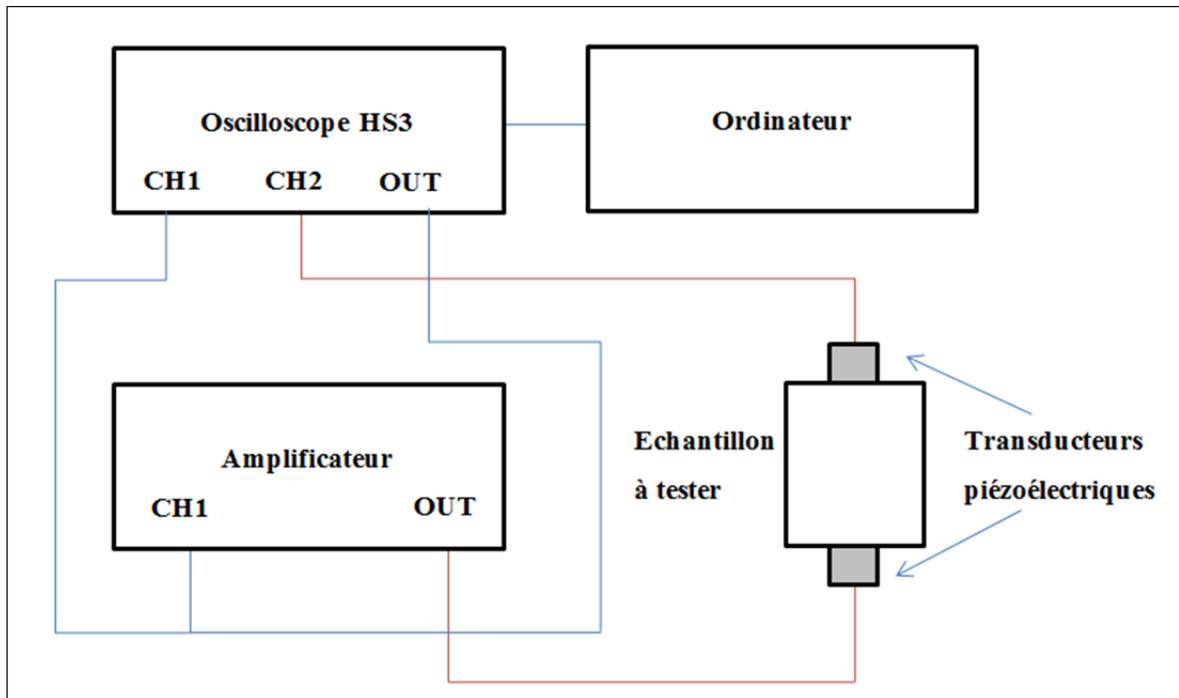


Figure 2.9 Schéma du dispositif d'acquisition

La génération des signaux est contrôlée via le programme Tie Pie Multi Channel. Ce programme permet également l'acquisition des signaux temporels de l'émission et de la réception. Lors de la génération, il est possible de choisir le type de signal (*Voir* figure 2.10), la fréquence de l'émission, l'amplitude et un gain apporté au signal si nécessaire.

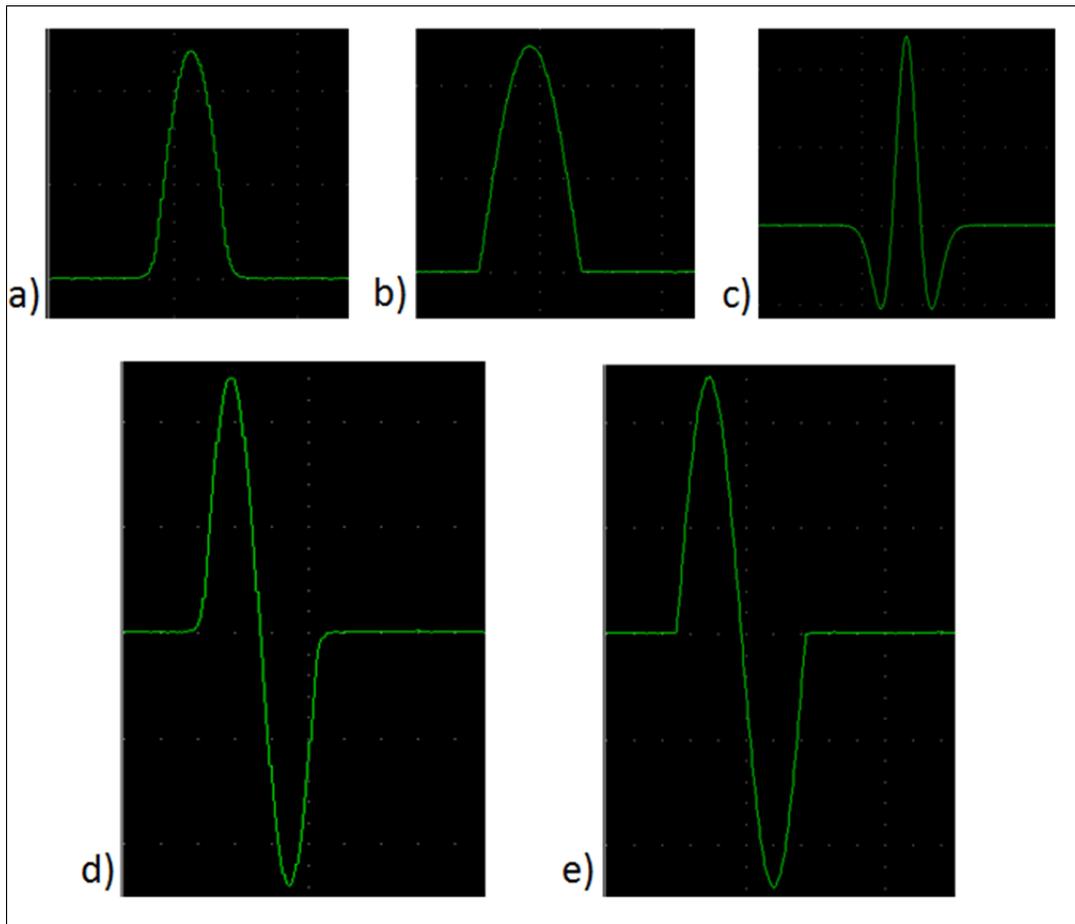


Figure 2.10 Signaux utilisés pour l'émission. a) Demi Sinus Arrondi, b) Demi Sinus, c) Ondelette, d) Sinus Arrondi, e) Sinus

Ce qui différencie les signaux arrondis et ceux standards est l'absence de discontinuité dans le signal (*Voir* figure 2.10 a) et d)). La présence d'une discontinuité peut provoquer la génération d'une onde de compression. En effet, l'anneau piézoélectrique va subir, dans le cas où il y a une discontinuité, une contrainte dont le taux de variation est en théorie infinie. Cela provoque l'apparition d'un « pic » de contrainte, d'où la création d'une onde assez faible de compression.

On appellera par la suite les signaux de la façon suivante : Transducteurs D-d, Nature du Signal, fréquence en kilo hertz (kHz)- amplitude en Volt (V)- gain en décibel (dB)

Exemple : Transducteur 38-34 mm, Demi Sinus Arrondi 5kHz-12V-14dB

Finalement, on peut choisir la taille d'échantillonnage, c'est-à-dire le nombre de points que le signal va contenir. Le programme propose des tailles d'échantillons de 1024 points minimum, et qui évoluent par multiple de 2. Il est préférable de choisir un des échantillonnages proposés par le programme. De plus il a été montré que le nombre de point choisis (1024, 2048, ...) n'influence pas sur l'analyse des résultats, hormis bien sûr si la taille de l'échantillon n'est pas suffisante par rapport à la longueur du signal.

2.4 Déroulement des essais

Une légère différence existe quant au déroulement des essais pour les premiers échantillons et ceux pour les plaques. Cette différence sera expliquée à la fin de cette partie.

2.4.1 Procédure de la mesure

La réalisation des mesures suit un schéma simple. Une fois l'échantillon réalisé, celui-ci est transporté jusqu'à la centrale d'acquisition. Aucune cure n'est appliquée à l'échantillon, il est à l'état le plus frais possible. Une précaution particulière doit donc être observée afin de ne pas briser l'échantillon.

Les transducteurs sont ensuite mis en place de part et d'autre de l'échantillon selon les besoins du test à savoir, avec ou sans serre-joint, avec un matériau quelconque à l'interface pierre poreuse / échantillon (*Voir figure 2.11*).

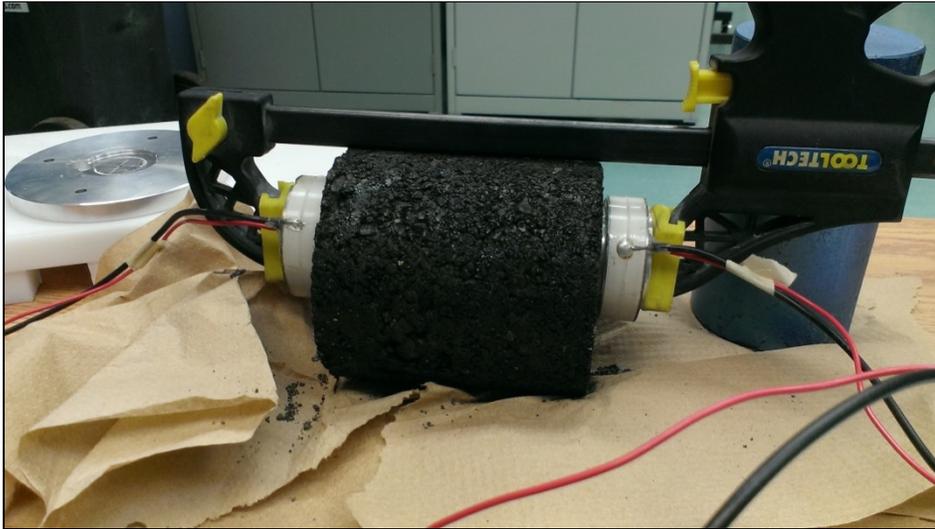


Figure 2.11 Échantillons de 107 mm équipé des transducteurs 51-45 mm. Le serre-joint permet de maintenir les transducteurs face à face

Les transducteurs sont reliés au matériel d'acquisition comme indiqué à la partie 2.3.4. Les tests visant, dans un premier temps, à vérifier si la méthode est utilisable dans ce genre de matériau et dans un second temps d'évaluer l'évolution de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement traversant le matériaux en fonction du temps, il est important de réaliser plusieurs mesures lors d'un même test, le retour en arrière étant impossible. Rappelons qu'en effet ces matériaux ont un comportement fortement évolutif.

De manière générale, tous les types d'ondes cités dans la partie 2.3.4 sont utilisés. De plus on va, pour chaque types de signal d'entrée, faire varier la fréquence et ce au minimum 3 fois. On se retrouve donc pour un couple de transducteurs (51-45 mm, 38-34 mm ou 22-16 mm) avec au moins 15 signaux à exploiter par la suite.

La mise en place des transducteurs étant assez aisée, le passage d'un couple de transducteur à un autre ne prend pas beaucoup de temps, et les mesures peuvent être réalisées sans perte de temps.

2.4.2 Cas particulier des plaques d'enrobé

Lors de la réalisation des essais sur les plaques d'enrobés bitumineux, la prise de mesures reste la même. La mise en place des capteurs ne s'effectue cependant pas de la même façon. En effet, comme expliqué dans la partie 2.3 la plaque support est munie d'orifices, les portes transducteurs sont insérés une fois les bouchons retirés. Ainsi les 3 couples de transducteurs sont installés sur la plaque jusqu'à la fin de l'essai, il suffit donc de brancher le couple dont on souhaite obtenir des résultats.

La masse de la plaque est mesurée à l'aide d'une balance. La plaque est déplacée à chaque mesure de la masse. L'ensemble est pesé et pouvant facilement accéder à la masse des transducteurs, de plaque support et de la masse sèche de l'enrobé testé, il est possible d'obtenir la masse d'eau contenue dans la plaque d'enrobé à chaque mesure (*Voir figure 2.12*).



Figure 2.12 Plaque sur la balance pour mesurer la masse

Par la suite, on appellera Test 1 l'ensemble des premières mesures réalisées avec les 3 couples de transducteurs et avec au moins 15 signaux par couples. Au moins une mesure de la masse d'eau est réalisée entre chaque nouveau Test.

De plus, un relevé de la température en surface de la plaque est effectué après chaque pesée. Ces relevés sont effectués à l'aide d'un thermocouple relié à un multimètre.

Les tests sont réalisés jusqu'à ce que la masse d'eau ne varie plus.

Une fois tous les tests terminés, on mesure à l'aide d'une colonne de mesure la hauteur supérieure des transducteurs, au niveau de la pierre poreuse. Connaissant la hauteur de tous les éléments utilisés, on peut déterminer la hauteur de la plaque d'EB au niveau des transducteurs, c'est-à-dire la distance de propagation de l'onde de cisaillement.

La figure 2.13 présente une plaque d'enrobé instrumentée et prête pour l'acquisition des données

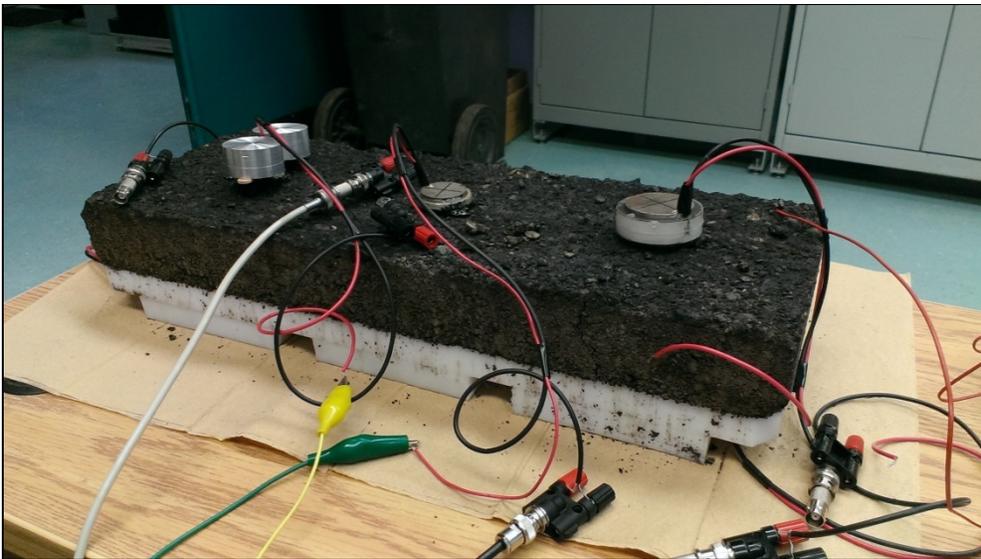


Figure 2.13 Plaque d'EB instrumentée

CHAPITRE 3

Tests préliminaires et développements

La méthode du P-RAT a tout d'abord été utilisée dans l'étude des sols et sur des échantillons de 30 mm de hauteur maximum. Ce chapitre fera état des tests préliminaires sur différents échantillons et des premières observations sur la méthode. En effet, il faut d'abord savoir si la méthode est utilisable avec les matériaux étudiés dans l'étude, puis déterminer si la méthode est exploitable. Les observations mèneront à des améliorations de la méthode d'acquisition et de mesure.

3.1 Génération et acquisition des signaux

Les 5 signaux sont utilisés à chaque prise de mesure, et ce à des fréquences différentes. Cela permet d'avoir un plus grand panel de résultats, le matériau pouvant réagir différemment en fonction du type de sollicitation.

Des essais antérieurs ont mis en évidence que, afin d'obtenir un résultat exploitable par la suite, il faut réaliser huit cycles d'émissions et donc huit réceptions pour un même signal. Les 8 signaux sont automatiquement empilés par le programme qui donne une courbe représentant la « moyenne » de ces signaux (*Voir* courbe rouge figure 3.1).

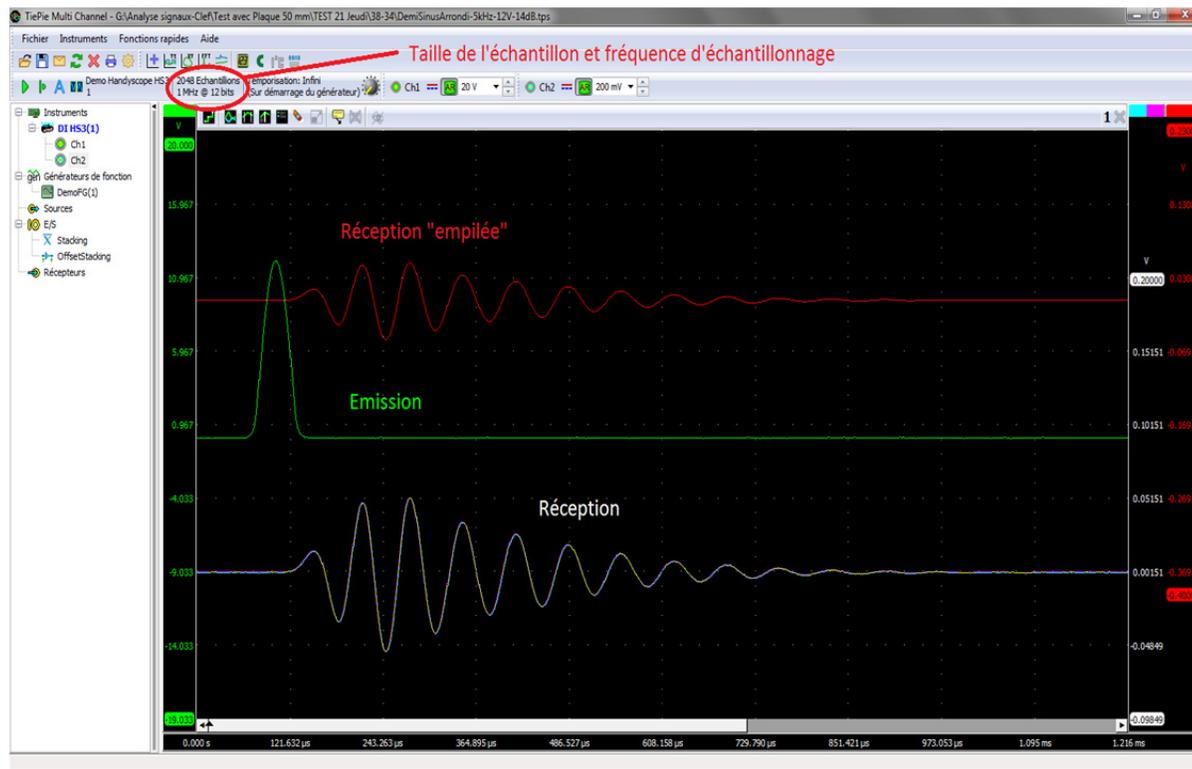


Figure 3.1 Acquisition de la réponse à un Demi Sinus Arrondi-5kHz-12V-14dB
Plaque de 50 mm avec mastic bitumineux, transducteur 38-34 mm, 3jours

Les courbes affichées peuvent, avant analyse, nous donner des informations sur la validité du signal obtenu.

Si, lors de la réalisation des 8 acquisitions successives, on remarque que le signal reçu (*Voir* courbe blanche figure 3.1) à chaque émission diffère du signal empilé, il faut reconduire la mesure. Cela peut se remarquer si la forme globale du signal n'est pas la même ou encore si l'amortissement est beaucoup plus rapide ou plus long.

On peut observer des phénomènes de résonance qui se traduiront graphiquement par un amortissement très lent du signal (*Voir* figure 3.3). Certaines méthodes utilisent les phénomènes de résonances (*Voir* partie 1.6.3) cependant dans notre cas, la résonance s'accompagne de ce qui pourrait être associé à de la modulation du signal.

La modulation est, en télécommunication, le processus par lequel un signal est transformé de sa forme originale en une forme plus propice à la transmission. On distingue deux signaux : la porteuse, et le signal modulant. La figure 3.2 présente le principe de la modulation de signal. La figure 3.3 présente une modulation en plus d'une résonance.

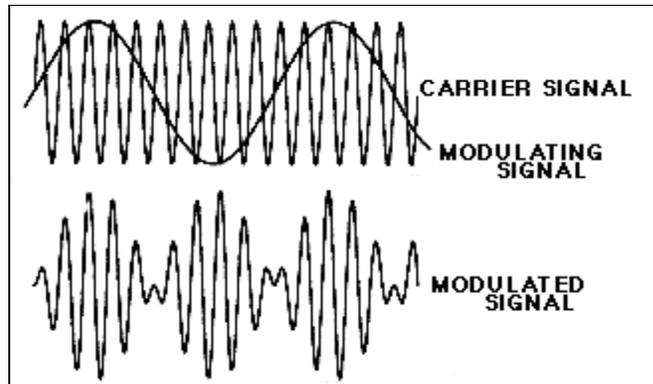


Figure 3.2 Schéma de principe du phénomène de modulation

La modulation présente de nombreux intérêt dans le domaine de la télécommunication, mais dans le cadre de nos essais, on préférera l'éviter ou au moins la diminuer au maximum. En effet, dans le cas d'une modulation il y a deux signaux distincts, comme expliqué précédemment, ce qui peut apporter des problèmes lors de l'analyse. Deux signaux signifient deux décompositions en série de Fourier et donc deux spectres fréquentiels potentiellement différents.

De plus la résonance est à éviter car on ne peut pas dire si c'est vraiment l'échantillon qui résonne ou si ce sont seulement les transducteurs qui résonnent entre eux et donc qui donneraient des informations fausses concernant la vitesse de propagation obtenue. Enfin, de par le caractère non liés en jeune âge des EB retraités à froid, il se peut que des granulats résonnent seuls et provoquent des variations dans le signal reçu.

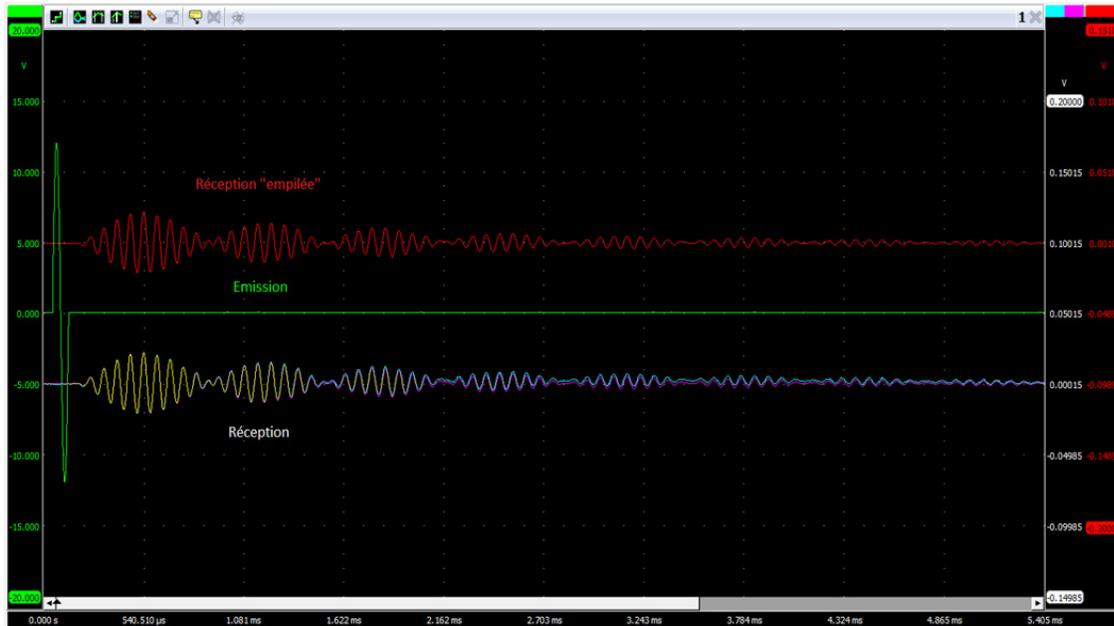


Figure 3.3 Cas de résonance, on remarque que le signal rouge est très lentement amorti (8 ms ici)
Échantillon de 107 mm de longueur, Sinus-5kHz-12V-28dB,
transducteurs 51-45 mm, 3 jours

Des répliques du signal émis peuvent également apparaître dans le signal reçu. Une réplique correspond à une réponse immédiate du transducteur récepteur dont la forme est de la même allure que le signal d'entrée (*Voir* figure 3.4). Celle-ci force l'utilisation de filtres lors de l'analyse du signal, ce qui rend l'exercice plus difficile. C'est afin d'empêcher l'apparition de répliques que la pierre poreuse est reliée au potentiel neutre.

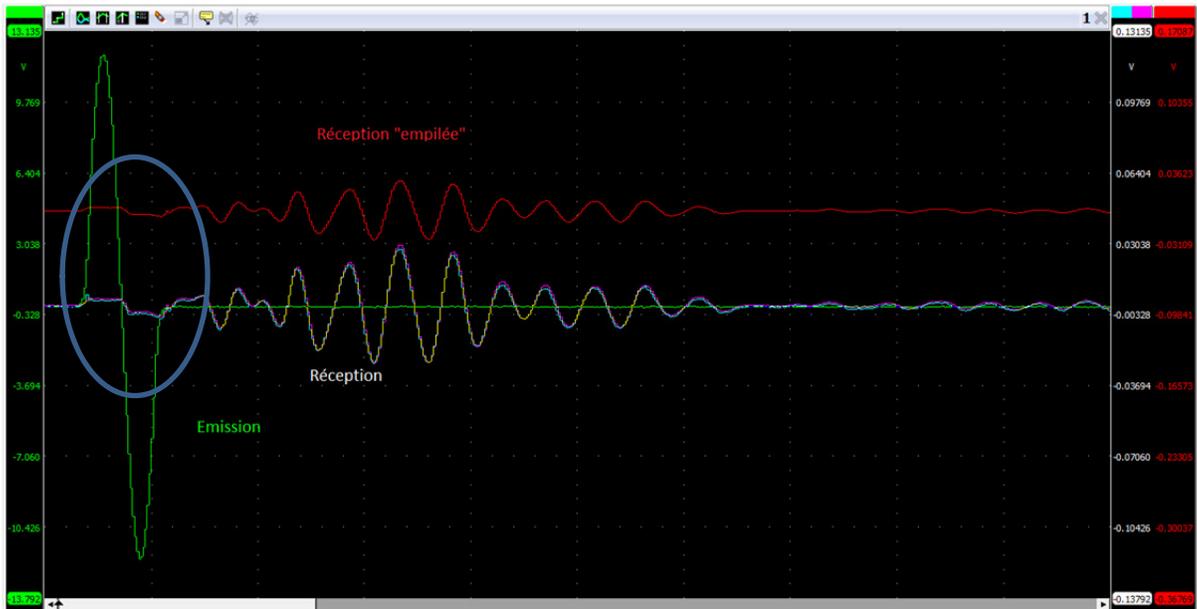


Figure 3.4 Présence d'une légère réplique dans le signal reçu (rouge et jaune)
 Plaque de 50 mm de hauteur, Sinus Arrondi-10kHz-12V-42dB,
 transducteurs 22-16 mm, 5 jours

3.2 Première approche avec une méthode temporelle

Comme expliqué à la partie 1.7, les méthodes temporelles permettent de donner une bonne approximation de la vitesse de propagation de l'onde qu'on doit obtenir. Ainsi, un outil développé à Sherbrooke par Mourrad Karray, est ici utilisé (Karray, 2015).

Cette méthode repose sur l'interprétation de l'effet de champ proche souvent présent lors de l'utilisation de méthodes temporelles dans l'étude des sols.

En prenant en compte que l'énergie échangée entre l'émission et la réception ne s'effectue que là où le spectre en fréquence présente un pic, on peut obtenir une réponse théorique qui est décalée par rapport à la réponse expérimentale. En superposant ces 2 signaux on obtient la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement (*Voir* figure 3.5).

Cette méthode montre également que les méthodes temporelles classiques, telles que celles exposées à la partie 2.5.3, ne sont pas aussi intuitives qu'elles pourraient paraître. Par exemple, si on souhaite faire une analyse selon la méthode pic à pic, on se rend compte que pour certain signaux, le premier pic de l'émission correspond au 3^{ème} pic de la réception, en admettant valide la méthode présentée à la section. Enfin, les valeurs obtenues sont généralement inférieures aux valeurs réelles.

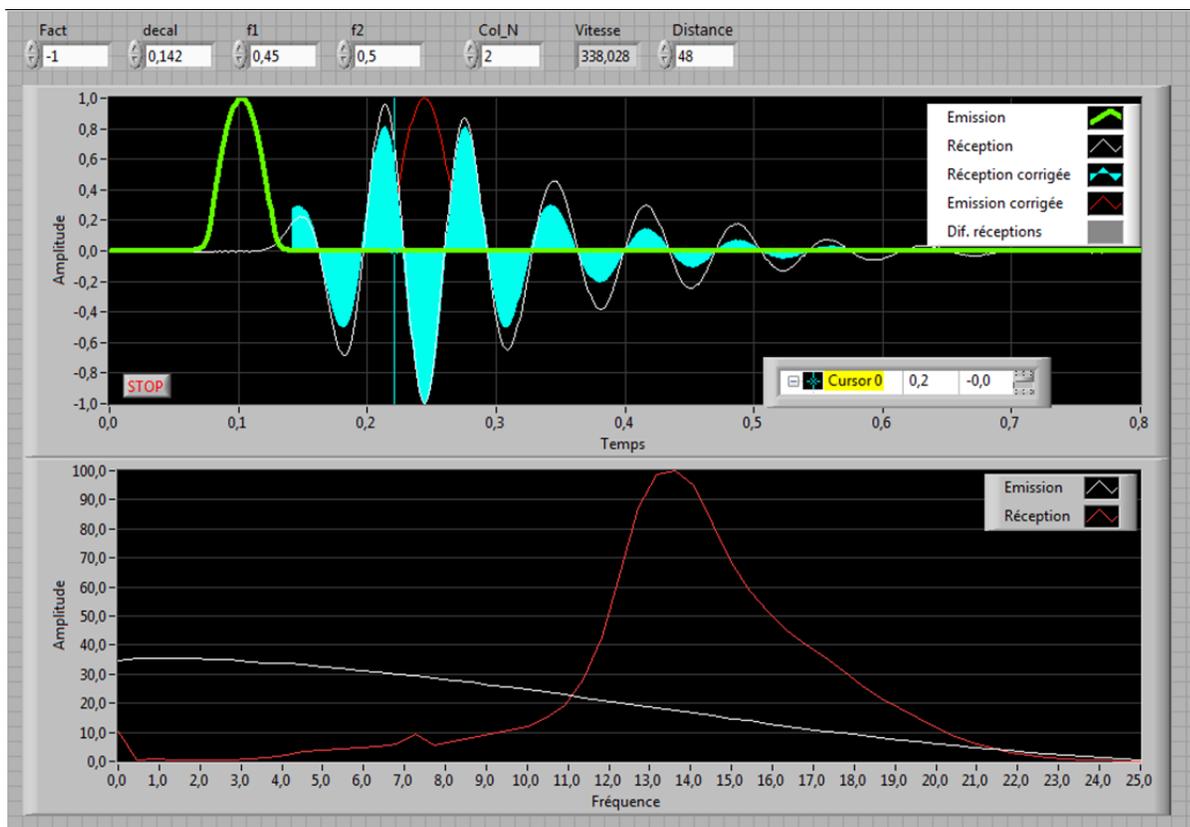


Figure 3.5 Plaque 2, Demi Sinus Arrondi-5kHz-12V-14db, transducteurs 38-34 mm, 6 jours

Dans le cas de la figure 3.5, l'analyse temporelle donne une vitesse $V_s = 338 \text{ m.s}^{-1}$, alors que l'analyse fréquentielle donne $V_s = 345 \text{ m.s}^{-1}$. Ceci est dû à la prise en compte du déphasage du signal dans la méthode fréquentielle (*Voir* partie 1.7.4). L'approximation est cependant fortement utile car elle renseigne sur la plage de vitesse qui doit être visée.

3.3 Analyse fréquentielle des signaux

L'analyse fréquentielle prend place après l'acquisition des signaux temporels. Les calculs et le raisonnement liés à cette méthode sont expliqués dans la partie 1.7.4. L'analyse se déroule sous le programme LabVIEW de National Instruments. L'interface utilisée a été développée par Ethier (2009) et Karray (2010, 2015) à l'université de Sherbrooke.

Comme expliqué dans la partie 1.7.4, la vitesse de phase est égale à V_s aux abords de la fréquence de résonance. La figure 3.6 présente l'interface utilisée lors de l'analyse fréquentielle. L'interface se décompose en 4 parties. Pour rendre l'explication plus simple, des encadrés de couleurs ont été réalisés (*Voir* figure 3.6).

L'encadré bleu présente le signal émis, le signal reçu expérimental, le signal reçu corrigé et le signal théorique. La zone grise dans cet encadré représente le filtre mis en place sur le signal. L'utilisation d'un filtre (passe-bas ou passe-haut, voire les deux) permet de rendre l'analyse plus simple, comme expliqué dans la partie 3.1.

L'encadré vert présente les spectres fréquentiels du signal d'entrée (courbe verte pleine) et de la réception (courbe rouge). Cet encadré est important car il permet de voir si le signal sera facile à traiter de par la présence d'un seul pic plus ou moins étendu. De plus il donne une information concernant la fréquence de résonance, valeur de la fréquence à l'endroit du pic. Cette fréquence sera utile dans l'analyse du signal notamment à l'aide des autres encadrés.

Les encadrés vert et rouge illustrent les calculs de la partie 1.7.4

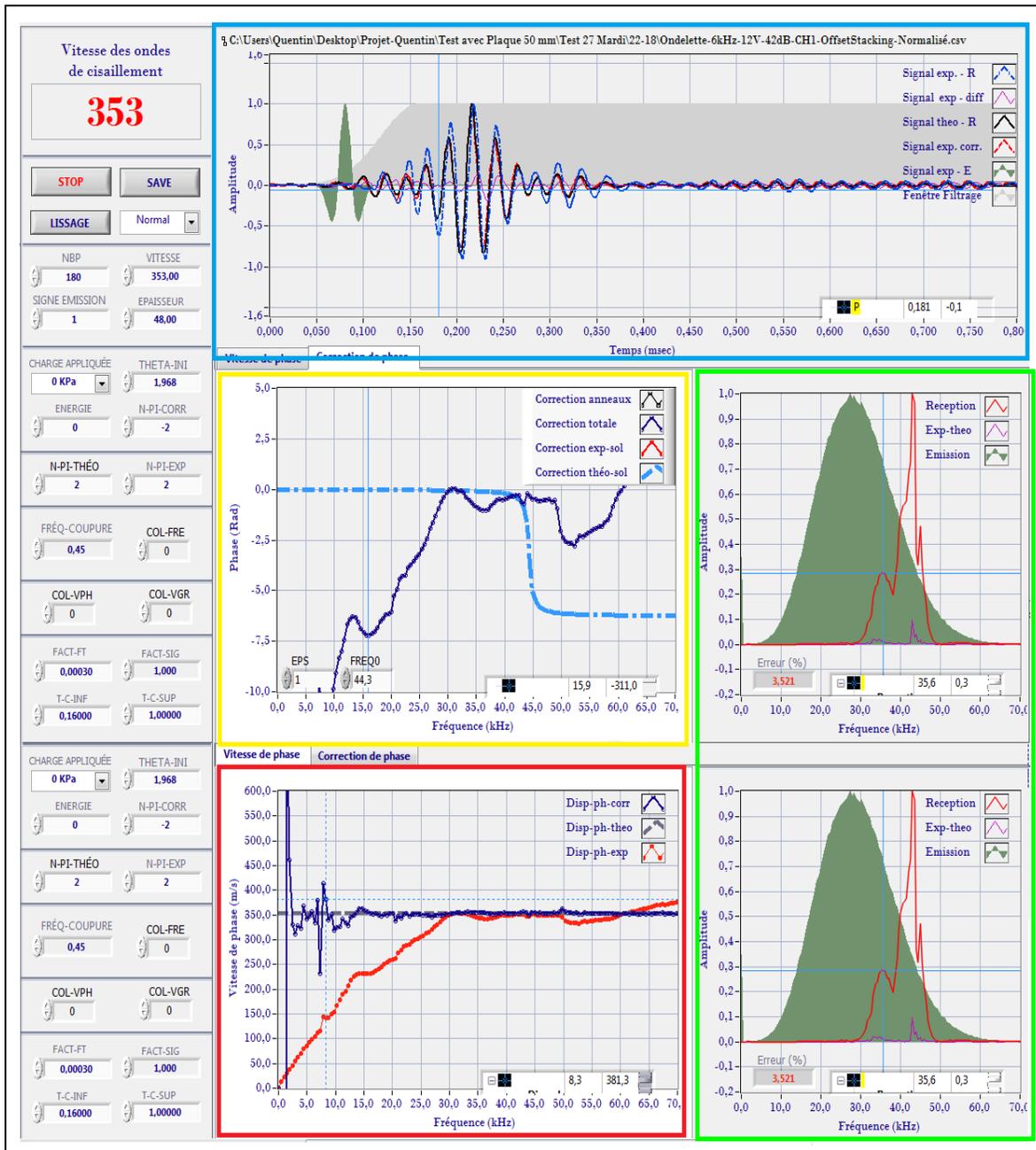


Figure 3.6 Interface du programme d'analyse fréquentielle P-RAT

Le cadre jaune concerne la correction de phase. Le diagramme de Bode en phase théorique des couples de transducteurs correspond à la courbe en pointillés bleus. Cette courbe présente deux asymptotes, une à 0 radian aux basses fréquences et 4π radians aux hautes fréquences de part et d'autre de la fréquence de résonance déterminée grâce au spectre fréquentiel. Les

4π rad sont dus au fait qu'il y ait deux transducteurs, chacun ayant un déphasage maximum de 2π comme tout systèmes dynamiques à un degré de liberté (*Voir* partie 1.7.4). La courbe entière bleue représente la correction de phase expérimentale. Il convient de faire coller au mieux la courbe bleue avec celle en pointillé.

Le cadre rouge présente les vitesses de phases. En rouge la courbe de la vitesse de phase expérimentale, en bleu la vitesse de phase corrigée et en pointillés gris, la valeur de V_s obtenue après correction. Connaissant la fréquence de résonance et sachant que la vitesse de phase ne dépend plus de la fréquence et est constante aux abords de cette fréquence (*Voir* partie 1.7.4), on peut déterminer la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement.

Finalement, à l'aide des encadrés vert et rouge, on règle les paramètres afin d'obtenir une approximation la plus fine possible. Les deux encadrés étant liés par des paramètres communs, la modification d'un graphe influe sur l'autre.

Dans l'exemple ci-dessus, le spectre fréquentiel de la réception est assez étendu, de 30 kHz à 50 kHz, et le pic principal est à une fréquence de 44 kHz. Dans l'encadré rouge, on doit donc s'attendre à trouver pour la courbe rouge une configuration où celle-ci va présenter une partie asymptotique idéalement entre 30 kHz et 50 kHz. C'est le cas dans l'exemple, ainsi on peut placer la courbe de vitesse théorique au niveau de cette asymptote.

En rapprochant la courbe de vitesse expérimentale corrigée (la courbe bleue de l'encadrée rouge), la courbe de correction de phase expérimentale (bleu de l'encadrée jaune) va bouger également. Il faut que cette courbe colle au mieux la courbe de phase théorique. Dans l'exemple, les courbes expérimentales et théorique ne s'approximent que très peu, ce qui rend l'analyse plus difficile. Ceci signifie seulement qu'il y a très peu de déphasage entre les capteurs dans la configuration où ils se trouvent pour ce test.

Il est cependant plus simple d'analyser un signal qui ressemble à la figure 3.7, le déphasage étant plus prononcé, réduisant la marge d'erreur.

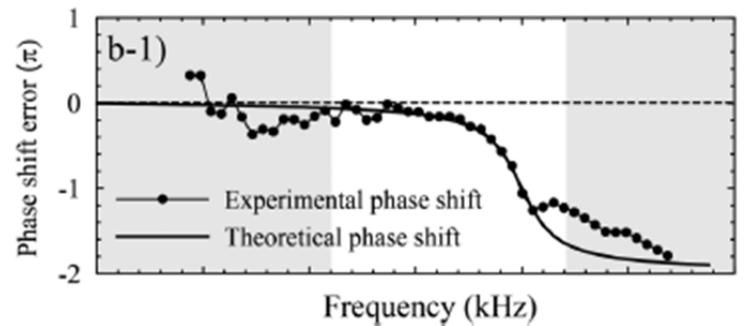


Figure 3.7 Décalage de phase dans un sable Péribonka en utilisant la méthode P-RAT
Adaptée de Karray *et al.* (2015)

Il apparait ici qu'une information doit être répétée. Les paramètres sont liés dans le programme, ainsi une variation sur le décalage de phase (encadré vert) fera varier les courbes de vitesse de phase (encadré rouge) et vice versa. Il est donc important de ne pas se concentrer uniquement sur un des deux encadrés, mais bien sur les deux tour à tour. En effet, il est possible de faire coller la courbe expérimentale de phase avec la courbe théorique, en ajustant habilement les paramètres, sans pour autant que les courbes de vitesse de phase ne soient cohérentes.

3.4 Test des transducteurs « à vide »

Les capteurs étant réalisés pour l'étude, il convient de tester leur fonctionnement. En effet, même si des moules en silicone sont utilisés afin de correctement placer les éléments entre eux, si l'anneau piézoélectrique est placé de travers ou bien mal encastré avec la pierre poreuse, cela peut jouer sur la qualité des signaux émis et reçus.

Afin de réaliser ceci, on place les pierres poreuses des 2 transducteurs en contact et on effectue la mesure avec différents types d'ondes et à des fréquences différentes. Des pressions différentes ont été exercées sur les transducteurs (utilisation de serre-joint, simple pression des doigts). De plus on peut déterminer grâce à ces essais des caractéristiques propres aux transducteurs.

Il ressort de ces tests que tous les couples de capteurs fonctionnent correctement. En effet les signaux temporels sont bien transmis. L'analyse fréquentielle de ces signaux permet d'obtenir la fréquence de résonance propre à chaque couple de transducteurs ainsi que leur amortissement. Les résultats pour chaque couple sont réunis dans le tableau 3.1. Deux exemples sont présentés en figure 3.8. La courbe de phase expérimentale colle bien à celle théorique au niveau de la fréquence de résonance. Pour déterminer ces caractéristiques, on observe le spectre en fréquence du signal reçu et on cherche à faire coller au mieux la courbe de phase théorique avec celle expérimentale (*Voir* figure 3.8).

Tableau 3.1 Fréquences de résonance et amortissement propres à chaque paires de transducteurs

Transducteur	Fréquence de résonance (kHz)	Amortissement
22-16	35,15	2,5
38-34	16,25	1,2
51-45	12,35	0,6-0,7

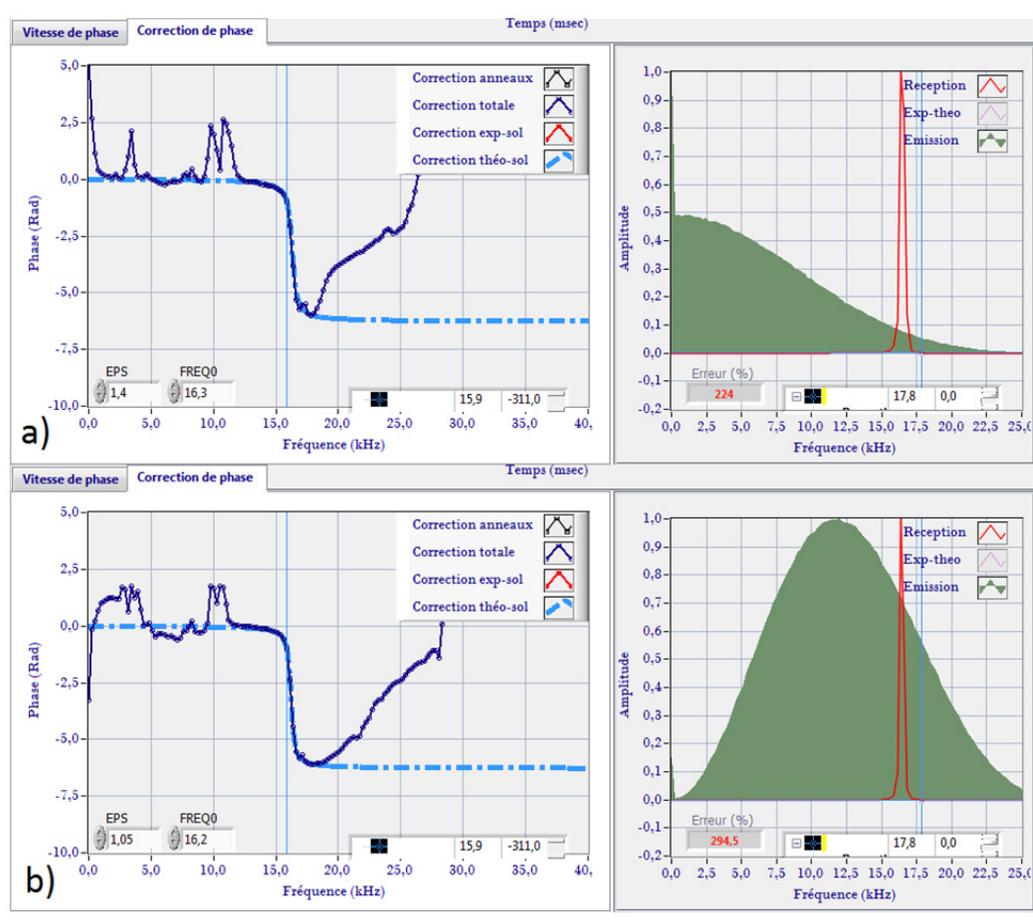


Figure 3.8 Transducteurs 38-34. Test à vide; a) Demis Sinus Arrondi 5Khz-12V-42dB;
b) Sinus Arrondi 5kHz-12V-42dB

Le maintien en contact des transducteurs est réalisé avec une pression des doigts. En accord avec les travaux de Ethier (2009) si on augmente la pression de serrage des 2 transducteurs, avec un échantillon entre deux ou non, la fréquence de résonance augmente. Ainsi, si on utilise un serre-joint pour maintenir les transducteurs la fréquence de résonance dans le programme d'analyse augmente.

Ces données seront utilisées par la suite lors de l'analyse des échantillons.

3.5 Test avec les échantillons

En accord avec le programme expérimental, et de par les propriétés du matériau en jeune âge, il est important de vérifier que le signal émis d'une extrémité et reçu de l'autre. C'est à cette fin que les 3 échantillons cylindriques ont été réalisés.

Dès les premiers tests sur chacun des échantillons et sans besoin d'analyse fréquentielle, il ressort que le signal émis par l'un des transducteurs est reçu par l'autre. La figure 3.9 compile certaines courbes pour des transducteurs, des tailles d'échantillons et des types de signaux différents.

Il ressort de l'étude de ces signaux que le signal passe, peu importe la taille de l'échantillon. On remarque que plus l'échantillon est grand, moins l'amplitude du signal reçu est élevée, pour un âge de l'échantillon similaire. L'amplitude du signal reçu est cependant plus importante lorsque l'échantillon vieillit, et donc que la cohésion au sein du matériau augmente.

On remarque cependant que l'amortissement du signal reçu est assez lent à se produire. En effet, il faut plusieurs millisecondes, par exemple pour le f) de la figure 3.9, pour que l'onde soit atténuée. Cela témoigne de la présence d'une résonance. Pour les raisons expliquées dans la partie 3.1, on doit éviter ce phénomène. La résonance est moins prononcée pour les transducteurs 22-16 mm, même si ceux-ci subissent la présence de répliques. Le câble de mise à la terre a été vérifié par la suite et les soudures ont été refaites afin de palier à ce problème.

Malgré cela, ces signaux suivent un schéma classique à savoir une rapide montée en amplitude au début suivie d'une décroissance progressive de l'amplitude.

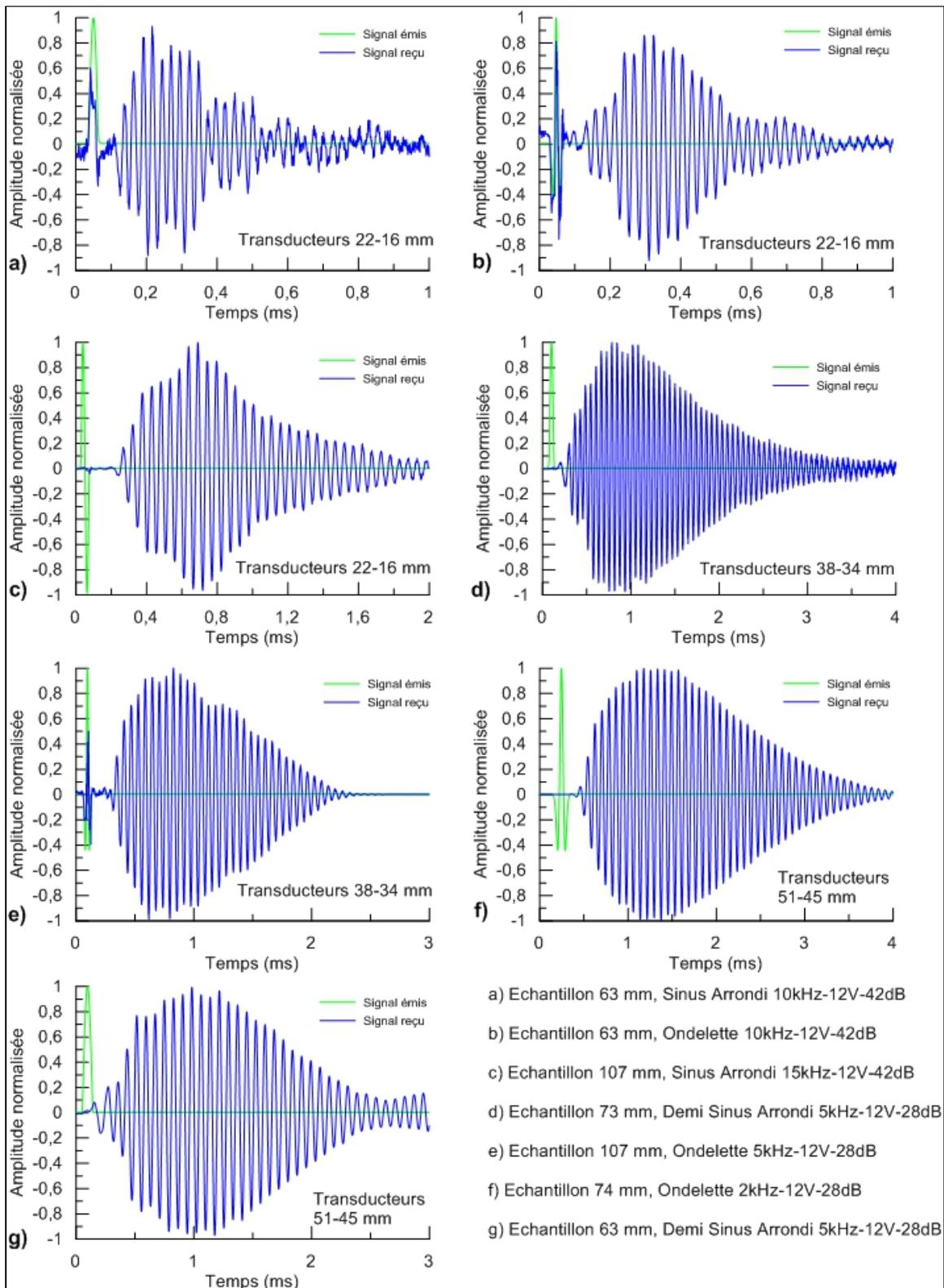


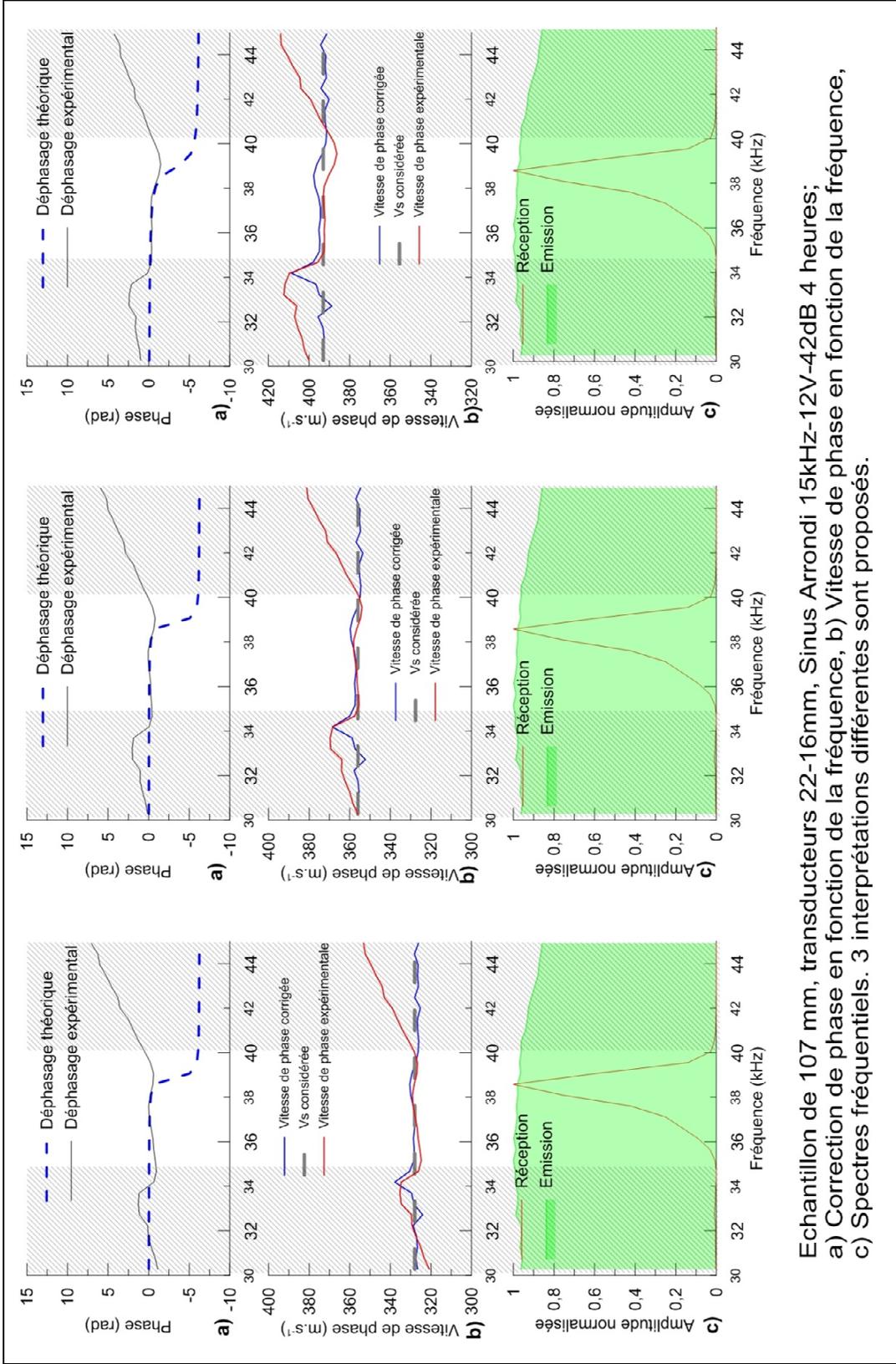
Figure 3.9 Émission et réception de signaux pour les 3 couples de transducteurs

Comme expliqué dans la partie 1.7.4, ce sont pour les fréquences proches de celle de résonance que l'analyse est établie. Cependant, les tests effectués sur les échantillons cylindriques montrent que la bande de fréquence pour laquelle il y a échange d'énergie entre l'émission et la réception est très étroite.

Ainsi il est difficile d'analyser correctement le signal, dans le sens où aucune solution n'apparaît comme prépondérante. La figure 3.10 illustre ce problème. Avec ce signal, la plage de fréquence va de 36 kHz à 40 kHz. La vitesse de propagation se détermine lorsque la courbe de vitesse de phase forme une asymptote. Cependant ceci ne se produit qu'aux fréquences où de l'énergie est échangée, c'est-à-dire dans le cas de la figure 3.10, entre 36 kHz et 40 kHz. Dans la figure 3.10, les zones délimitées par les hachures sont celles dans lesquelles les asymptotes doivent être présentes.

Trois configurations possibles sont présentées dans la figure 3.10 b). Dans les 3 cas, la courbe de vitesse de phase corrigée (en rouge) présente une partie plate (comparativement au reste de la courbe) entre 36 et 40 kHz. Sans une autre méthode pour confirmer et ne sachant pas quelle est la vitesse de propagation, il est difficile d'arrêter son avis sur tel ou tel cas. Dans cet exemple, les trois vitesses possibles étaient de gauche à droite : 328 m.s^{-1} , 356 m.s^{-1} et 393 m.s^{-1} , selon l'interprétation

Les écarts dans les vitesses possibles ne permettent pas une bonne analyse. Il a donc été décidé par la suite de chercher si la résonance pouvait être limitée et si l'échange d'énergie pouvait être amélioré, afin d'obtenir des résultats de meilleure qualité.



Echantillon de 107 mm, transducteurs 22-16mm, Sinus Arrondi 15kHz-12V-42dB 4 heures;
 a) Correction de phase en fonction de la fréquence, b) Vitesse de phase en fonction de la fréquence,
 c) Spectres fréquentiels. 3 interprétations différentes sont proposés.

Figure 3.10 Illustration du problème lié à la faible bande passante d'échange d'énergie

3.6 Recherche d'améliorations de la mesure

3.6.1 Test énergie

Les tests précédents ont montré que l'échange d'énergie entre l'émission et la réception n'est pas suffisant pour une analyse efficace et juste. Il a été supposé que la fréquence du signal émis pourrait influencer d'une part la présence du phénomène de résonance et d'autre part sur l'échange d'énergie.

La figure 3.11 présente l'évolution du spectre fréquentiel de l'émission en fonction de la fréquence. On observe un décalage des spectres fréquents de l'émission ainsi qu'un étalement lorsque la fréquence d'entrée augmente.

La figure 3.11 ne présente qu'un type de signal pour les couples de transducteurs 22-16 mm et 51-45 mm. En effet les résultats sont les mêmes pour tous les couples de transducteurs. Chaque signal va cependant se décaler de façon différente. Le tableau 3.2 présente les relations mathématiques qui ont été observées. Ces lois mathématiques ne sont pas précises à l'hertz près, elles sont issues de l'observation des signaux et permettent de mieux cibler des fréquences qui donneront des résultats. Dans le tableau 3.2, la fréquence de centrage est la fréquence à laquelle apparaît l'amplitude maximum du spectre fréquentiel de l'émission. Les signaux demi sinus et demi sinus arrondi voient cette valeur égale à 0, car leur maximum d'amplitude est située à 0 kHz.

Par exemple, les transducteurs 22-16 mm possèdent une fréquence de résonance comprise entre 30 kHz et 40 kHz et si on émet un demi sinus de 5kHz, le spectre fréquentiel de l'émission ne s'étendra que jusqu'à 15 kHz. Ainsi il n'y aura peu voire pas du tout d'échange d'énergie, l'analyse n'en sera que plus difficile.

Tableau 3.2 Relations entre la fréquence du signal émis et l'étalement du spectre fréquentiel

Type d'onde	Fréquence de centrage f_c	Plage d'étalement
Ondelette	$f_c = f_e \times \frac{14}{3} - \frac{1}{3}$	$[0 ; 10 \times f_e]$
Sinus	$f_c = f_e \times 2 - 1$	$[0 ; 4,5 \times f_e]$
Sinus Arrondi	$f_c = f_e \times \frac{7}{3} + \frac{1}{3}$	$[0 ; 5 \times f_e]$
Demi Sinus	0	$[0 ; 3 \times f_e]$
Demi Sinus Arrondi	0	$[0 ; 1,6 + 4,2 \times f_e]$

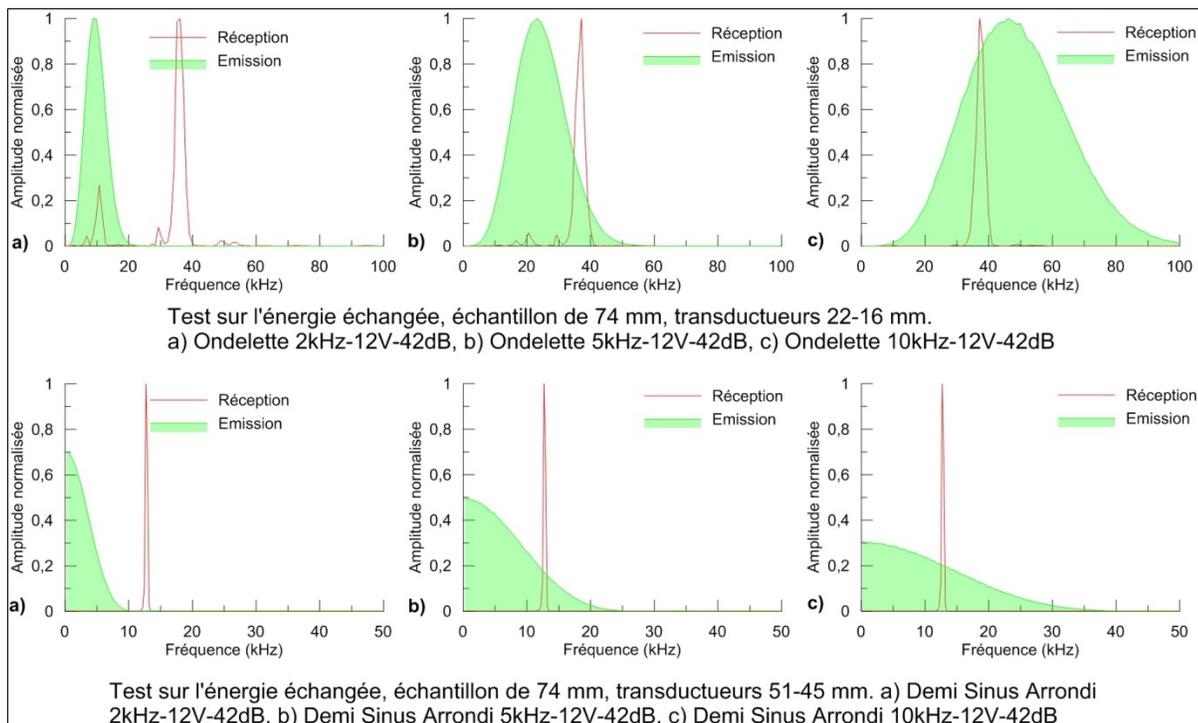


Figure 3.11 Essai sur l'échange d'énergie; en haut : transducteurs 22-16 mm et en bas : transducteurs 51-45 mm

Des essais ont été réalisés à très basse fréquence pour essayer de contrer le phénomène de résonance. La figure 3.12 présente les résultats de l'étude des transducteurs 38-34 mm avec l'échantillon de 107 mm qui était alors âgé de 57 jours. Quatre signaux sont ici présentés. Les deux premiers sont à des fréquences très basses, 200 et 400 Hz. On remarque pour ces deux fréquences, que le principal pic en fréquence est aux alentours de 3 kHz, or dans toutes les mesures précédentes, celui-ci était vers les 16 kHz. En réalité, ce pic existe pour les 2 premiers signaux, mais son amplitude est très faible. Pour les fréquences plus élevées, seul le pic de 16 kHz apparaît. On ne peut donc pas émettre à des fréquences trop basses. On remarque de plus, que le signal met encore du temps pour s'amortir, aussi bien pour les basses que pour les hautes fréquences.

Finalement, la variation de fréquence du signal émis n'influence pas sur la taille de la plage d'échange d'énergie, comme on peut l'observer dans les figures 3.11 et 3.12.

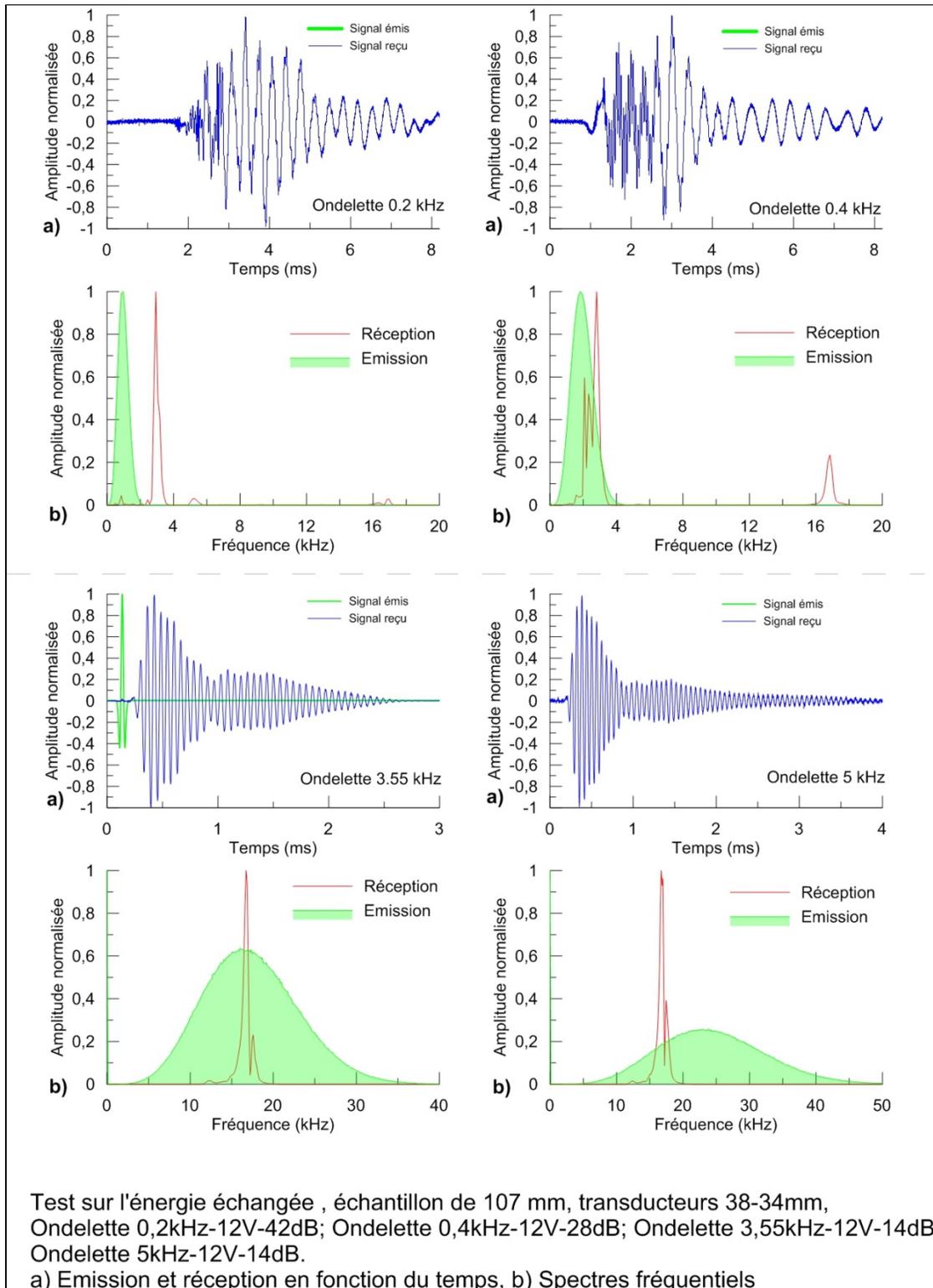


Figure 3.12 Test sur l'énergie échangée, essai de réduction du phénomène de résonance

3.6.2 Test avec le mastic bitumineux

La variation de la fréquence n'ayant pas d'impact sur la plage d'échange d'énergie, il a été décidé d'améliorer le contact entre la pierre poreuse et l'échantillon. En effet, malgré la porosité de la pierre et la présence de bitume dans le mélange, il est présumé que le contact ne s'effectue pas sur toute la surface de la pierre poreuse.

Le but ici est de créer une interface qui permettrait à la pierre poreuse d'être en contact complet avec l'échantillon. Il est donc nécessaire de combler les aspérités de la surface de l'échantillon. L'utilisation d'un matériau relativement malléable mais qui présente une certaine rigidité afin de ne pas trop atténuer le signal a été testé.



Figure 3.13 Test avec mastic bitumineux
Transducteurs 38-34 mm, échantillon 107 mm

Un mastic bitumineux (sable et bitume PG 58-28) a été réalisé et disposé entre la pierre poreuse et l'échantillon (*Voir* figure 3.13). Cette solution a été tentée afin de ne pas intégrer au montage des matériaux différents de ceux déjà utilisés. Par exemple, une couche d'argile aurait pu être appliquée entre la pierre poreuse et l'échantillon. Cependant l'argile, malgré le fait qu'elle remplisse les 2 critères cités au paragraphe précédent, sèche si on ne l'hydrate pas fréquemment. Or on ne veut pas, dans le cas d'un enrobé bitumineux, que de l'eau soit ajoutée.

La couche de mastic bitumeux fait entre 2 et 3 mm d'épaisseur dans le cas de ces tests. Ces tests ont été conduits avec les transducteurs 38-34 mm et 22-16 mm sur l'échantillon de 107 mm.

On remarque que le phénomène de résonance a disparu. En effet pour tous les signaux obtenus, l'amortissement est plus rapide. De plus, le contact semble être très important comme il a été supposé. Le spectre fréquentiel du signal reçu présente une zone d'échange d'énergie plus large comme le montre les graphes d) des figures 3.14 et 3.15. Cela permet d'avoir une analyse plus simple et qui laisse moins de place à la subjectivité.

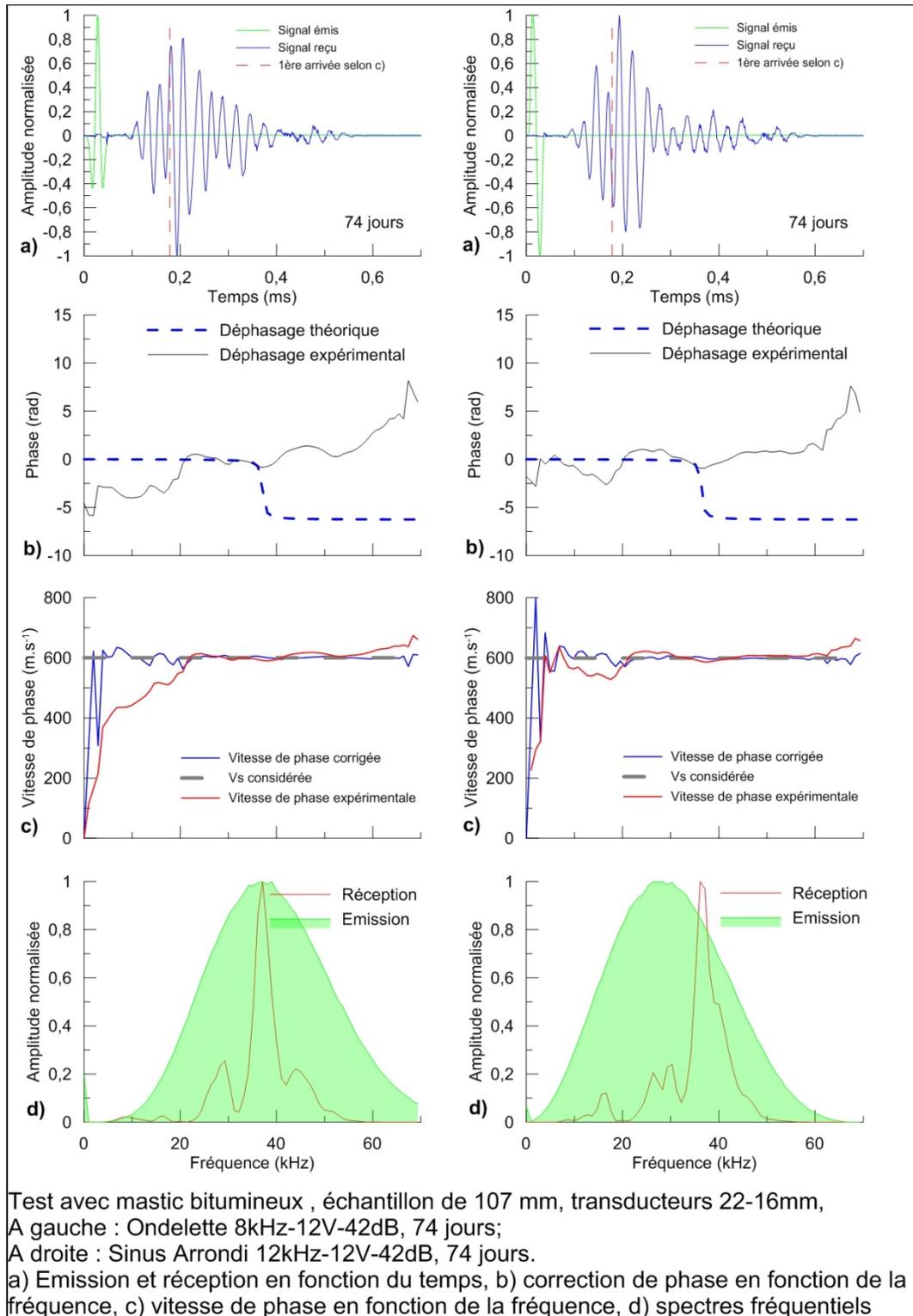


Figure 3.14 Résultats pour le test avec le mastic bitumineux, transducteurs 22-16 mm

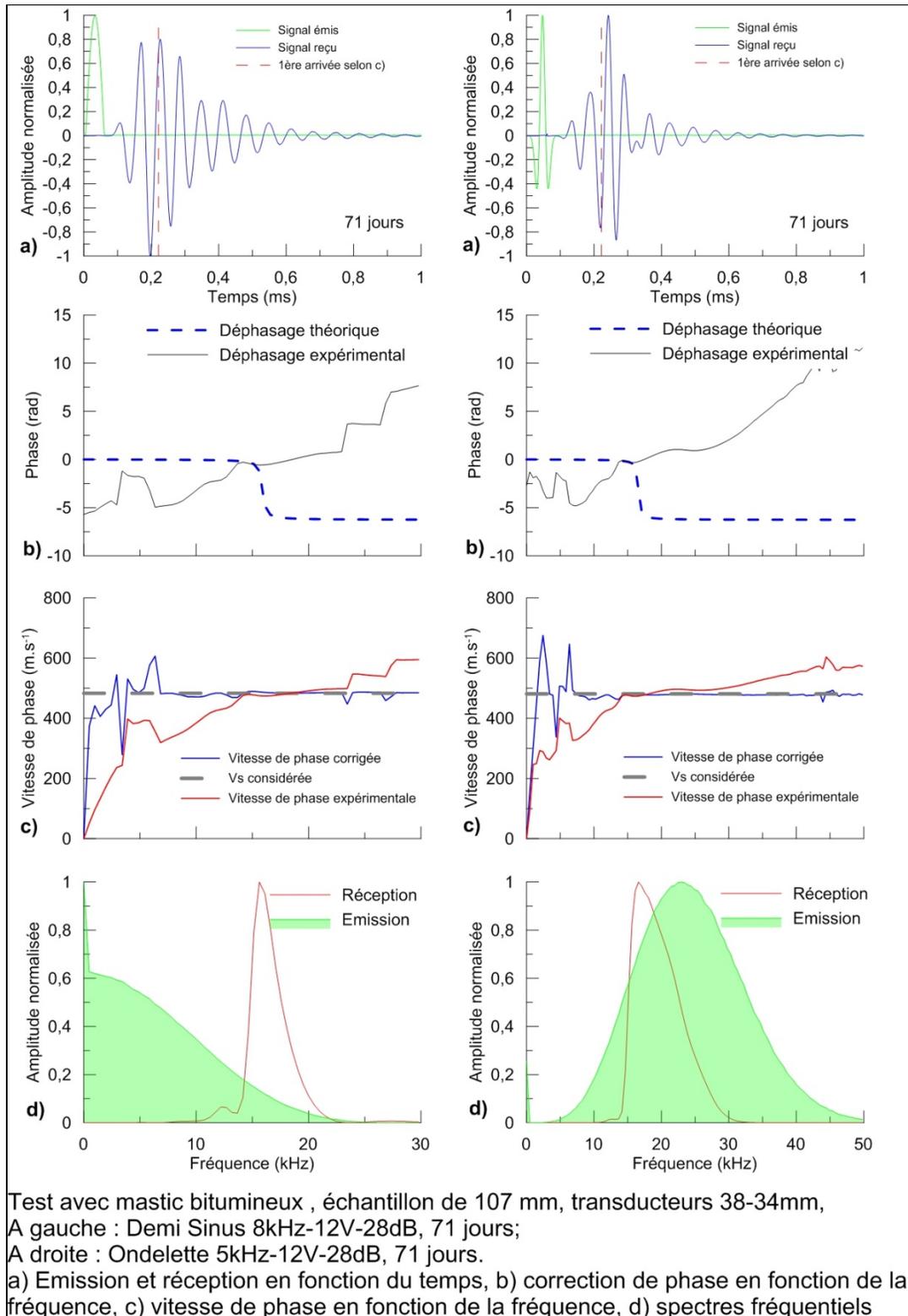


Figure 3.15 Résultats pour le test avec le mastic bitumineux, transducteurs 38-34 mm

3.7 Conclusion partielle

De nombreuses informations ont été obtenues grâce à ces tests préliminaires. En effet on sait que la méthode P-RAT est utilisable pour les enrobés bitumeux recyclés à froid retraités à l'émulsion de bitume. De plus, on sait que le contact échantillon / transducteur n'est pas optimal comme tel, et qu'une couche de mastic bitumineux peut permettre d'améliorer ce contact et d'améliorer ainsi l'analyse des résultats.

Pour la suite, toutes les recommandations et remarques présentées dans ce chapitre seront prises en compte et appliquées aux tests futurs.

CHAPITRE 4

Essais sur les plaques

4.1 Introduction

La seconde partie des tests a été effectuée sur des plaques d'enrobés bitumineux retraités à froid. Ceux-ci visent à évaluer l'évolution de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement au sein des ERF en fonction du temps et de la quantité d'eau présente dans les échantillons testés.

Comme expliqué dans le chapitre 2, les spécimens ont pris la forme de plaques d'enrobés. Deux plaques ont été réalisées. Cependant, comme expliqué dans la partie 2.4, on réalise au moins 15 signaux par couple de transducteurs et par test. En un test on obtient donc un minimum de 45 signaux. Tous ne sont pas forcément exploitables mais ce n'est pas connu avant de procéder à l'analyse. Il arrive que l'analyse de 10 signaux d'un même test et pour un même couple de transducteurs soient nécessaire pour obtenir une analyse exploitable. Ainsi, pour une plaque, au moins 1350 signaux sont potentiellement exploitables. De plus, la méthode d'analyse présentée à la partie 3.2 n'ayant été établie qu'après la fin de la réalisation des tests de la seconde plaque, certaines analyses ont dues être reconduites.

Ainsi il a été choisi de réaliser moins de plaques, mais d'accentuer l'exactitude des résultats obtenus par une comparaison de plusieurs signaux issus d'un même test.

Certains résultats d'analyses seront présentés par la suite, seuls les plus faciles à interpréter sont présents dans ce chapitre. Les autres résultats d'analyse sont disponibles aux annexes 2 à 6. Il a été choisi de ne pas présenter les résultats des transducteurs 22-16 mm pour la seconde plaque, les raisons sont expliquées par la suite.

4.2 Instrumentation des plaques et observations physiques

La partie 2.2.2 présente les caractéristiques des plaques réalisées pour ces tests. Cette partie fera état des observations réalisées sur les plaques juste après leur réalisation et pendant l'instrumentation.

Afin d'obtenir un bon contact entre la plaque et les pierres poreuses, un mastic bitumineux a été réalisé et disposé sur les surfaces des pierres poreuses en contact avec la plaque. Cette action est bien sûr réalisée juste avant de mettre le transducteur en place afin que le bitume reste assez liquide pour prendre sa place. Une fois la plaque extraite du moule, les bouchons inférieures ont été enlevés et remplacés par les porte-transducteur.

4.2.1 Commentaires sur la plaque 1

Lors de la mise en place du porte-transducteur 51-45 mm, la plaque a été fissurée localement. En effet, la plaque support ainsi que les porte-transducteurs ont été dimensionnés afin que les pierres poreuses affleurent la plaque. Ainsi, avec la couche de bitume en plus, la plaque a été soulevée et, du fait de la faible cohésion des MR en très jeune âge, la plaque a été poinçonnée et des fissures sont apparues (*Voir figures 4.1 et 4.2*).

Ainsi, par la suite, les résultats des transducteurs 51-45 mm de la première plaque ne seront pas pris en compte, mais tout de même analysés.

Pour les deux autres paires de transducteurs, des fissures de surfaces sont apparues après quelques jours. Cela est dû à l'utilisation du mastic bitumineux. En effet, les tests devant débiter juste après la fin de la compaction pour caractériser le cas d'un très jeune âge, le mastic bitumineux est appliqué sur l'enrobé alors que celui-ci n'a pas encore une bonne cohésion. Ainsi, cela va créer de légères contraintes internes au niveau des transducteurs. Ces contraintes vont retenir le matériau lorsque celui-ci murit et donc se rétracte. En observant la plaque après avoir retiré les capteurs, il apparaît que seules les fissures proche du transducteur 51-45 mm sont profondes, les autres ne dépassent pas le millimètre.



Figure 4.1 Transducteur 51-45 supérieur, présence de fissures
Plaque 1, 20 heures après compaction

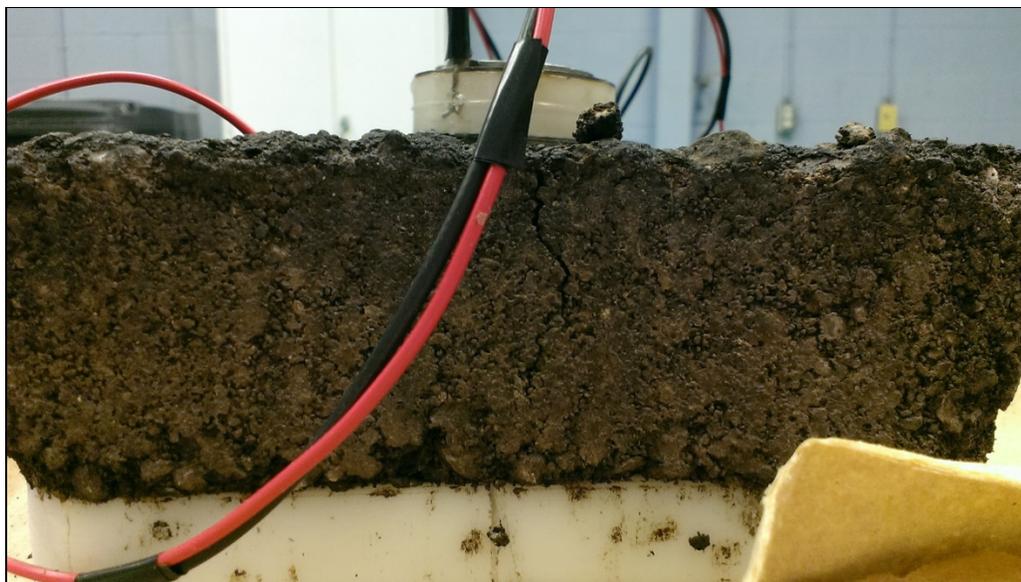


Figure 4.2 Fissure du côté des transducteur 51-45 mm. Plaque 1, 18 jours après compaction

4.2.2 Commentaires sur la plaque 2

Plus de précautions ont été prises lors de l'instrumentation de la seconde plaque et l'expérience acquise avec la plaque 1 a été mise à profit. Des fissures de surfaces ont été aperçues après deux jours. Cependant elles, sont moins importantes que celles observées sur la plaque 1. La figure 4.3 présente la fissure observée près du transducteur 51-45 mm supérieur. On observe que la fissure ne s'est pas propagée. Les remarques précédentes sont valables pour les deux autres transducteurs, à savoir très peu de fissures et une non propagation de celles-ci, tant dans le plan de la plaque qu'en profondeur.

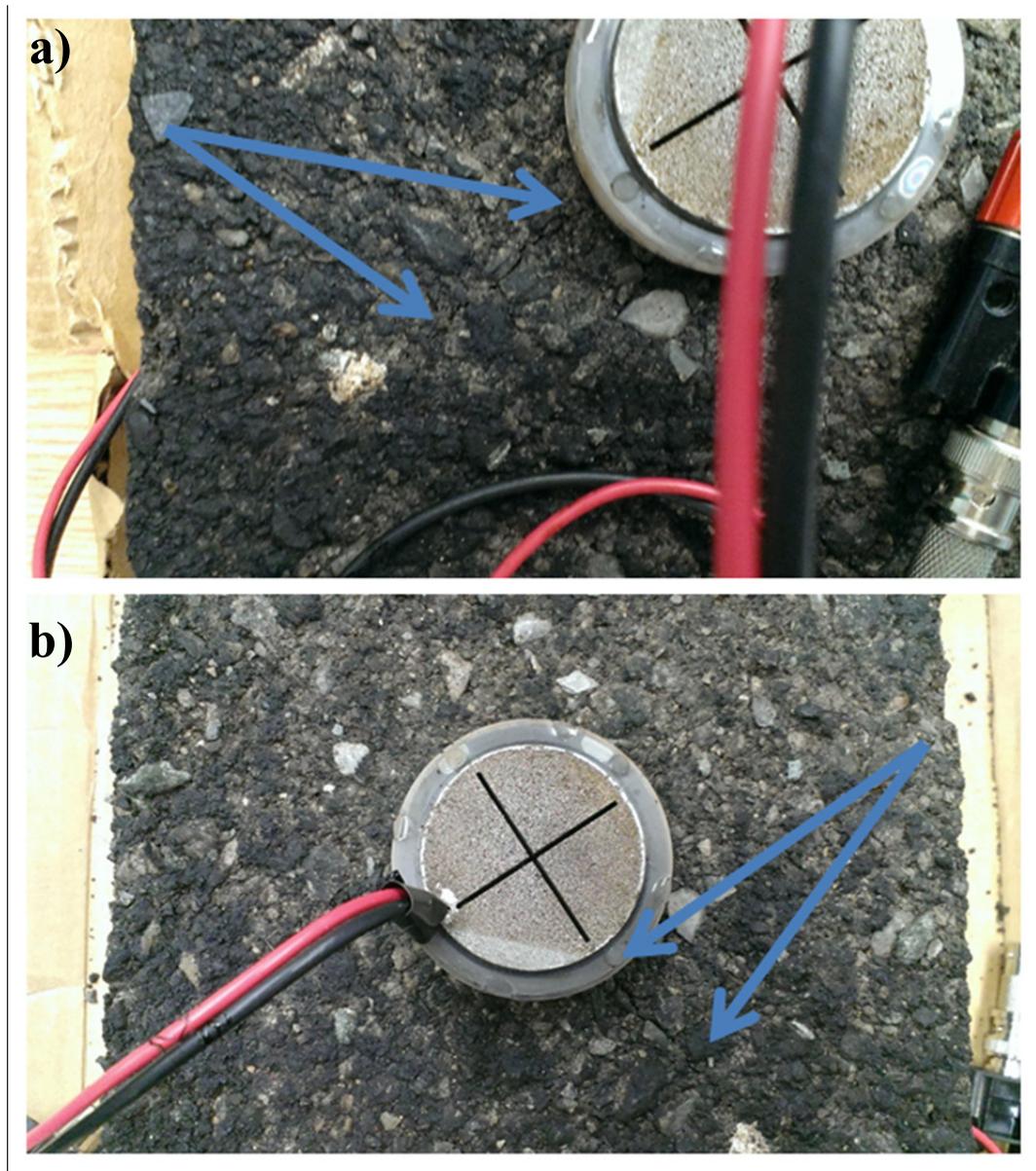


Figure 4.3 Fissure en surface de la plaque 2 près du transducteur 51-45 mm; a) 2 jours après compaction; b) 37 jours après compaction.
Les flèches bleues délimitent la fissure

Finalement, il apparaît que pour les deux plaques, le matériau en contact avec le mastic bitumineux va avoir tendance à se lier à celui-ci plutôt qu'au reste de la plaque. Il faut donc faire très attention lors des premières manipulations. Des masses ont été disposées sur les transducteurs supérieurs afin d'éviter qu'ils ne se décollent par inadvertance. En effet, pour le

transducteur 22-16 mm, la surface de contact est assez faible et la masse du transducteur n'est pas suffisante pour contrer le moment induit par les câbles.

Ceci a été supposé lors de l'analyse des premiers résultats et a été vérifié lorsque les expériences ont cessé et que les transducteurs ont été retirés. Les figures 4.4 à 4.7 présentent ce qui a été observé lorsque les transducteurs ont été séparés des plaques, aussi bien pour la partie supérieure qu'inférieure. On remarque qu'une quantité non négligeable de matières reste accrochée aux transducteurs. Il n'est pas exclu qu'une fissure se soit développer dans le matériau sous les transducteurs en réponse aux forces d'arrachement des transducteurs induites par le poids des câbles électriques. Cependant les observations n'ont pas montré de telles traces.

De plus, une différence de teinte entre le dessous et le dessus des plaques a été observée. La figure 4.8 présente cette différence pour la seconde plaque. Cette différence semble due au fait que la partie inférieure n'est pas autant exposée à l'air libre que la partie supérieure.



Figure 4.4 Transducteur supérieur 22-16 mm après avoir été séparé de la plaque 1



Figure 4.5 Transducteur inférieur 51-45 mm après avoir été séparé de la plaque 1



Figure 4.6 Transducteur inférieur 38-34 mm ainsi que son entretoise (pièce marron) après avoir été séparés de la plaque 2



Figure 4.7 Dessous de la plaque 2. On remarque les 3 emplacements des portes transducteurs, là où de la matière manque



Figure 4.8 De gauche à droite, dessous et dessus de la plaque 2
45 jours après compaction

4.3 Analyse des résultats

Comme présenté dans les chapitres 2 et 3, l'analyse se décompose en plusieurs parties. Tout d'abord une étude de l'évolution de la masse d'eau dans les plaques est effectuée. Puis la mesure de V_s au sein des plaques est réalisée. Finalement une analyse des autres paramètres mesurés tel que la température et l'amplitude des signaux est effectuée.

4.3.1 Mesure de la masse d'eau

L'échantillon étant pesée avant chaque batterie de test, l'évolution de la masse d'eau dans l'échantillon a pu être déterminée. A la fin de la période de mesure, la masse de chaque élément a été obtenue. De plus les plaques d'enrobés ont été placées dans un four à 110°C pendant 26 heures afin d'éliminer le reste d'eau et de déterminer ainsi la masse de matière sèche.

La figure 4.9 présente les courbes d'évolution de la masse d'eau au sein des plaques en fonction du temps.

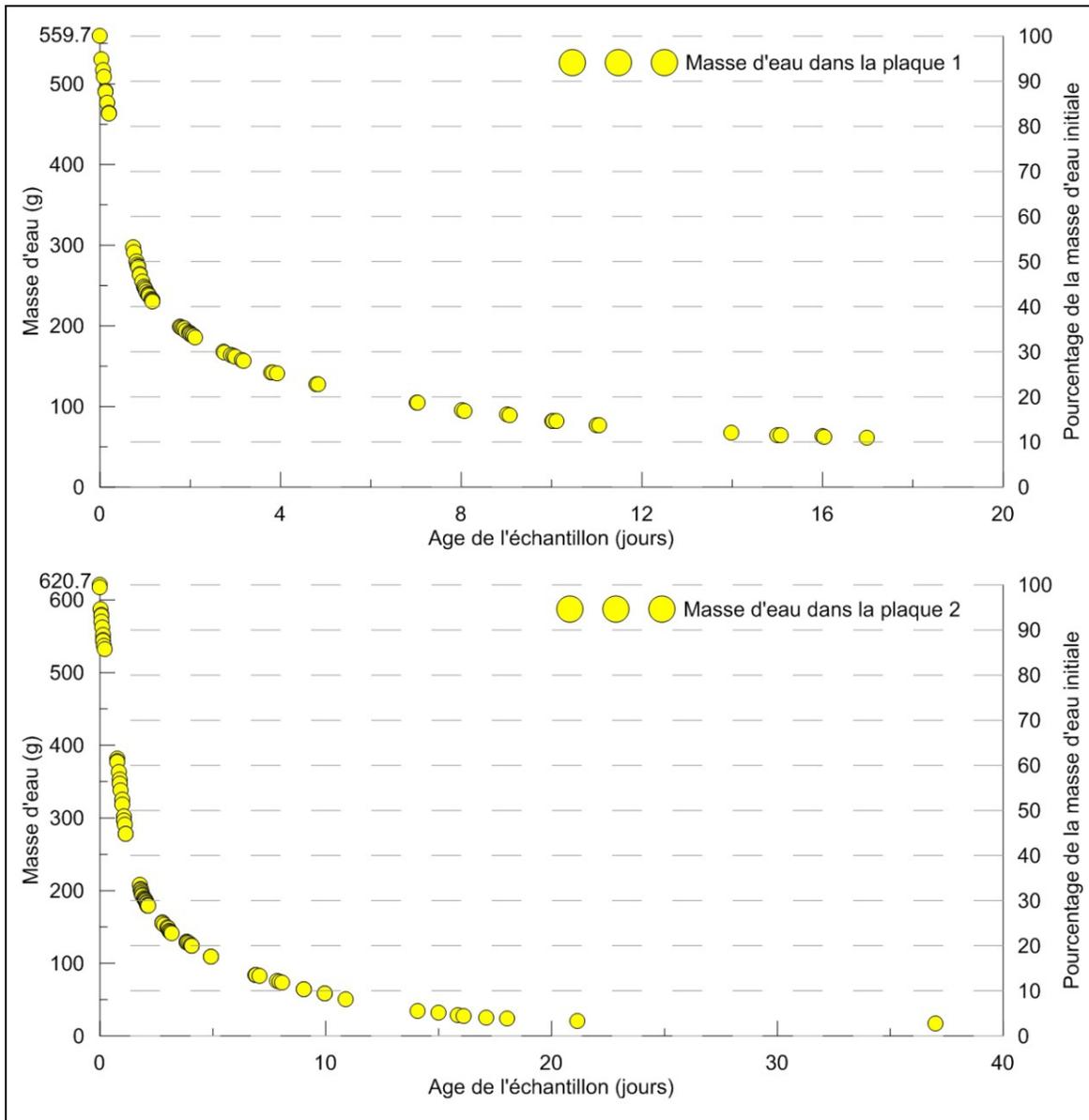


Figure 4.9 Évolution de la masse d'eau au sein des plaques d'enrobés

Les courbes présentent une pente élevée (en valeur absolue) lors des premières heures.

Le tableau 4.1 présente le temps après lequel quelques valeurs significatives de perte d'eau ont été atteintes.

Tableau 4.1 Évolution des pertes d'eau dans les plaques

Perte d'eau	10%	25%	50%	75%
Plaque 1	2,1 heures	6 heures	19 heures	4 jours
Plaque 2	1,2 heure	10,5 heures	1 jour	2,78 jours

Pour la première plaque, 25% de la masse d'eau a disparu en 6 heures après la première mesure et 50% de la masse en 19 heures. La seconde plaque voit sa masse d'eau réduite de 25% en 10,5 heures et de 50% après 24 heures. Il y a donc une perte rapide de l'eau au sein des plaques, la moitié étant perdue en approximativement une journée.

Les pourcentages massiques d'eau en début et en fin d'expérience sont : 6,29 % et 0,68% pour la première plaque; 6,98% et 0,20% pour la seconde.

On rappelle qu'initialement le mélange comporte 6% d'eau totale, en volume massique. Cependant lors de la compaction il y a à la fois une perte de matière (granulat et bitume) ainsi qu'une perte d'eau. En effet, lors de la réalisation des plaques, c'est un pneu qui compacte et la plaque qui monte. Lorsqu'on compacte les parties extérieures de la plaque, un peu de matière peut sortir du moule.

De plus, pour la première plaque, la première pesée a été effectuée 1h après la fin de la compaction de la plaque, qui elle-même intervient 3h30 après le mélange des composants pour les raisons expliquées dans la partie 2.2.2. Enfin, le GBR utilisé n'a pas été séché avant de faire le mélange.

Les prises de mesures de la masse et la réalisation des essais n'étant pas réalisées en même temps et pouvant être séparées de plusieurs dizaines de minutes, c'est une valeur approchée de la masse d'eau qui sera utilisée plus tard. Ces valeurs ont été obtenues par régression des courbes originales présentées dans la figure 4.9. Les courbes approchées et leurs équations sont présentées en Annexe 1. Une continuité des courbes a été recherchée, autant qu'une

égalité des valeurs. La courbe de masse d'eau de la plaque 1 a été découpée en trois parties. La courbe de la seconde plaque a elle été découpée en six parties.

Tableau 4.2 Évolution de la pente de la courbe de masse d'eau pour la plaque 1

% de perte par rapport à la pente initiale	5	10	20	30	40	50
Nombre de jours	0,05	0,1	0,21	0,345	0,475	0,61
% de perte par rapport à la pente initiale	60	75	90	95	97,5	99
Nombre de jours	0,75	1,01	1,45	2,75	4,6	10,4

Tableau 4.3 Évolution de la pente de la courbe de masse d'eau pour la plaque 2

% de perte par rapport à la pente initiale	5	10	20	30	40	50
Nombre de jours	0,05	0,11	0,22	0,31	0,43	0,75
% de perte par rapport à la pente initiale	60	75	90	95	97,5	99
Nombre de jours	0,973	1,27	2,3	3,13	6,1	13,1

Les résultats concentrés dans les tableaux 4.2 et 4.3 permettent de voir qu'il est important, pour obtenir une courbe exploitable et la plus juste possible, de faire des mesures fréquemment lors des trois premiers jours. En effet, c'est dans les 3 premiers jours que la pente des courbes varie le plus.

4.3.2 Mesure de la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement

Plaque 1 :

Pour la première plaque, comme indiqué dans la partie 4.2, la mise en place des transducteurs 51-45 mm a générée localement une fissure profonde. Ainsi, seules les vitesses obtenues les 5 premières heures et celles obtenues vers la fin des essais sont cohérentes avec les valeurs obtenues pour les autres transducteurs.

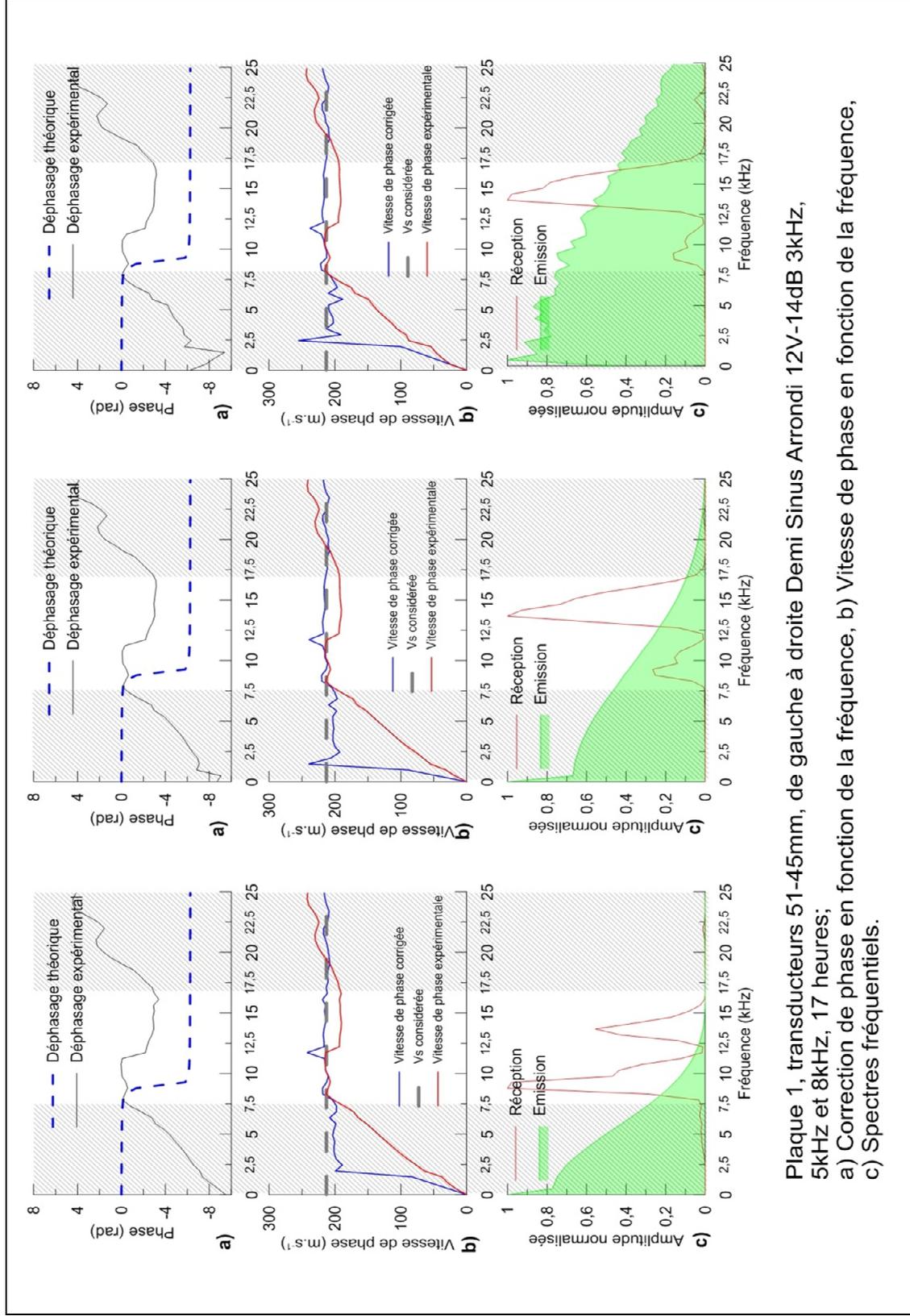
En effet, après une dizaine d'heures on observe la présence de deux pics de résonance dans le spectre fréquentiel du signal reçu. Dans un premier temps, cela rend l'utilisation de la méthode temporelle impossible, car celle-ci est basée sur le fait que le système ne doit résonner qu'à une fréquence. Dans un deuxième temps, la présence de ces deux pics de résonance fait que le programme d'analyse fréquentielle donne deux asymptotes dans la courbe de vitesse de phase, ce qui correspondrait à deux vitesses possibles. Cependant, la vitesse de propagation de l'onde étant liée à la rigidité, étant elle-même intrinsèque au matériau, il ne peut en avoir qu'une. De plus, les asymptotes donnent des valeurs de V_s beaucoup plus faibles que ce à quoi on pourrait s'attendre. La figure 4.10 illustre ce problème et notamment la prédominance de l'un ou l'autre des pics de résonance en fonction de la fréquence d'émission. Cela est logique du fait même de la nature du phénomène de résonance et par le fait qu'en augmentant la fréquence du signal émis, on déplace la plage de fréquence dans laquelle l'énergie est présente.

Dans le cas des tests réalisés lors des premières heures le second pic apparaît, mais seulement lorsqu'on augmente la fréquence. Ainsi, à l'opposé du cas exposé dans la figure 4.10,

l'utilisation d'un demi sinus arrondi (DSA) de 3 kHz lorsque la plaque était encore fraîche, ne faisait apparaître qu'un seul pic de résonance ce qui permet de réaliser correctement l'analyse. Il en est de même pour les derniers tests réalisés.

La présence des deux pics peut être vraisemblablement expliquée par la fissure. La fréquence de résonance d'un corps est liée à sa composition mais également à sa géométrie. Ainsi, la fissure a dû créer deux corps au niveau des transducteurs 51-45 mm qui résonnent à des fréquences différentes.

On peut supposer que les résultats sont exploitables en jeune âge malgré la présence d'une fissure verticale car le matériau n'a de toute façon pas une grande cohésion à ce moment. De plus dépendamment de là où se situe la fissure et vu la taille du transducteur 51-45 mm il se peut que les ondes traversent suffisamment de matières pour que le signal reçu soit exploitable. Les résultats des transducteurs 51-45 mm pour la plaque 1 ne seront cependant pas pris en compte, par soucis de rigueur.



Plaque 1, transducteurs 51-45mm, de gauche à droite Demi Sinus Arrondi 12V-14dB 3kHz, 5kHz et 8kHz, 17 heures;
 a) Correction de phase en fonction de la fréquence, b) Vitesse de phase en fonction de la fréquence, c) Spectres fréquentiels.

Figure 4.10 Plaque 1, transducteurs 51-45 mm. Présence de 2 pics de résonance

Les transducteurs 22-16 mm ont montrés un comportement assez remarquable dans le cas de l'étude de la plaque 1. En effet dès lors qu'un signal de type demi sinus arrondi (DSA) était utilisé, on obtenait des valeurs de V_s plus faibles que pour les 4 autres types de signaux. La chose remarquable est que si on compare la courbe obtenue par l'analyse des signaux DSA et celle avec les autres signaux, on obtient la même allure. Il faut noter de plus que l'analyse temporelle donnait également des valeurs plus faibles de vitesses pour les DSA. Aucune explication n'existe pour l'instant. Les valeurs obtenues pour ce couple de transducteur sont cependant conservées, avec une réserve pour ceux issus des DSA. En effet, l'étude des quatre autres types de signaux donne des résultats semblables entre eux et différents de ceux trouvés pour les DSA, à quelques $m.s^{-1}$ près.

L'analyse des signaux des transducteurs 38-34 mm n'a montré aucune difficulté. On peut cependant noter que le contact devait être moins bon que dans les tests de la partie 3.6.2 car la plage de fréquence était moins large, mais les signaux étaient tout de même facilement exploitables.

Plaque 2 :

Le transducteur supérieur 22-16 mm a été mal placé au départ et ne souhaitant pas reproduire ce qui s'était passé pour la plaque une, à savoir un décohésionnement local de la matière, il a été choisi d'attendre le matin du 2^{ème} jour pour le remettre en place. Malgré l'alignement retrouvé, le signal reçu était très faible et de grosses répliques étaient présentes dans le signal. De plus, l'analyse des signaux donne des résultats très disparates autant dans leurs valeurs que dans la qualité du spectre fréquentiel. En effet pour certains signaux, plus de quatre pics de résonances étaient présents. Cela peut être dû au fait que les multiples décollements du transducteur ont créé localement un système multi couche dans la plaque. Les résultats présentés pour ce couple de transducteurs ne sont donc pas utilisables et, rappelons-le, le but de cette étude est d'observer le comportement des ERF en très jeune âge et deux jours après la compaction, les valeurs de V_s commencent à se stabiliser. Le couple 38-34 mm n'a pas montré plus de difficulté que pour la plaque précédente.

Le couple 51-45 mm montre encore des traces d'un 2^{ème} pic de résonance, cependant celui-ci gêne moins, notamment lors de la première approche avec la méthode temporelle. De plus on note une cohérence dans l'évolution des résultats. Ceux-ci sont donc conservés pour la suite.

Il est important de rappeler au lecteur que la mesure de la hauteur de la plaque s'effectue après la fin des expériences. Cependant l'analyse des signaux a commencé dès le début des expériences. Ainsi, pour garder une certaine cohérence et pour pouvoir attester de l'évolution, ou non, des résultats, il a été décidé que le programme d'analyse fréquentielle serait réglé pour une hauteur de 48 mm (sauf pour le 51-45 mm de la plaque 1 qui a été analysé après coup et donc avec sa vraie hauteur). Les graphes de ce chapitre qui traitent directement de l'analyse des résultats donneront des vitesses V_s basées sur une hauteur de 48 mm et donc plus faible que les vraies valeurs. Les graphes qui montrent des résultats finaux sont quant à eux basées sur les hauteurs réelles mesurées. Les vitesses réelles sont trouvées à l'aide d'un simple produit en croix. De plus, il a été considéré que le mastic bitumineux ayant une faible épaisseur et les ondes se déplaçant rapidement dedans (2000 m.s^{-1}), le temps de vol de l'onde serait très peu influencé par le mastic. Une épaisseur totale de 2 mm a été retirée dans le calcul. Le tableau 4.4 rassemble les hauteurs réelles mesurées au niveau de chaque couple de transducteur.

Tableau 4.4 Hauteur réelle de la plaque au niveau des transducteurs

	Plaque 1			Plaque 2		
Transducteurs	22-16	38-34	51-45	22-16	38-34	51-45
Hauteur de calcul (mm)	48	48	55	48	48	48
Hauteur réelle (mm)	49,42	48,51	55	52,05	51,435	52,78

Les figures 4.11, 4.12 et 4.13 suivantes présentent quelques cas d'analyses pour les trois couples de transducteurs.

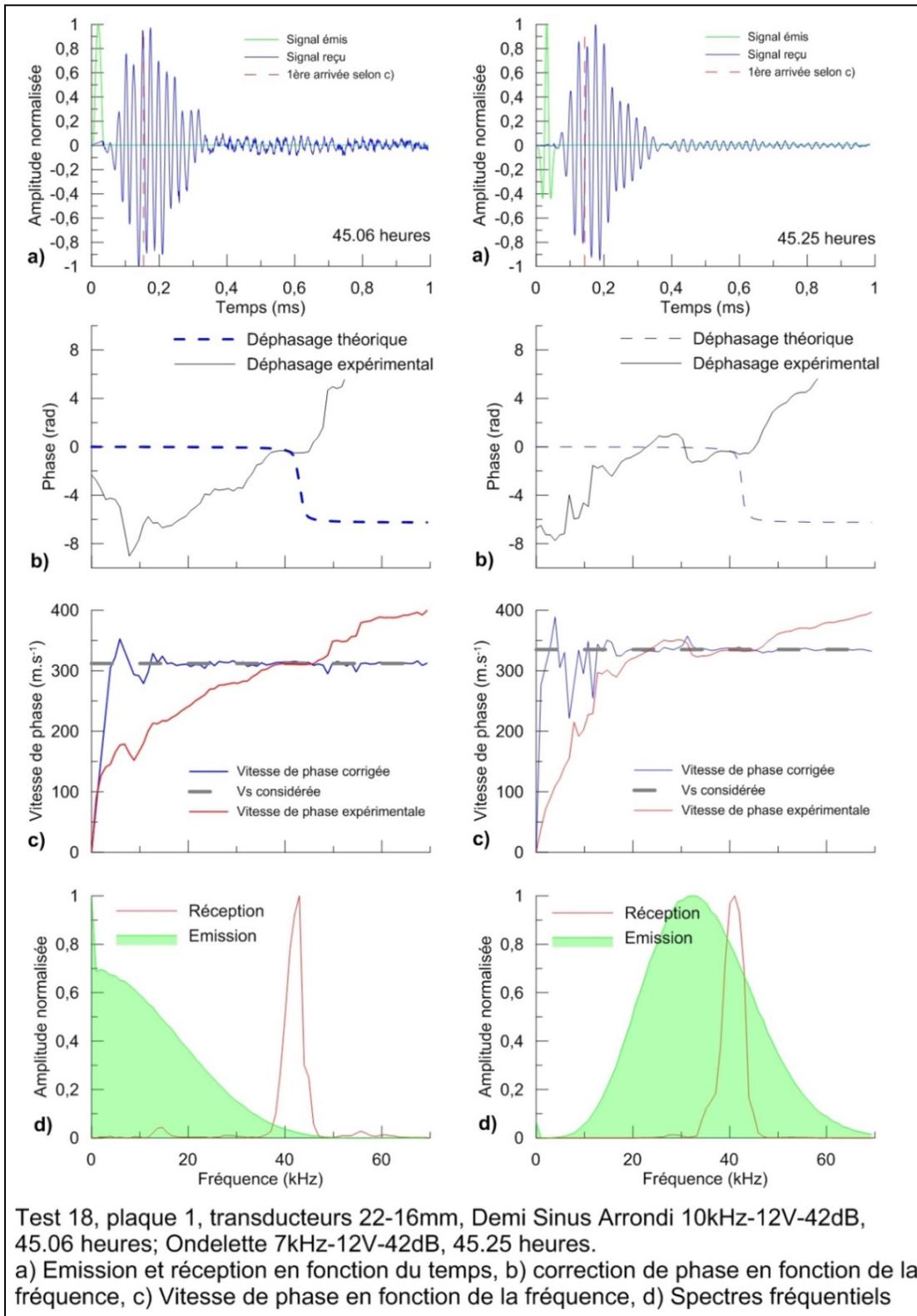


Figure 4.11 Test plaque 1, transducteurs 22-16 mm

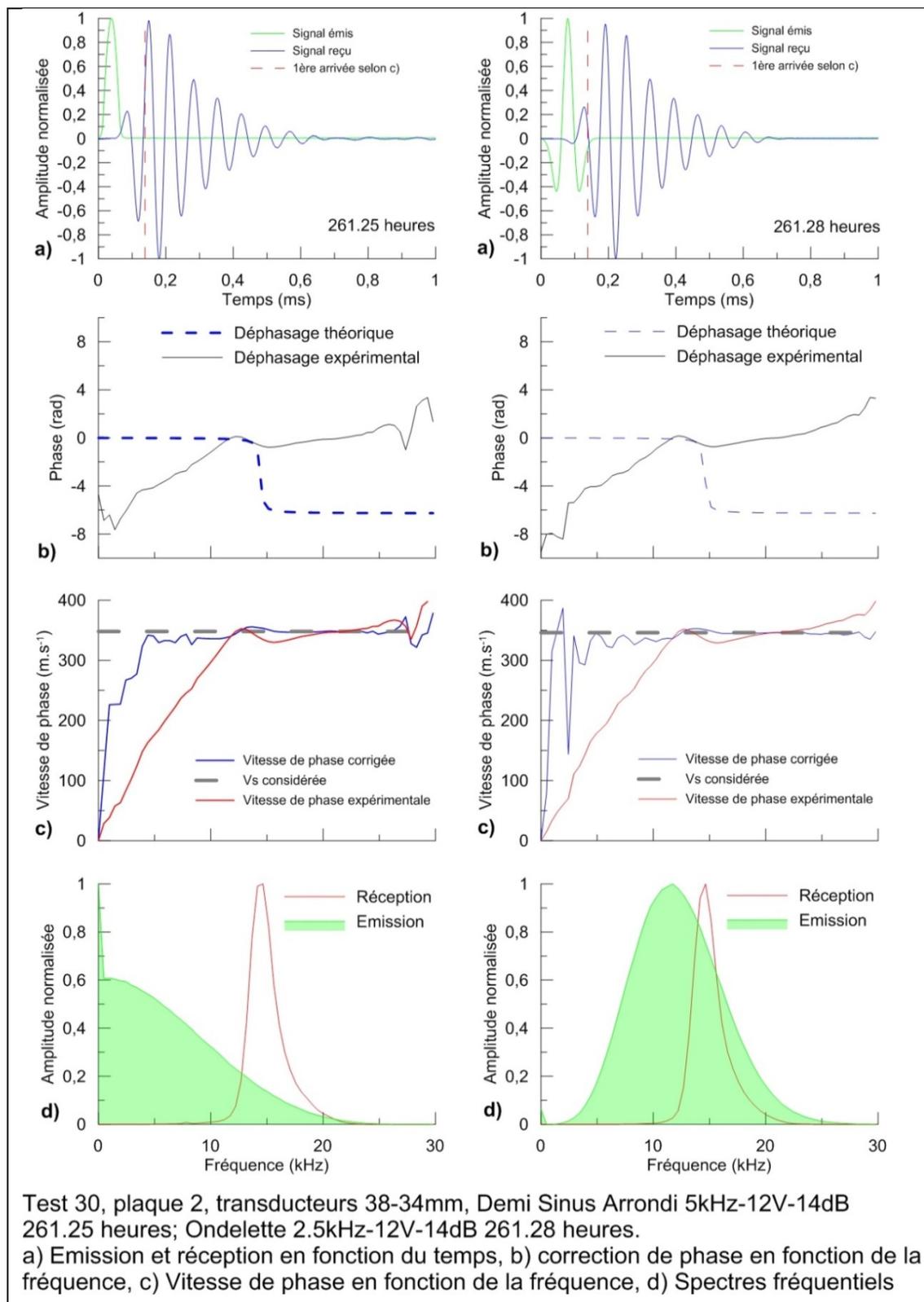
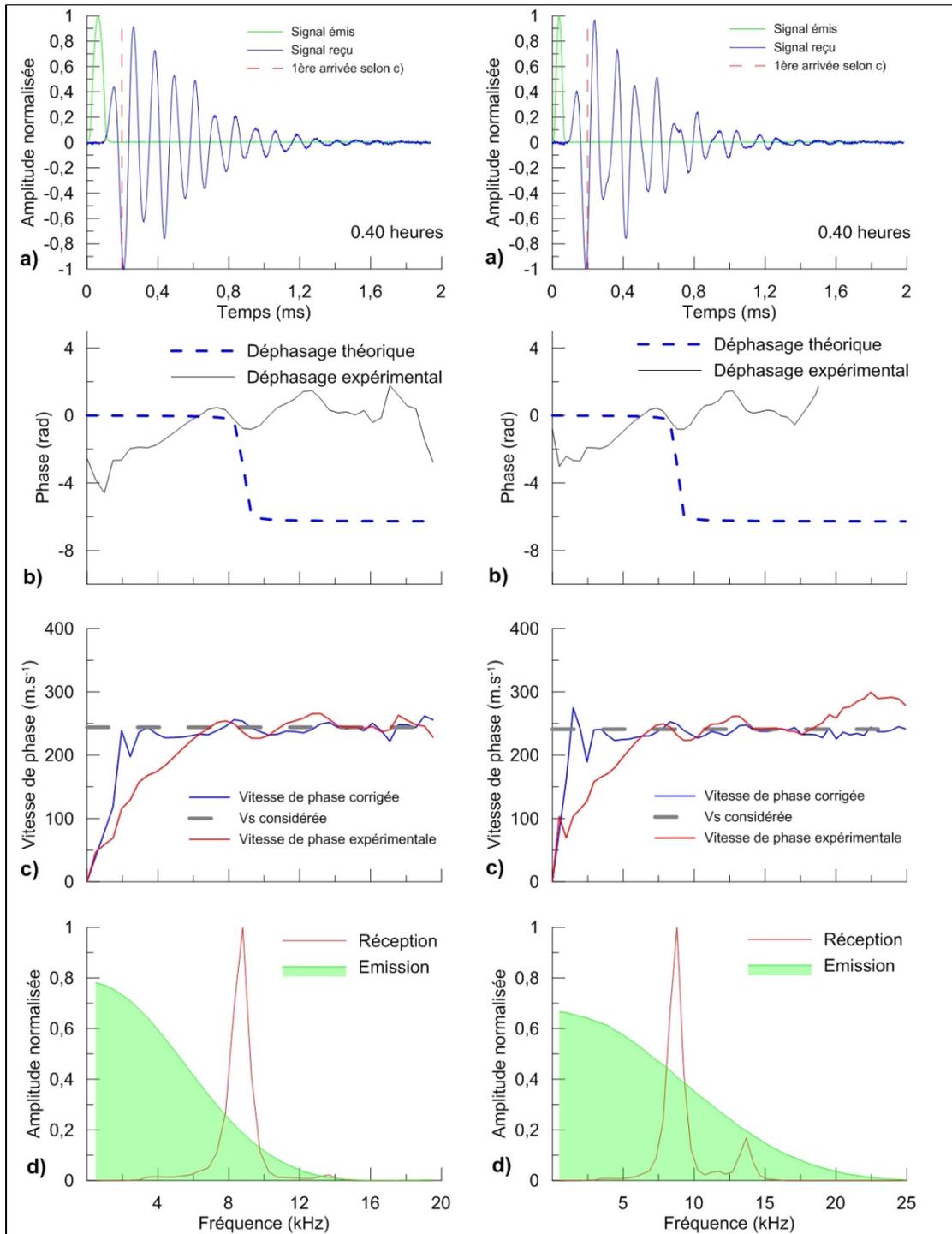


Figure 4.12 Test plaque 2, transducteurs 38-34 mm



Test 1 , plaque 2, transducteurs 51-45mm, Demi Sinus Arrondi 3kHz-12V-14dB, 0.40 heures; Demi Sinus Arrondi 5kHz-12V-14dB, 0.40 heures.
 a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure 4.13 Test plaque 2, transducteurs 51-45 mm

Tout comme la masse d'eau dans l'échantillon qui diminue rapidement avec le temps, la vitesse de l'onde de cisaillement augmente rapidement avec le temps. La figure 4.14 présente cette évolution de la vitesse pour un signal demi sinus arrondi de 5kHz pour le couple de transducteurs 38-34 mm de la plaque 2. Les signaux ont été normalisés. Cette figure prend place dans le domaine temporel et montre une diminution rapide du temps d'arrivée de l'onde, calculé en connaissant V_s et la taille de l'échantillon. En effet, le temps de réception passe de 0.196 ms à 0.135 ms en 37 jours, et de 0.196 ms à 0.170 ms en 200 min. On remarque que les différentes courbes présentent un point d'arrivée estimé, calculé à partir de V_s mesurée, qui se situe toujours au même endroit. Dans le cas du signal de la figure 4.14, le point d'arrivée est situé avant le 3^{ème} pic.

Les figures 4.15 et 4.16 présentent l'évolution de V_s en fonction du temps (graphe a)) et de la masse d'eau dans la plaque (graphe b)), respectivement pour les plaques 1 et 2. Les résultats des trois couples de transducteurs sont présentés.

Dans les graphes a), la courbe de l'évolution de la masse d'eau au sein de la plaque en fonction du temps a été ajoutée afin de montrer la similarité entre l'allure de cette courbe et celles de V_s en fonction du temps. On remarque en effet que l'allure des courbes de V_s peut s'apparenter à un logarithme finissant par une asymptote. Cette allure est la symétrique horizontale de la courbe de l'évolution de la masse d'eau. D'une plaque à l'autre, cette symétrie est présente.

Comme expliquée précédemment l'utilisation de DSA pour les transducteurs 22-16 mm de la plaque 1 donnent des valeurs de V_s plus basses. Cela se voit sur la courbe en carré rouge de la figure 4.15 a). Les carrés rouges pleins de la figure 4.15 a) correspondent aux résultats des autres signaux. La dispersion des valeurs pour les transducteurs 22-16 mm de la plaque 2 est visible sur le graphe a) de la figure 4.16.

Cela mis à part, on remarque que pour les autres couples de transducteurs, l'allure des courbes est sensiblement la même, la seule différence réside au niveau des valeurs.

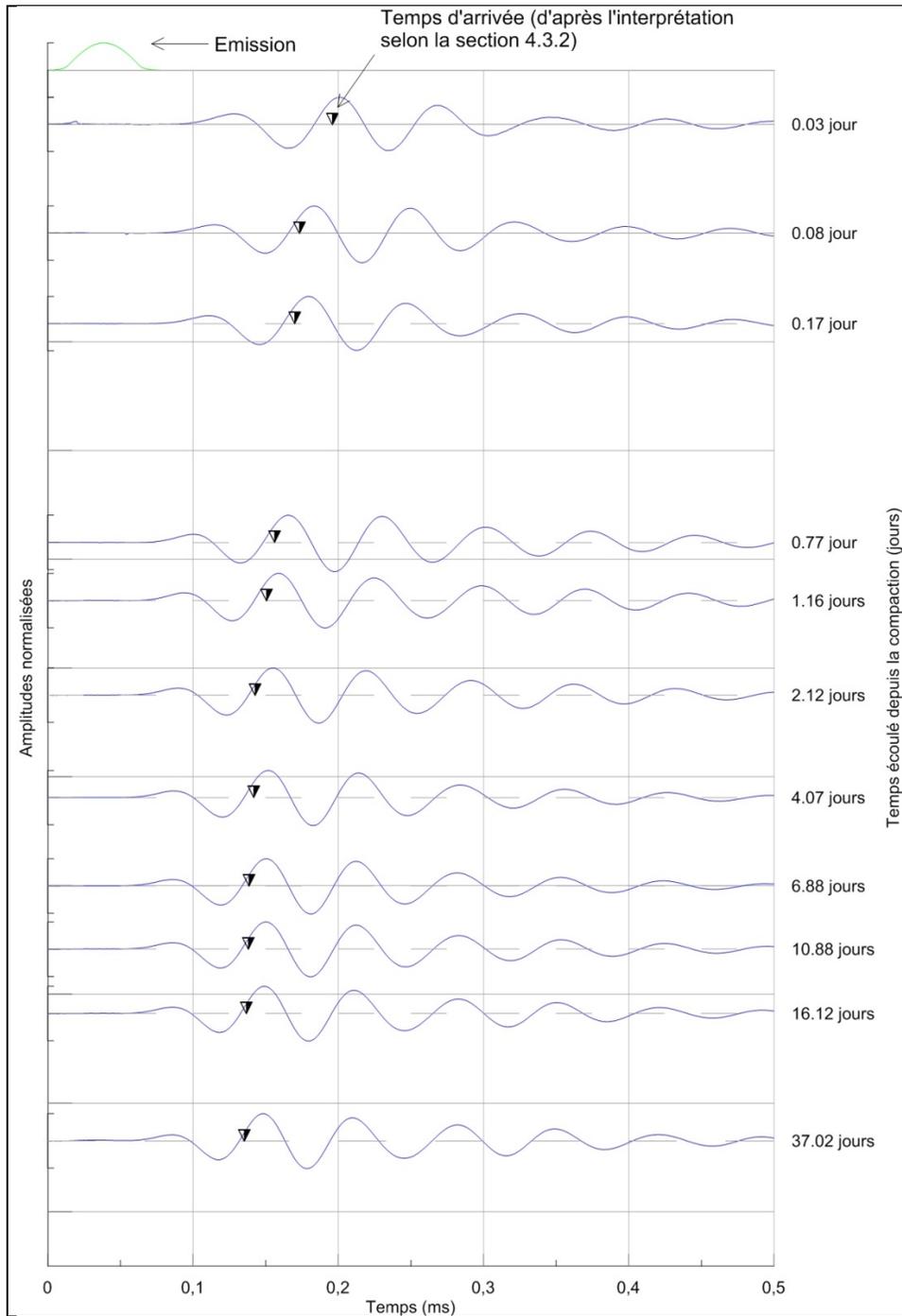


Figure 4.14 Signaux temporels reçus pour un signal émis demi sinus arrondi-5kHz-12V-14dB

Cette différence de valeurs réside dans le fait que la méthode est assez visuelle et que d'un jour à l'autre pour un même signal on peut obtenir une différence de 1 ou 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette

différence est donc due à l'utilisateur et ne représente moins d'un pourcent d'erreur. Cependant, la qualité des signaux pèse aussi dans la balance. En effet, si le signal traité ne présente pas d'asymptote clairement définie, il est plus difficile d'arrêter son jugement sur une valeur précise. De plus la hauteur de l'échantillon est calculée et non pas mesurée directement, des erreurs peuvent se glisser. En effet, ne connaissant pas précisément la hauteur de bitume qui a été placée aux interfaces des transducteurs et de la plaque à cause tout d'abord de la rapidité nécessaire à la mise en place des transducteurs (il ne faut pas que le mastic bitumineux durcisse avant que le transducteur ne soit en place) et de par la surface irrégulière de la plaque, la hauteur calculée de la plaque peut être différente de la réalité de l'ordre de quelques pourcents. Ainsi, 1 mm de différence dans la hauteur de la plaque peut faire varier la vitesse de 2%. Le tableau 4.5 présente quelques valeurs obtenues à un même temps et pour des couples de transducteurs différents.

Tableau 4.5 Comparaison des valeurs obtenues

Transducteurs	Plaque 1			Plaque 2			Écart max
	22-16	38-34	51-45	22-16	38-34	51-45	
Valeur pour 4 heures ($m.s^{-1}$)	300	287	321	X	300	296	10%
Valeur pour 45 heures ($m.s^{-1}$)	340	336	X	X	350	340	4%
Valeur pour 11 jours ($m.s^{-1}$)	369	357	378	X	372	363	5,5%
Valeur pour 14 jours ($m.s^{-1}$)	370	360	378	X	370	365	4,7%

L'écart maximum est calculé, pour un temps donné, entre la valeur maximale et minimale, peu importe la taille du transducteur. Les données des transducteurs 51-45 mm de la plaque 1 ont été conservées pour ce comparatif, malgré la présence de la fissure. Au global l'écart

entre les différents couples de transducteurs n'est pas très élevé, d'autant plus si on prend en compte que la mesure de la hauteur apporte une marge d'erreur.

Les graphes b) des figures 4.15 et 4.16 présentent la mise en relation de V_s avec la masse d'eau au sein des plaques. On remarque tout d'abord, pour les trois couples de transducteurs de la plaque 1 et les transducteurs 38-34 mm et 51-45 mm pour la seconde plaque que les courbes obtenues sont associables à des droites. Les régressions linéaires effectuées donnent des coefficients de corrélations allant de 0,95 à 0,98 pour les couples de transducteurs 38-34 mm et 51-45 mm. Le couple de transducteurs 22-16 mm de la plaque 1 présente un coefficient de corrélation de 0,86, en raison des valeurs des signaux DSA. Cependant, si on met les signaux DSA de côté, on obtient un coefficient de corrélation de 0.94. De plus, les signaux DSA seuls pour le couple de transducteur 22-16 mm de la plaque 1 donnent un coefficient de corrélation de 0.95, mais la valeur absolue de la pente est plus faible. Les équations sont disponibles dans la légende des graphes b).

On remarque cependant, pour tous les couples de transducteurs, que les courbes présentent un décrochage lors du jeune âge de la plaque, lorsque la quantité d'eau est encore élevée. Cela se voit dans les graphes b) des figures 4.15 et 4.16, dans les ronds bleus. Ce phénomène peut être dû à l'absence de cohésion au sein de la plaque en très jeune âge ou par le début de la prise de l'enrobé, en faisant une analogie avec les bétons. D'autres informations concernant cet endroit de la courbe sont développées dans le chapitre 5, avec la figure 5.1.

Le fait que la tendance des courbes soit des droites montrent un lien de proportionnalité entre V_s et la masse d'eau dans la plaque. De plus on peut facilement lier la montée en cohésion et donc la rigidité de l'EB avec la disparition de l'eau au sein de cet EB. Ainsi cette proportionnalité est justifiée, car la vitesse de propagation des ondes est proportionnelle elle aussi à la rigidité du matériau.

Les figures 4.15 et 4.16 utilisent les valeurs de V_s obtenues avec les vraies hauteurs des plaques.

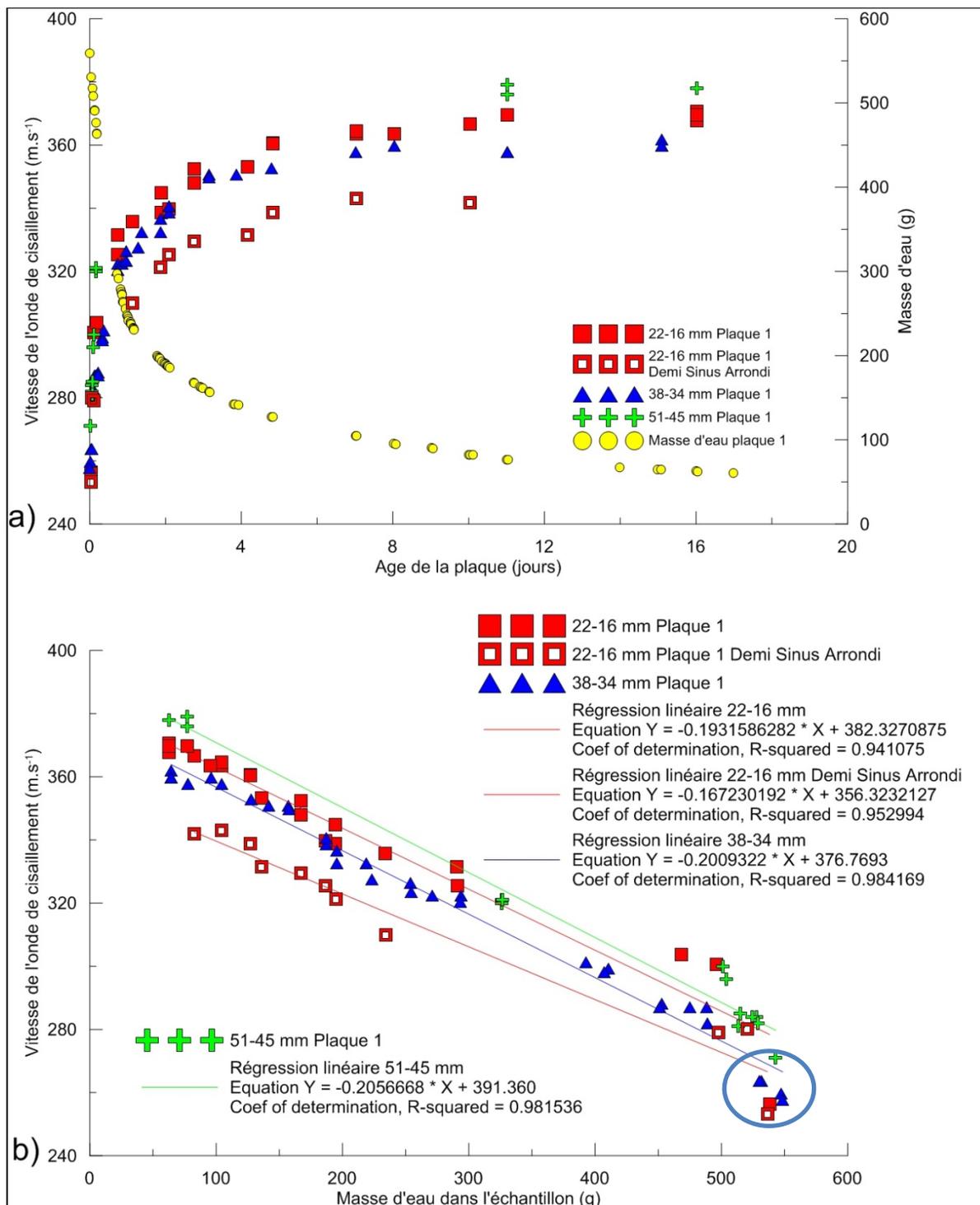


Figure 4.15 Résultats de l'analyse fréquentielle pour la plaque 1.

a) Évolution de V_s en fonction du temps; b) Évolution de V_s en fonction de la masse d'eau dans la plaque

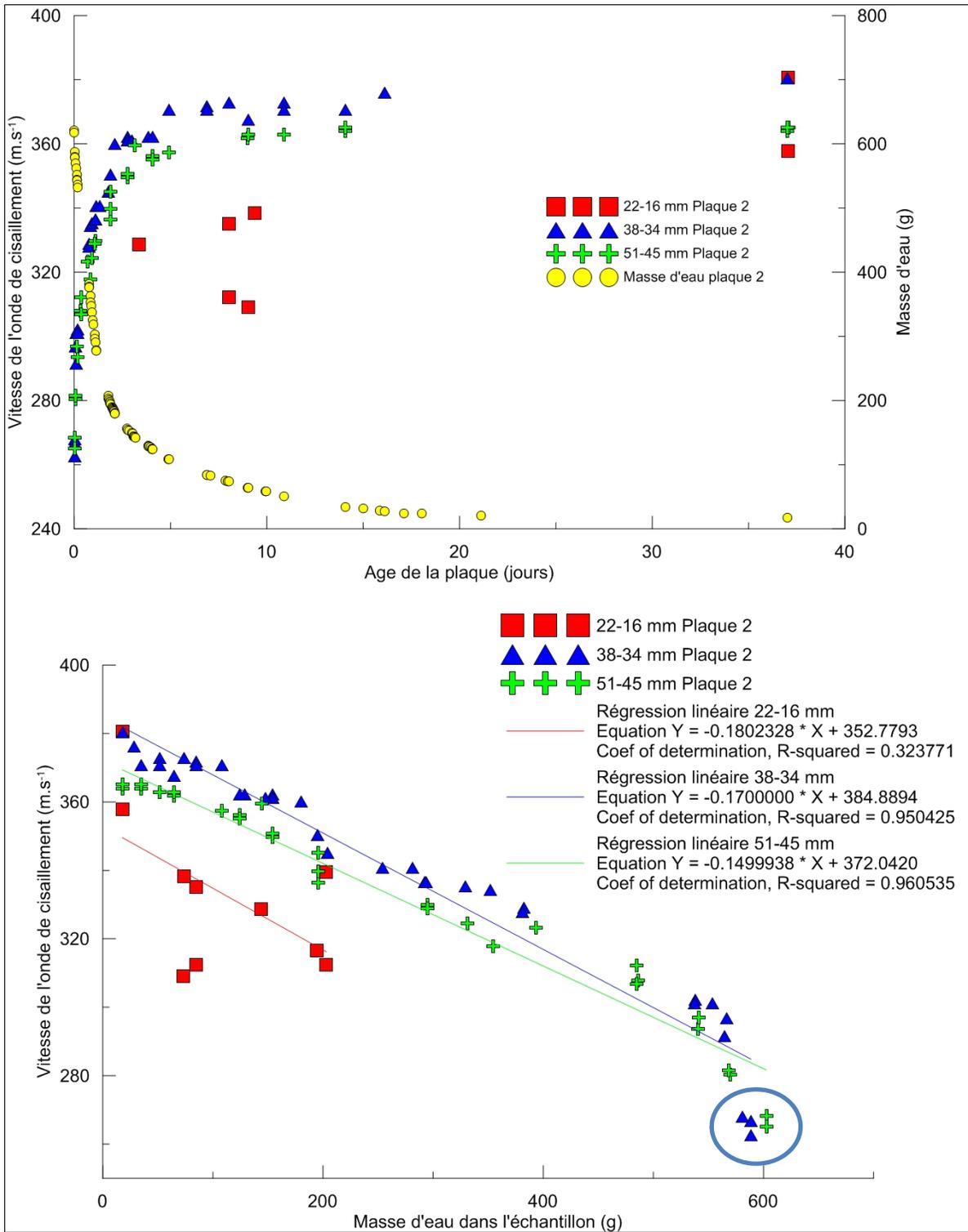


Figure 4.16 Résultats de l'analyse fréquentielle pour la plaque 2.
 a) Évolution de V_s en fonction du temps; b) Évolution de V_s en fonction de la masse d'eau dans la plaque

4.3.3 Mesure de la température, de l'amplitude et de la fréquence de résonance

La température a été mesurée en surface après chaque pesée de la plaque grâce à un thermocouple. Pour la première plaque, deux températures différentes ont été relevées, en surface et dans une des fissures près du transducteur 51-45 mm. Pour la seconde plaque, la température a été relevée près de chaque transducteur. Par la suite, d'autres outils de mesures de la température ont été utilisés, notamment un thermomètre à contact et un thermomètre sans contact.

La figure 4.17 présente ces mesures. On observe que, pour les deux plaques, la température est plus basse lors des premières heures et augmente jusqu'à atteindre une asymptote qui correspond à la température de la pièce. Il convient de rappeler que tous les composants ont été pris à température de la pièce et que le mélange de ceux-ci a été réalisé dans cette même pièce.

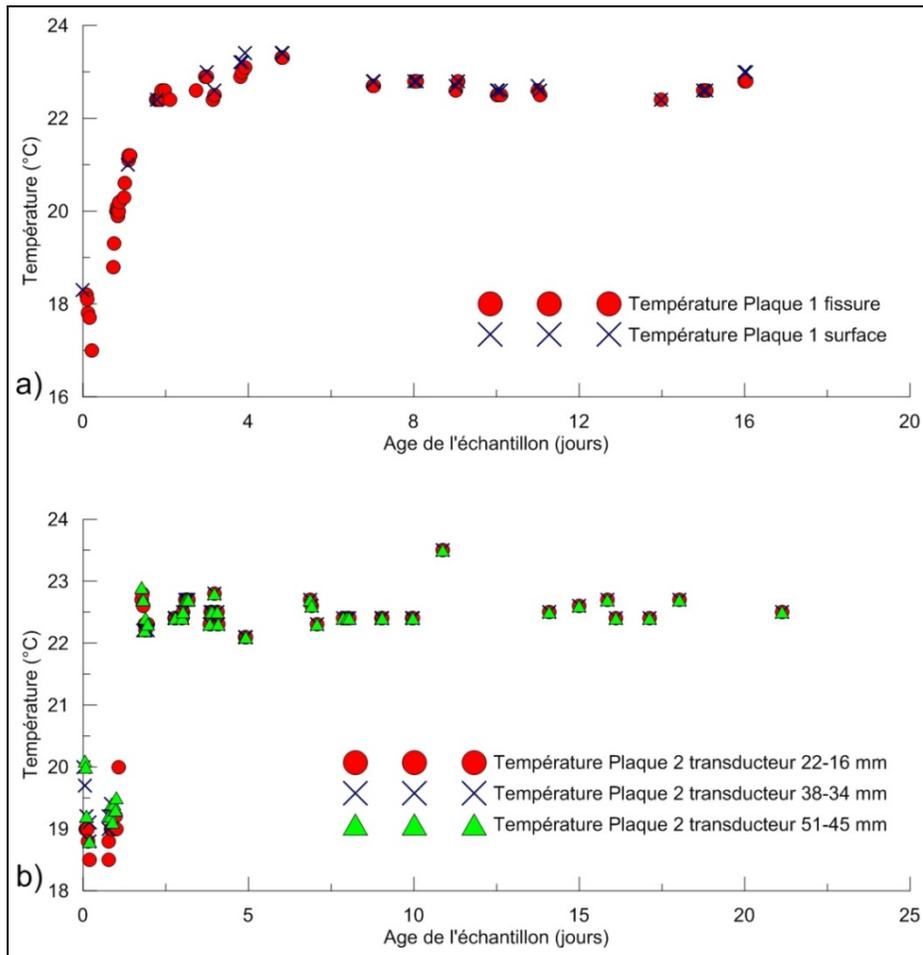


Figure 4.17 Évolution de la température en surface des plaques en fonction du temps, a) Plaque 1; b) Plaque 2

La faible valeur de température au début de l'expérience peut être expliquée par l'évaporation de l'eau. En effet l'eau possède une capacité thermique élevée et va absorber les calories environnantes afin de changer d'état, abaissant la température aux alentours. De ce fait, la température au début de l'expérience est faible car il y a encore une grande quantité d'eau. Avec le temps, l'eau disparaît de l'échantillon et il y a donc moins de calories qui sont absorbées par l'eau, la température peut donc augmenter. Dès lors qu'il n'y a plus de variations de la quantité d'eau au sein de l'échantillon, la température de l'échantillon se stabilise à la température de la pièce. De plus on observe un pic dans la courbe de la plaque 1 vers quatre jours après la compaction. Cela pourrait correspondre à la chaleur dégagée par la prise du ciment.

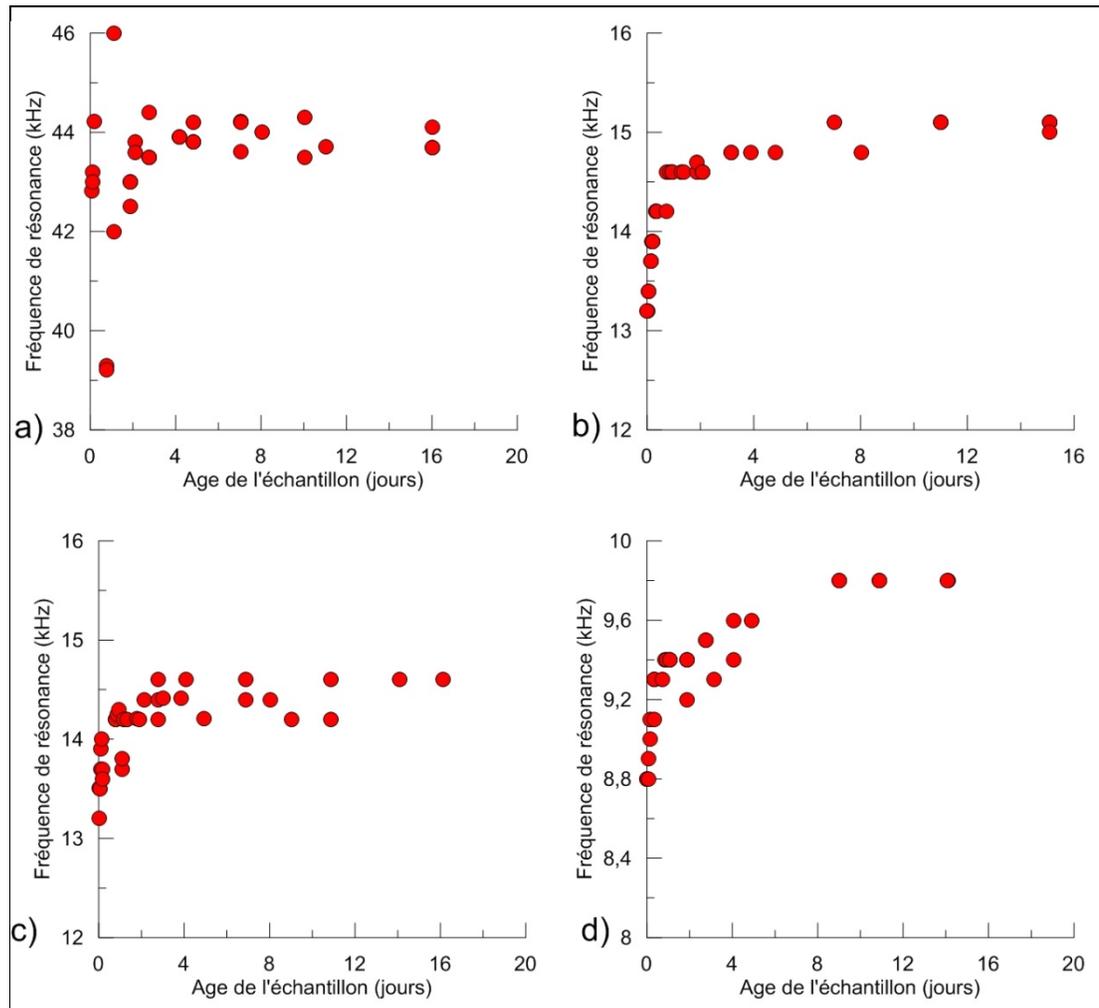


Figure 4.18 Évolution de la fréquence de résonance en fonction du temps
 a) Plaque 1 transducteurs 22-16 mm; b) Plaque 1 transducteurs 38-34 mm;
 c) Plaque 2 transducteurs 38-34 mm; d) Plaque 2 transducteurs 51-45 mm

La fréquence de résonance utilisée dans l'étude évolue en fonction du temps, comme le montre la figure 4.18. Normalement, on doit se fixer aux valeurs que l'on a déterminées au préalable lors des essais de la partie 3.4. Ces essais donnaient des renseignements concernant la fréquence de résonance des couples de transducteurs. Cependant lors des tests sur les plaques, le spectre fréquentiel montre que le pic de résonance se décale vers des fréquences plus élevées à mesure que la plaque vieillit. Ainsi lors de l'analyse des signaux, c'est la fréquence de résonance donnée par le spectre fréquentiel qui a été utilisée.

On remarque que globalement, la fréquence de résonance évolue de la même façon que V_s en fonction du temps. Cette évolution peut être liée au fait que, d'un côté le bitume qui sert à améliorer le contact se rigidifie et de l'autre côté l'échantillon aussi se rigidifie. Tous les éléments étant liés, cela peut modifier la fréquence de résonance lue par les transducteurs.

Finalement, on remarque que l'amplitude des signaux reçus augmente avec le temps. Cela est observé pour tous les couples de transducteurs, excepté pour le couple 22-16 mm de la plaque 2 qui montre une forte présence de répliques et donc une impossibilité de comparer les amplitudes. Seuls les graphes des couples 38-34 mm pour les deux plaques et les 51-45 mm de la plaque 1 sont présentés dans la suite. En effet, le gain du signal émis, réglé sur l'amplificateur de puissance, n'est pas toujours le même d'une mesure à l'autre. Ainsi un signal avec un gain de 28dB présentera forcément une amplitude plus grande que pour un gain de 14dB. De plus, on ne peut comparer que des signaux identiques, par exemple un sinus ne peut pas être comparé pour l'amplitude avec un demi sinus arrondi. Ainsi, seuls les couples de transducteurs cités précédemment présentent assez de données comparables. On remarque également que l'amplitude des signaux reçus est proportionnelle à la masse d'eau ainsi qu'à V_s . Les figures 4.19 à 4.21 montrent les courbes obtenues grâce à l'analyse de l'amplitude.

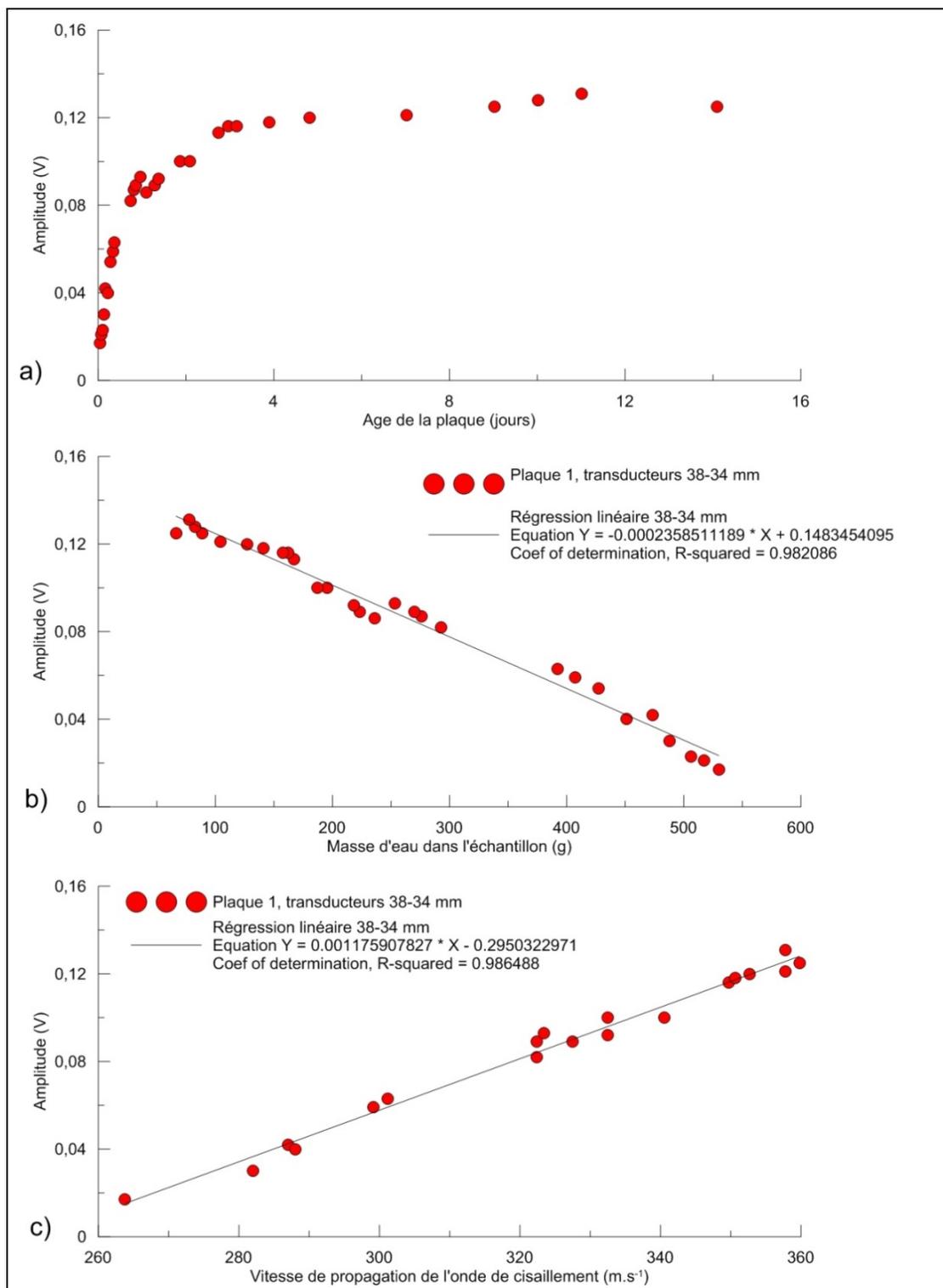


Figure 4.19 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm. Évolution de l'amplitude du signal reçu pour un sinus arrondi 5kHz-12V-14dB en fonction de a) le temps; b) la masse d'eau; c) V_s

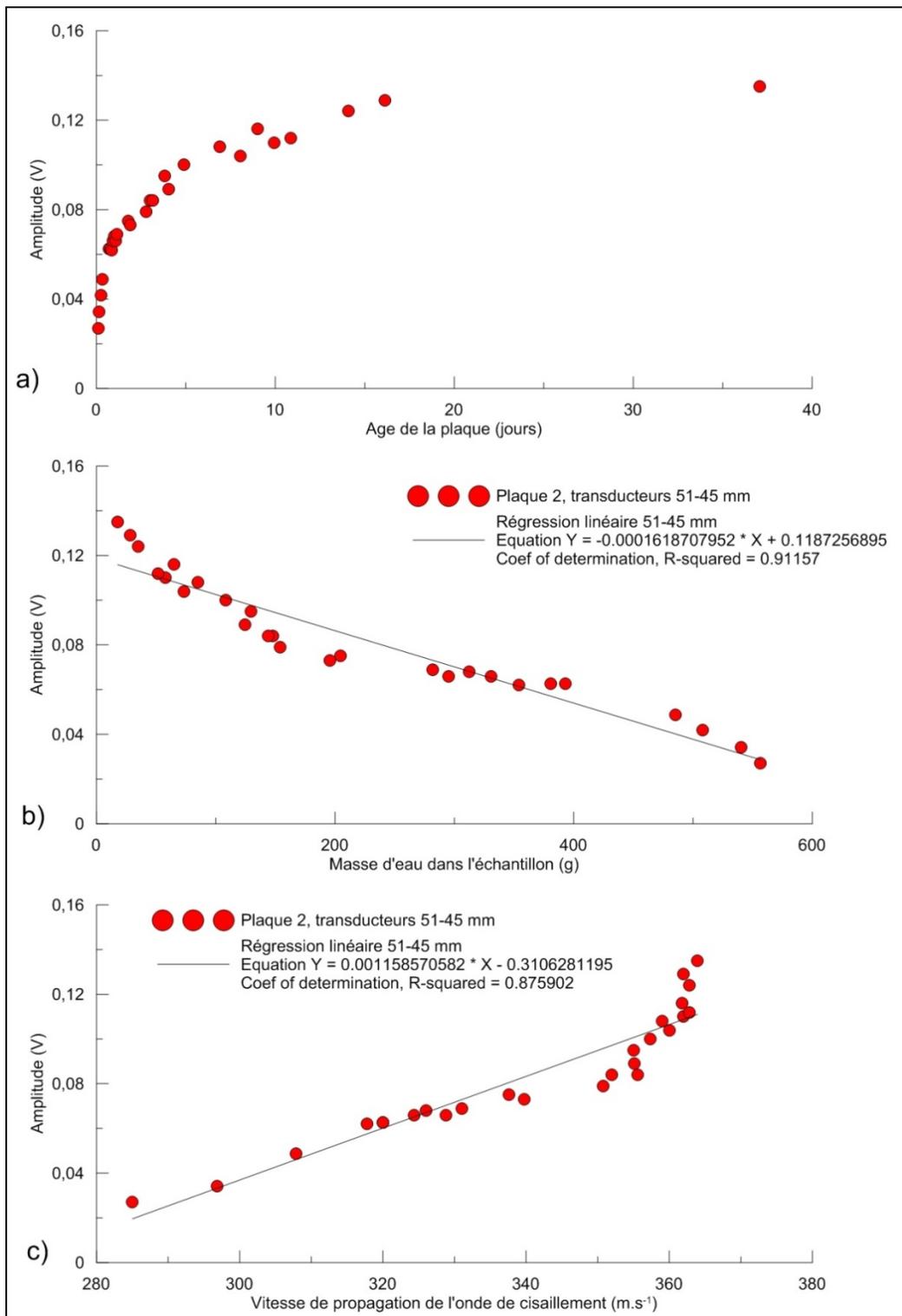


Figure 4.21 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm. Évolution de l'amplitude du signal reçu pour une ondelette 2kHz-12V-14dB en fonction de a) le temps; b) la masse d'eau; c) V_s

4.4 Résumé

Les résultats des transducteurs 22-16 mm de la plaque 2 et 51-45 mm de la plaque 1 ne sont pas pris en compte en raison de problèmes expérimentaux.

Pour les quatre couples de transducteurs dont on peut exploiter les résultats, c'est-à-dire pour la plaque 1, les couples 22-16 mm et 38-34 mm et pour la plaque 2 les couples 38-34 mm et 51-45 mm, on obtient les mêmes allures de courbe de l'évolution de V_s aussi bien en fonction du temps que de la masse d'eau. De plus la courbe de l'évolution masse d'eau en fonction du temps est la symétrique de celle de V_s en fonction du temps.

Cette même allure se retrouve dans l'évolution de la fréquence de résonance ainsi que dans l'évolution de l'amplitude

Les courbes de V_s en fonction de la masse d'eau sont associables à des droites, ce qui montre une proportionnalité directe entre ces deux grandeurs.

Il y également une forte proportionnalité entre l'amplitude du signal reçu et la masse d'eau, ce qui implique donc une proportionnalité entre V_s et l'amplitude du signal.

Pour les échantillons testés, il apparaît que la clarté des signaux s'est avérée meilleure, telle que traduite par des amplitudes supérieures, lorsque la rigidité était supérieure, donc lorsque le murissement était avancé, la masse d'eau diminuée et conséquemment V_s étaient plus élevées.

CHAPITRE 5

Discussion

Le chapitre 4 a permis d'évaluer l'évolution de V_s , de la masse d'eau, de l'amplitude du signal reçu ainsi que la fréquence de résonance du couple de transducteurs utilisé en fonction du temps. De plus des informations concernant la caractérisation des ERF et des enrobés intégrant des MR ont été présentées dans le chapitre 1. Ce chapitre présentera une discussion autour de ces diverses informations.

Le vieillissement des échantillons s'accompagne d'une augmentation de l'amplitude du signal émis, pour un même type de signal d'entrée et pour un gain constant. Or des études ont mis en avant une proportionnalité entre la compaction des échantillons et l'amplitude des signaux reçus (Jiang *et al.*, 2011). De plus dans cette étude, il a été montré que la valeur du module complexe (E^*) obtenue est proportionnelle aux nombres de girations. Il y a donc un lien entre l'amplitude du signal et E^* .

La présente étude a mis en évidence une proportionnalité entre la masse d'eau dans la plaque et V_s . De plus l'amplitude semble être également fortement liée à la masse d'eau et V_s . Il apparaît donc que la connaissance de V_s au sein de l'échantillon fournit une information sur le module complexe du matériau. Les figures 4.15, 4.16 et 4.19 à 4.21 témoignent de ce lien. Cela est cohérent avec le fait que la cohésion du matériau augmente lorsque l'eau disparaît. De plus des équations liant E^* et V_s existent dans le cas des EB à chaud, et pour des petites déformations (Mounier *et al.*, 2012). Cependant, afin d'utiliser ces équations il est nécessaire de connaître le coefficient de Poisson qui évolue avec la montée en cohésion du matériau. Il peut être déterminé si on connaît, pour un même temps, V_p et V_s . De plus il est nécessaire de connaître le déphasage induit par le comportement viscoélastique du matériau qui ne peut être calculé qu'après avoir réalisé un test de module complexe sur l'échantillon.

La figure 5.1 présente l'évolution de la masse d'eau et de V_s en fonction du temps avec une échelle logarithmique. On peut déterminer, grâce à cette échelle le temps à partir duquel la « prise » du matériau s'effectue, si on fait une analogie avec les bétons. De même on peut visualiser le temps à partir duquel la résistance de l'ERF n'augmente plus. Dans les ERF retraités à l'émulsion, on peut assimiler la prise initiale au moment où l'émulsion se rompt. Cependant, dans le cas de l'étude les essais débutent une heure après la compaction, la rupture de l'émulsion est déjà plus ou moins entamée. De plus la rupture de l'émulsion s'accompagne d'un changement de couleur de celle-ci. En effet, les émulsions de bitume sont de couleur marron mais vont tourner au noir lorsque la rupture de l'émulsion a été effectuée.

On remarque que les courbes de la figure 5.1a) donnent un temps de prise « initial » de l'ordre 0,04-0,05 jour, et que la masse d'eau au sein des plaques n'évolue presque plus à partir de 4-5 jours. Cela est déterminé par une approche simplifiée en traçant les tangentes de la courbes à des endroits bien précis, le début la fin et l'endroit où la pente de la courbe s'infléchit.

Les courbes de la figure 5.1b) et c) donnent des résultats semblables, mais pour l'évolution de V_s en fonction du temps. En effet on observe le début de l'évolution des valeurs de V_s pour des temps de 0,04-0,05 jour et une fin d'évolution vers 5-6 jours. Il est bien sur moins facile de déterminer ces temps aux vues de l'allure de la courbe. Cependant ces temps sont proche de ceux obtenues pour les courbes de la figure 5.1a), ce qui permet d'être confiant quant au lien entre la masse d'eau et V_s . Ces données concernant la prise initiale du matériau permettent d'expliquer le décrochage observé aux figures 4.15b) et 4.16b).

Finalement, ces données renforcent le besoin de comprendre au mieux ce qui se déroule au sein des ERF en jeune âge, à la vue de la rapidité à laquelle évolue la courbe. De plus V_s apparaît comme un bon outils pour évaluer cela.

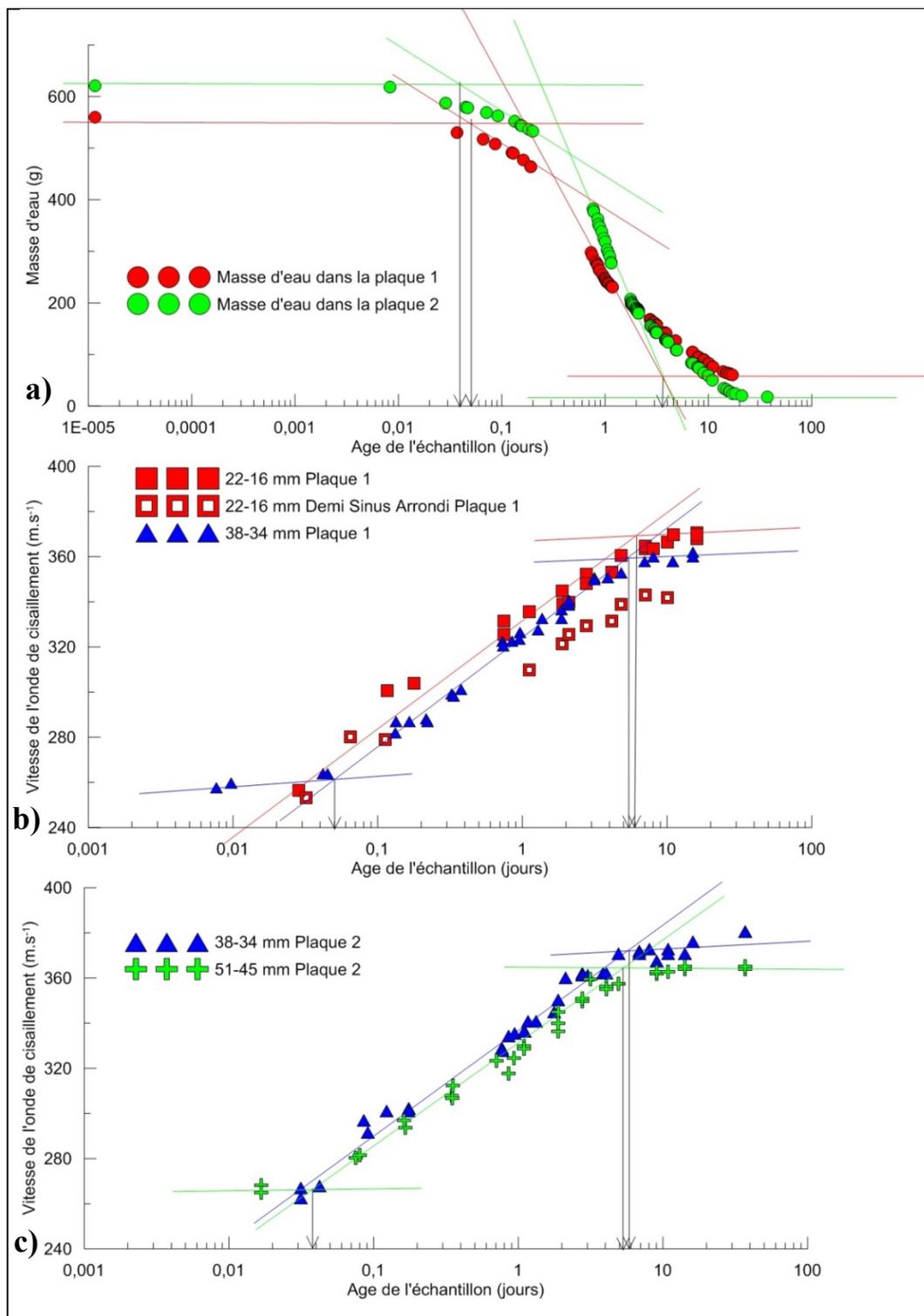


Figure 5.1 Résultats de l'analyse fréquentielle. a) Évolution de la masse d'eau en fonction du temps; b) Évolution de V_s en fonction du temps pour la plaque 1; c) Évolution de V_s en fonction du temps pour la plaque 2

Les valeurs de V_s obtenues, à savoir en jeune âge, de l'ordre de 250 m.s^{-1} et lorsque l'échantillon a vieilli 370 m.s^{-1} , sont cohérentes. En effet, des tests sur des échantillons d'argiles donnent des valeurs de V_s entre 50 m.s^{-1} et 200 m.s^{-1} , en fonction de la saturation en eau de l'échantillon. Concernant les EB à chaud, on relève généralement des valeurs de V_s de l'ordre de 2100 m.s^{-1} à 1800 m.s^{-1} (Houel et Bertrand, 2009; Mounier *et al.*, 2012). Une approximation peut être obtenue concernant V_s dans les ERF en utilisant l'équation 1.5 de la section 1.5.2. En effet, en prenant des valeurs de $\nu = 0.35$, $\varphi = 25^\circ$, $\rho = 2100 \text{ kg.m}^{-3}$ on obtient, pour un V_s de 370 m.s^{-1} , une valeur de $|E^*|$ de l'ordre de 800 MPa . Une valeur moyenne pour ce genre d'ERF est de 1000 Mpa , les valeurs obtenues, voisines de 370 m.s^{-1} , sont donc cohérentes.

La présente étude a montré que la méthode P-RAT fonctionne avec les ERF de type 1. Cependant, les figures 4.11 à 4.13 ainsi que les courbes en annexe 2 à 6 le présentent, au niveau de la correction de phase, qu'une petite zone où la courbe expérimentale colle à celle théorique. Il a été avancé que la présence du mastic bitumineux à l'interface entre la pierre poreuse et l'échantillon limite le déplacement du système masse ressort amorti, système à un degré de liberté qui modélise les transducteurs utilisés. Cependant la présence du mastic bitumineux améliore considérablement la qualité du contact et donc de l'analyse. Une différence notable dans l'analyse des signaux a été observée avant et après la mise en place de cette solution pour améliorer le contact entre les transducteurs et l'échantillon. Cependant, la rigidification du mastic influence le signal reçu. En effet, la propagation des ondes au sein d'un matériau est fortement liée à la contrainte que subit ce matériau.

L'utilisation d'une méthode d'analyse temporelle au préalable de l'étude fréquentielle est très utile. En effet, dans le cadre de l'étude de matériau dont on cherche à comprendre le comportement et dont peu d'informations sont disponibles, par exemple des valeurs de V_s , il est important de s'assurer que les valeurs obtenues sont cohérentes. Cependant, l'analyse temporelle ne prenant pas en compte le déphasage induit par le système, la valeur obtenue ne peut être utilisée que comme une première approche.

Si on regarde l'évolution de l'eau dans les échantillons considérés, on peut obtenir la fraction massique de l'eau au sein de ces échantillons. Rappelons qu'au Québec, lors de la mise en place d'une chaussée rénovée par un ERF de type 1, la législation prévoit d'attendre 2 semaines avant de recouvrir la couche posée par un enrobé de surface à chaud. Or en Ontario, il est stipulé qu'il faut attendre que la fraction massique d'eau passe en dessous de 1,5% d'eau. Il apparaît, selon les tests réalisés, que cette limite est atteinte après 5 jours pour la première plaque et 4 jours pour la seconde plaque. Le local étant climatisé, les conditions climatiques ne sont pas comparables à celles observées sur un chantier (présence de soleil, humidité ambiante). Par exemple, en présence de soleil, l'évaporation serait plus rapide, donc la limite des 1,5% serait atteinte plus rapidement et la limite des 2 semaines deviendrait plus contraignante. Une approche sur la rigidité du matériau serait plus raisonnable dans ce cas. La figure 5.1a) montre également qu'au bout de 4-5 jours, la masse d'eau atteint une valeur significative et que la diminution de celle-ci se ralentit.

L'utilisation de 3 couples de transducteurs a permis d'obtenir plusieurs courbes pour chaque plaque. Il apparaît que le couple 38-34 mm donne de meilleurs résultats, dans le sens où l'analyse était la plus simple pour ce couple. En effet, les signaux issus des transducteurs 38-34 mm présentent moins de phénomène de résonance et, dans le spectre fréquentiel, un seul pic était présent, permettant une meilleure analyse. Les couples 22-16 mm et 51-45 mm ont montré plus de difficultés, comme expliquées dans les parties 4.2 et 4.3.

Le couple 22-16 mm a dû subir des dommages, d'où le fait de l'apparition de répliques et des nombreux pics de résonance lors de l'étude de la seconde plaque. Le couple 51-45 mm présente de bons résultats pour la seconde plaque et l'analyse des résultats de la première plaque a été rendue inutilisable à cause de la fissure. Ainsi, les transducteurs 38-34 mm et 51-45 mm sont à préférer lors de l'analyse de ces matériaux. En effet, la grande taille des transducteurs permet une meilleure stabilité et évite que le câble reliant le transducteur et la centrale d'acquisition ne fasse se retourner le capteur et créer un système multicouche du fait d'un décollement des granulats en surface. De plus la grande taille des capteurs permet, dans

le cas d'un ERF que l'on considère comme homogène, mais qui localement ne l'est pas, que l'onde se propage dans un milieu plus représentatif de ce que l'on souhaite tester.

Dans le même ordre d'idée, chaque couple de transducteur ne mesure pas exactement la même chose, dans le sens où localement, chaque transducteur est situé sur un mélange différent. En effet, la teneur en eau, la quantité de vide, le squelette granulaire et la quantité de bitume ne sont pas les mêmes localement. Ainsi cela peut expliquer les différences dans les valeurs de V_s obtenues pour les 3 couples de transducteurs et pour les 2 plaques. A cela on peut également rajouter une erreur qui peut être induite par la mesure de la hauteur réelle de l'échantillon aux endroits des transducteurs, à savoir qu'un mm d'erreur peut amener 2% d'erreur dans la valeur de V_s .

On peut noter, de plus, que la hauteur de l'anneau piézoélectrique n'influence pas sur les valeurs obtenues. En effet, les anneaux piézoélectriques des capteurs 51-45 mm font 14 mm de haut alors que ceux des 38-34 mm et 22-16 mm ne font que 3,5 mm de haut, sans pour autant qu'une différence dans les valeurs ne soient observées, hormis les écarts liés à l'appréciation de la hauteur de la plaque d'EB ainsi que la qualité des signaux.

La comparaison de chaque couple de transducteurs par rapport aux 2 plaques ne présente pas d'informations très concluantes (*Voir* figure 5.1). En effet, au global, les résultats sont les mêmes, mais comme expliqué dans le chapitre 4, les valeurs obtenues dépendent de la précision de la mesure de la hauteur. Ainsi, on observe que pour le couple 38-34 mm, la plaque 2 présente des vitesses plus élevées. Cependant, l'absence de résultats pour le couple 22-16 mm de la plaque 2 et pour le couple 51-45 mm de la plaque 1, ne nous permet pas de comparer ces 2 couples de transducteurs.

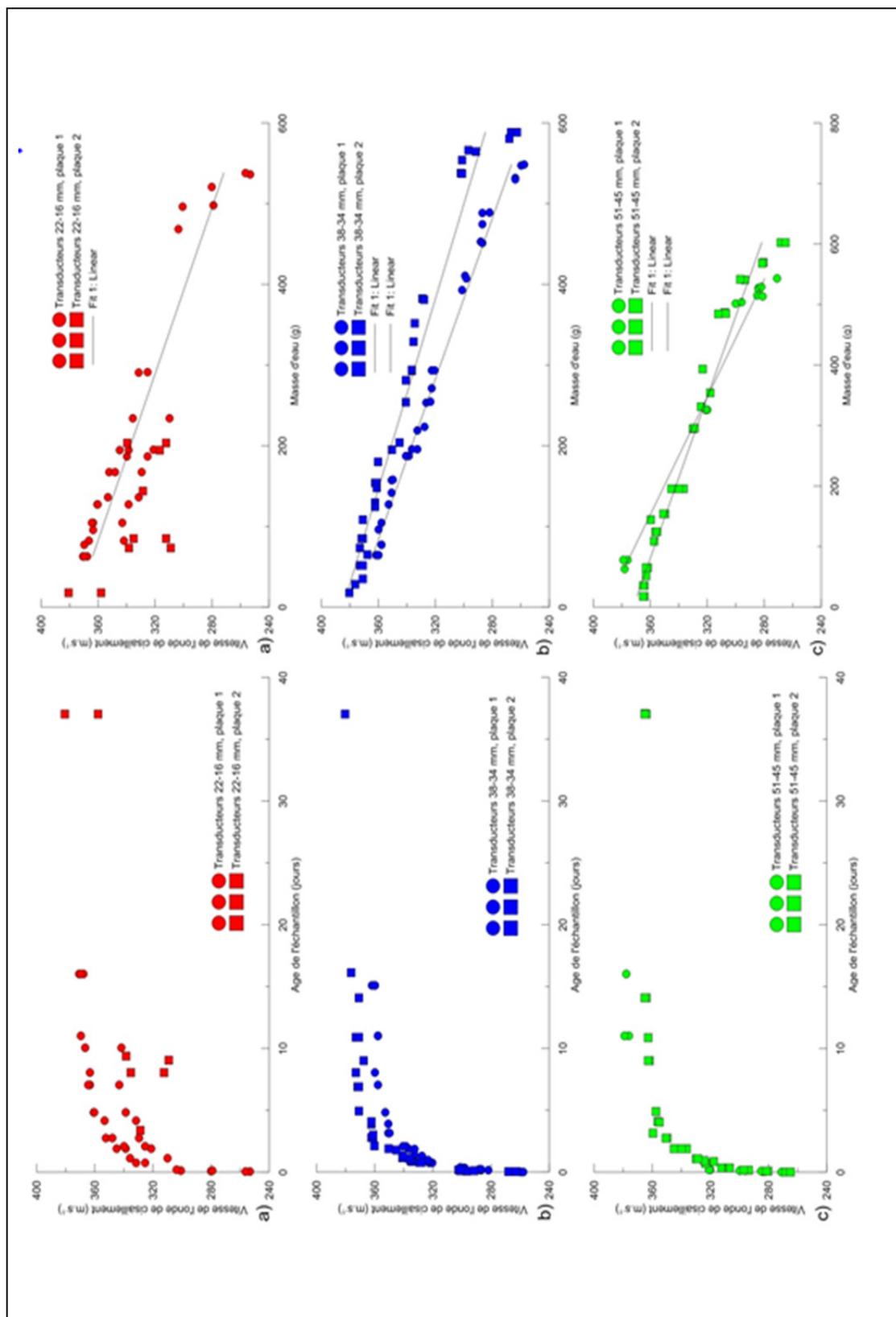


Figure 5.2 Comparaison des couples de transducteurs pour les 2 plaques: a) 22-16 mm; b) 38-34 mm; c) 51-45 mm

CONCLUSION

De nombreuses méthodes visant à caractériser les enrobés bitumineux existent. Cependant les tests classiques ne sont pas adaptés aux ERF lorsqu'on souhaite les caractériser en jeune âge. En effet, la quantité d'eau présente dans ces matériaux en jeune âge et les normes encadrant les tests classiques imposent d'effectuer une cure sur les EB, ce qui force à s'éloigner du jeune âge. C'est pourquoi une autre méthode d'analyse doit être utilisée.

L'utilisation d'ondes sonores a fait ses preuves dans de nombreux domaines notamment dans l'étude des géomatériaux. Des essais sur les matériaux bitumineux ont été réalisés utilisant ces méthodes, cependant aucun de ces tests ne fait état de l'étude des ERF en jeune âge. La méthode P-RAT a été utilisée au long de cette étude en raison des caractéristiques des ondes de cisaillement. En effet celles-ci permettent de ne pas tenir compte de l'eau présente dans les EB, contrairement aux ondes de compression. En effet celles-ci pourraient, dans le cas où l'eau est fortement présente, ne caractériser que l'eau et non le matériau. Grâce à cette méthode on peut supposer que seuls les granulats et le bitumes sont caractérisés, notamment en jeune âge de l'ERF où la teneur en eau est très élevée.

Le chapitre 3 rassemble les résultats des tests préliminaires sur les échantillons. Ceux-ci ont permis de mettre en avant que la méthode d'analyse fréquentielle P-RAT est utilisable dans l'étude de ERF traités à l'émulsion. Pour cela, trois couples de transducteurs de tailles différentes ont été réalisés. Les différentes tailles des éléments piézoélectriques permettent d'obtenir des fréquences de résonance différente. Les tests ont montré que le signal émis est correctement reçu. Cependant, il est rapidement apparu que le contact entre l'échantillon et les transducteurs n'était pas optimal, qu'un phénomène de résonance était présent et que des répliques pouvaient apparaître dans le signal reçu. Il a été montré par la suite que la mise en place d'un mastic bitumineux à l'interface entre les transducteurs et les échantillons a permis d'améliorer le contact et d'agrandir la plage de fréquence dans laquelle l'énergie est échangée entre le signal d'entrée et le signal reçu. Par la suite, les observations et les améliorations apportées à ce chapitre ont été appliqués aux essais sur les plaques.

Des plaques d'ERF ont été réalisées par la suite pour évaluer l'évolution de V_s au sein du matériau en fonction du temps et de la masse d'eau présente dans la plaque. Deux plaques ont été réalisées et pour chaque plaque au moins 1350 signaux ont été acquis. Beaucoup ont été analysés, mais seuls ceux qui donnent les meilleurs résultats ont été conservés et ont permis d'arriver aux conclusions présentées par la suite.

Une fissure au niveau des transducteurs 51-45 de la première plaque est apparue dès la mise en place des transducteurs, les résultats ont été analysés mais ne sont pas considérés. Des problèmes dus à l'absence de cohésion au sein du matériau en jeune âge sont apparues pour les transducteurs 22-16 mm de la seconde plaque, ces résultats ne sont pas pris en compte. Il apparaît, pour les autres couples de transducteurs, que V_s évolue proportionnellement avec la disparition de l'eau dans la plaque. De plus, on observe une proportionnalité entre l'amplitude du signal reçu et la masse d'eau dans la plaque. L'amplitude étant elle-même proportionnelle à la valeur du module complexe, la connaissance de l'évolution de V_s permettrait de caractériser l'ERF.

Ainsi, ce projet exploratoire a montré que la méthode P-RAT peut être utilisée afin de caractériser et de visualiser le comportement en jeune âge des matériaux bitumineux retraités à froid à l'émulsion de bitume.

A la vue de cette étude, certaines recommandations peuvent être effectuées. Tout d'abord, le montage expérimental devrait être amélioré afin de permettre un meilleur maintien en position des transducteurs supérieurs, limitant ainsi les décollements et donc l'apparition de systèmes multi couche. En effet, il est apparu que le contact et le maintien en position des transducteurs ont posé des problèmes au cours de cette étude. De plus cela permettrait de faciliter la mise en place et d'améliorer les signaux et donc l'analyse. On peut imaginer un système permettant d'enchâsser les transducteurs supérieurs sur des plaques elles-mêmes guidées par des glissières. Cela permettrait également de pouvoir appliquer des charges connues sur les transducteurs afin d'en évaluer l'influence. De plus cela permettrait de créer

une procédure de prise de mesure standardisée vis-à-vis de la pression exercée sur les transducteurs.

Une autre approche pour l'amélioration du contact entre l'échantillon et les pierres poreuses est à explorer. En effet le mastic bitumineux améliore certes le contact, mais cela réduit la liberté du transducteur à vibrer. De plus son influence sur la prise de mesure et les signaux obtenus doit être mieux comprise et l'utilisation d'autres matériaux à l'interface échantillon/transducteur doit être envisagée afin de réduire cette influence.

Comme expliqué au chapitre 5, la mesure de V_p permettrait d'obtenir le coefficient de Poisson du matériau, ainsi une amélioration du montage devrait permettre d'obtenir cette vitesse afin de caractériser l'évolution de v .

L'utilisation de la méthode P-RAT ayant été validé, il serait intéressant de faire varier les paramètres de l'étude en commençant par la composition de l'enrobé testé. En effet, dans notre étude la composition du matériau n'a pas varié, seule la faisabilité de la méthode était recherchée. D'autres compositions devraient être testées, en faisant varier des paramètres tels que la quantité d'eau initiale ou la teneur en vide. De plus des paramètres tels que l'humidité de la pièce dans laquelle les mesures sont conduites ainsi que la température doivent influencer la montée en cohésion de l'ERF. Il serait intéressant de quantifier ces influences afin de se rapprocher encore plus des conditions sur chantier, dans l'optique d'optimiser les temps de mise en place et d'ouverture de la chaussée aux utilisateurs.

Finalement, il serait intéressant d'arriver à lier les résultats obtenus dans la présente étude et par l'utilisation de la méthode P-RAT, à d'autres méthodes visant à caractériser les ERF en jeune âge.

ANNEXE I

Courbes de tendances et équations des courbes de masse d'eau

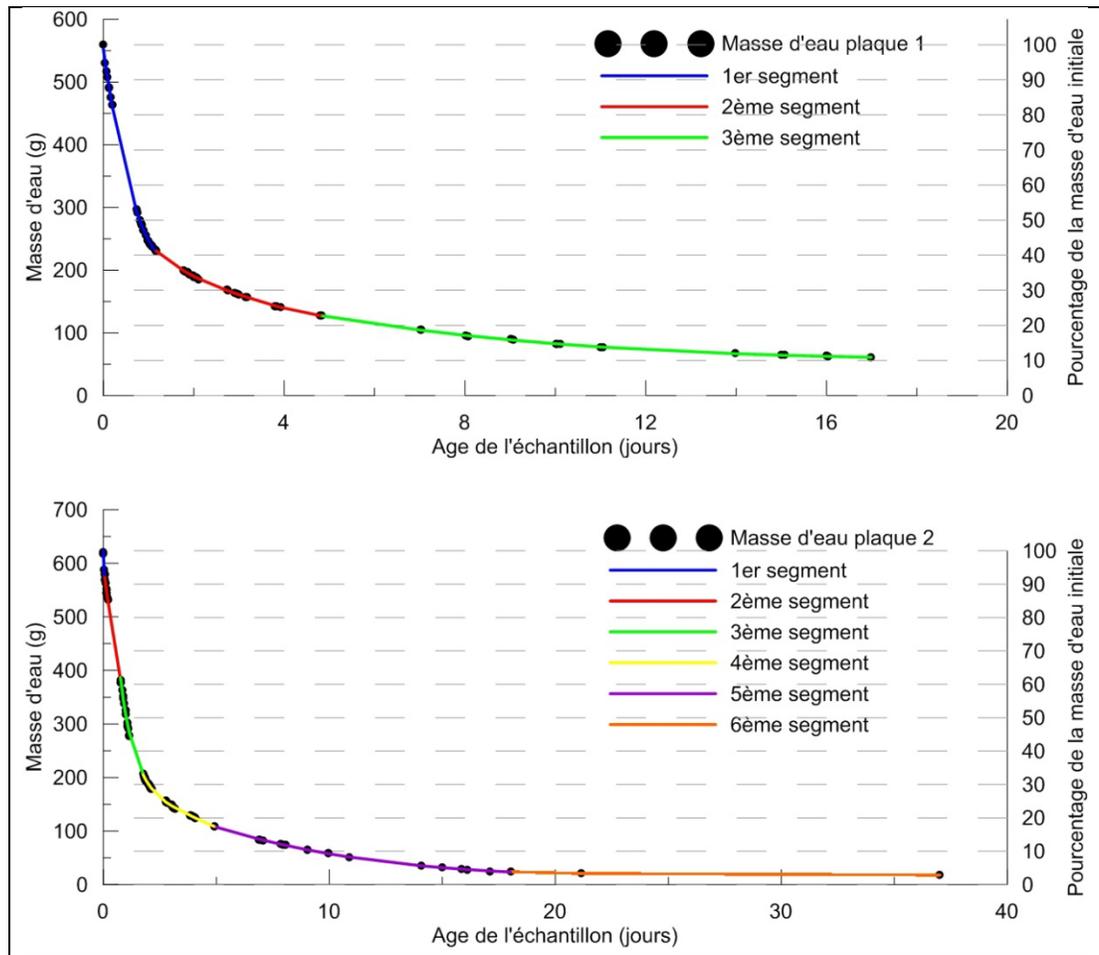


Figure-A I-1 Courbes de tendances de l'évolution de la masse d'eau

Tableau-A I-1 Équations des courbes de tendance de
la masse d'eau dans la plaque 1

Plaque 1	Equation	t (jours)	0,000012	1,172	4,799	16,988
1er Segment	$y = -32,556x^3 + 238,54x^2 - 510,6x + 552,49$ $R^2 = 0,9997$	y(t)	552,48	229,31		
		y'(t)	-510,6	-85,62		
2ème Segment	$y = 0,7235x^4 - 9,8658x^3 + 52,638x^2 - 151,9x + 350,74$ $R^2 = 0,9996$	y(t)		230,5	127,39	
		y'(t)		-64,51	-8,467	
3ème Segment	$y = -0,0165x^3 + 0,9814x^2 - 20,353x + 204,52$ $R^2 = 0,9988$	y(t)			127,62	61,095
		y'(t)			-12,07	-1,294

Tableau-A I-2 Équations des courbes de tendance de
la masse d'eau dans la plaque 2

Plaque 2	Equation	t (jours)	0,000012	0,0451	0,046	0,76	1,76
1er Segment	$y = 9573,2x^2 - 1422,1x + 623,71$ $R^2 = 0,9724$	y(t)	623,69	579,04	578,28		
		y'(t)	-1422	-541,6	-514,5		
2ème Segment	$y = 0,7235x^4 - 9,8658x^3 + 52,638x^2 - 151,9x + 350,74$ $R^2 = 0,9996$	y(t)		579,91	579,44	382,17	
		y'(t)		-338,1	-337,8	-222,8	
3ème Segment	$y = -0,0165x^3 + 0,9814x^2 - 20,353x + 204,52$ $R^2 = 0,9988$	y(t)				386,57	206,22
		y'(t)				-381,3	-87,99

Tableau-A I-3 Équations des courbes de tendance de
la masse d'eau dans la plaque 2

Plaque 2	Equation	t (jours)	1,76	4,9	18,03	37,01
4ème Segment	$y = 1,8157x^4 - 27,728x^3 + 158,48x^2 - 423,17x + 592,6$ $R^2 = 0,9987$	y(t)	205,15	108,7		
		y'(t)	-83,58	-12,83		
5ème Segment	$y = -0,0134x^3 + 0,8803x^2 - 20,801x + 190,81$ $R^2 = 0,9995$	y(t)		108,43	23,401	
		y'(t)		-13,14	-2,12	
6ème Segment	$y = 0,0411x^2 - 2,5775x + 56,814$ $R^2 = 1$	y(t)			23,705	17,71
		y'(t)			-1,096	0,465

ANNEXE II

Analyse fréquentielle plaque 1, transducteurs 22-16 mm

Tableau-A II-1 Tableau récapitulatif des valeurs obtenues et utilisées pour le couple 22-16 mm, plaque 1

Test	Heure	Jour	Heure	Signal d'entrée	Vs mesurée	Vs réelle	Masse d'eau
1	15:46:00	0,032	0,767	DSA 8 12 42	246	253,28	536,42
1	15:41:00	0,028	0,683	Ondelette 3 12 42	249	256,37	538,14
2	16:33:00	0,065	1,550	DSA 8 12 42	272	280,05	520,50
4	17:48:00	0,117	2,800	Ondelette 8 12 42	292	300,64	496,12
4	17:43:00	0,113	2,717	DSA 8 12 42	271	279,02	497,70
6	19:18:00	0,179	4,300	Ondelette 8 12 42	295,01	303,74	468,48
11	08:54:00	0,746	17,900	Ondelette 5 12 42	316	325,35	290,85
11	08:56:00	0,747	17,933	Ondelette 8 12 42	322	331,53	290,56
15	17:57:00	1,123	26,950	Ondelette 8 12 42	326	335,64	233,82
15	17:53:00	1,120	26,883	DSA 8 12 42	301	309,90	234,09
18	12:15:00	1,885	45,250	Ondelette 7 12 42	335	344,91	194,48
18	12:27:00	1,894	45,450	SA 8 12 42	329	338,73	194,16
18	12:04:00	1,878	45,067	DSA 10 12 42	312	321,23	194,78
20	17:20:00	2,097	50,333	DSA 9 12 42	316	325,35	186,68
20	17:24:00	2,100	50,400	Ondelette 5 12 42	330	339,76	186,59
21	09:04:00	2,753	66,067	DSA 9 12 42	320	329,47	167,22
21	09:06:00	2,754	66,100	Ondelette 6 12 42	342,2	352,32	167,18
21	09:08:00	2,756	66,133	SA 9 12 42	338	348,00	167,15
23	18:52:00	4,161	99,867	DSA 9 12 42	322	331,53	136,17
23	19:01:00	4,167	100,017	Ondelette 6 12 42	343	353,15	136,06
25	10:50:00	4,826	115,833	DSA 9 12 42	329	338,73	127,17
25	10:54:00	4,829	115,900	SA 10 12 42	350,2	360,56	127,15
25	10:53:00	4,828	115,883	Ondelette 8 12 42	350	360,35	127,15
26	15:54:00	7,038	168,900	Ondelette 6 12 42	353	363,44	104,14
26	15:52:00	7,036	168,867	DSA 9 12 42	333,2	343,06	104,15
26	15:56:00	7,039	168,933	Sinus 12 12 42	354	364,47	104,13
27	16:09:00	8,048	193,150	Ondelette 6 12 42	353	363,44	95,68
29	15:52:00	10,036	240,867	Ondelette 8 12 42	356	366,53	82,43
29	15:47:00	10,033	240,783	DSA 9 12 42	332	341,82	82,45
30	15:35:00	11,024	264,583	SA 12 12 42	359	369,62	77,31
32	15:39	16,027	384,650	SA 12 12 42	360	370,65	62,48
32	15:40	16,028	384,667	Sinus 15 12 42	357,2	367,77	62,48
32	15:38	16,026	384,633	Ondelette 7 12 42	359	369,62	62,48

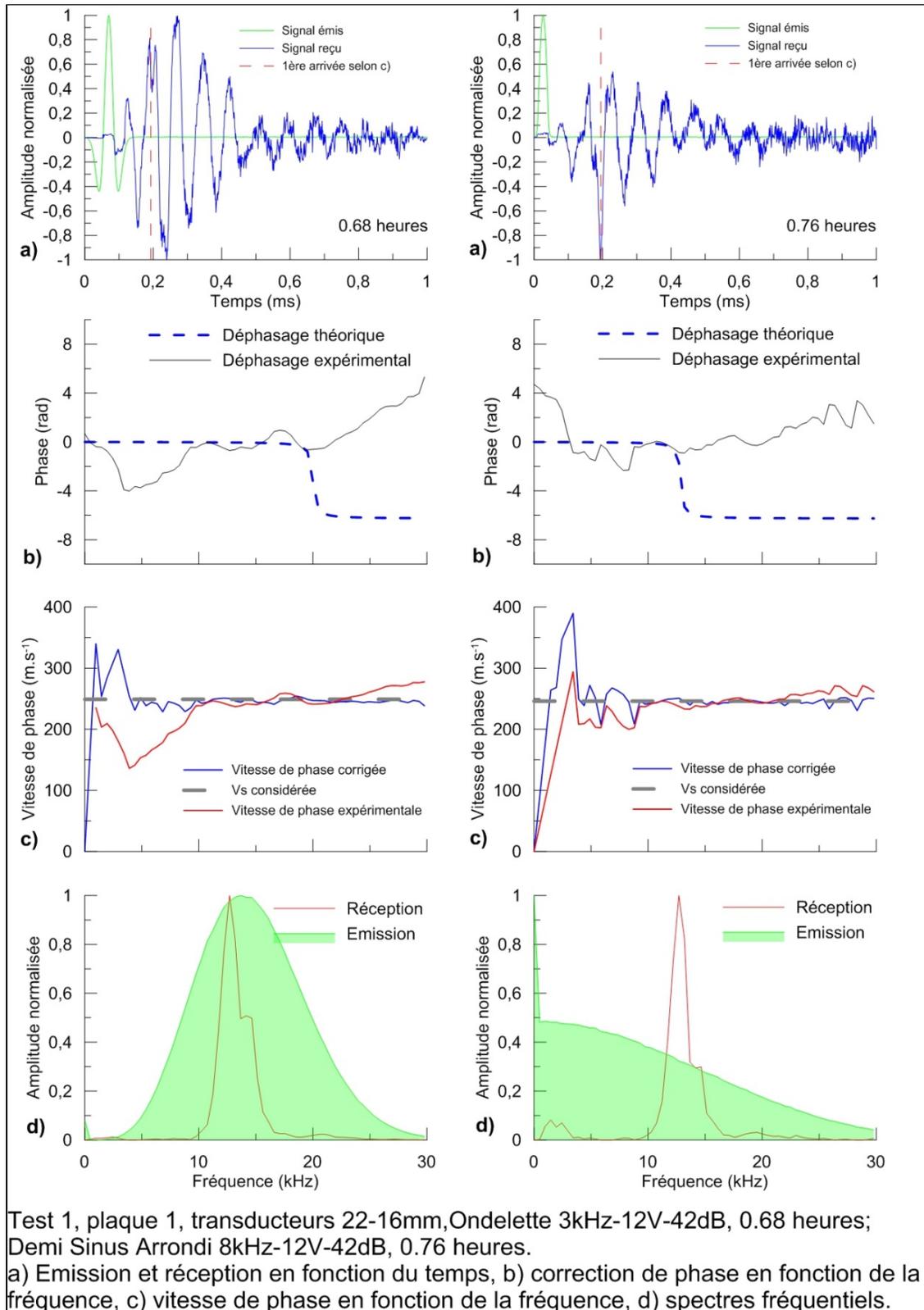


Figure-A II-1 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

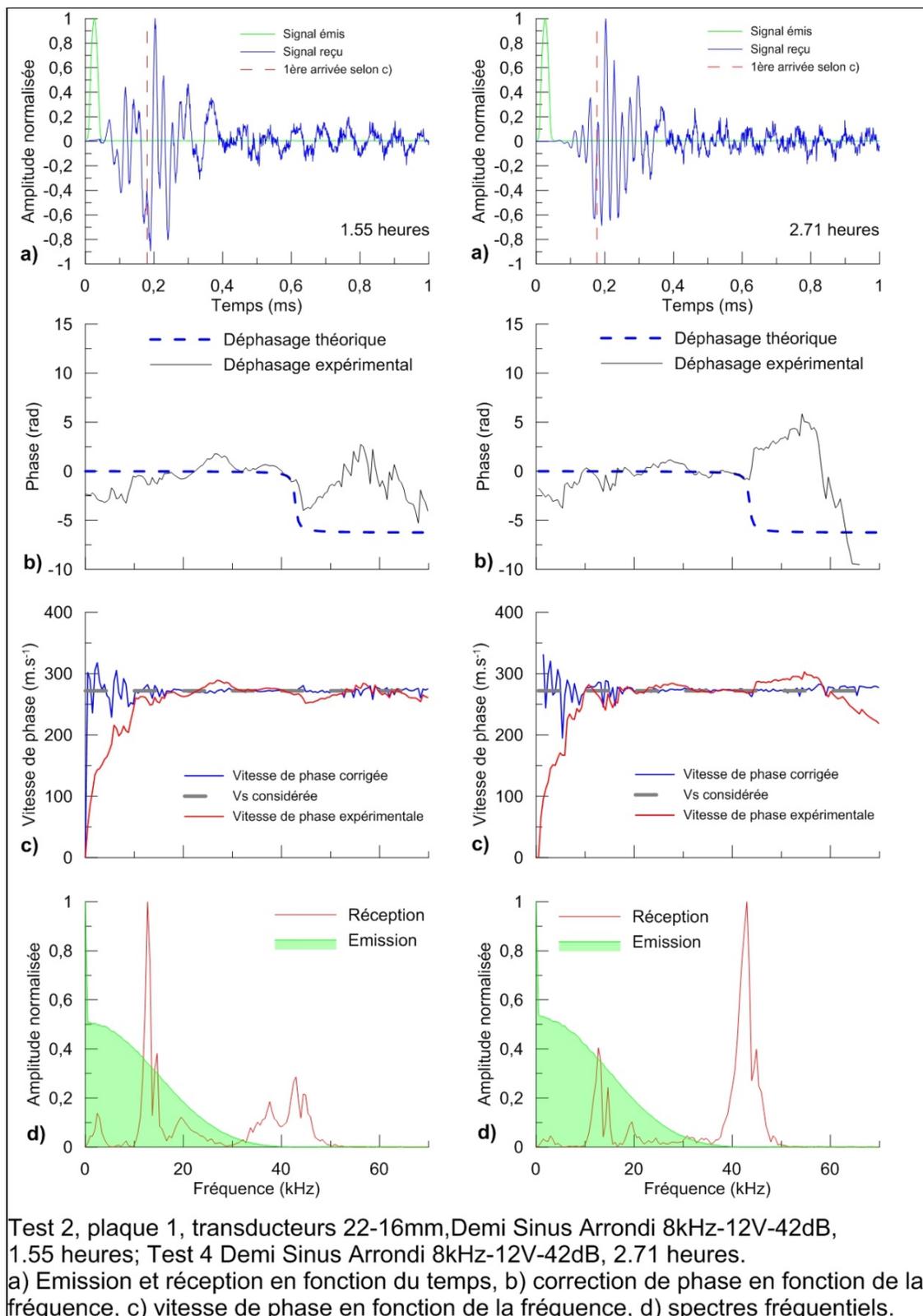
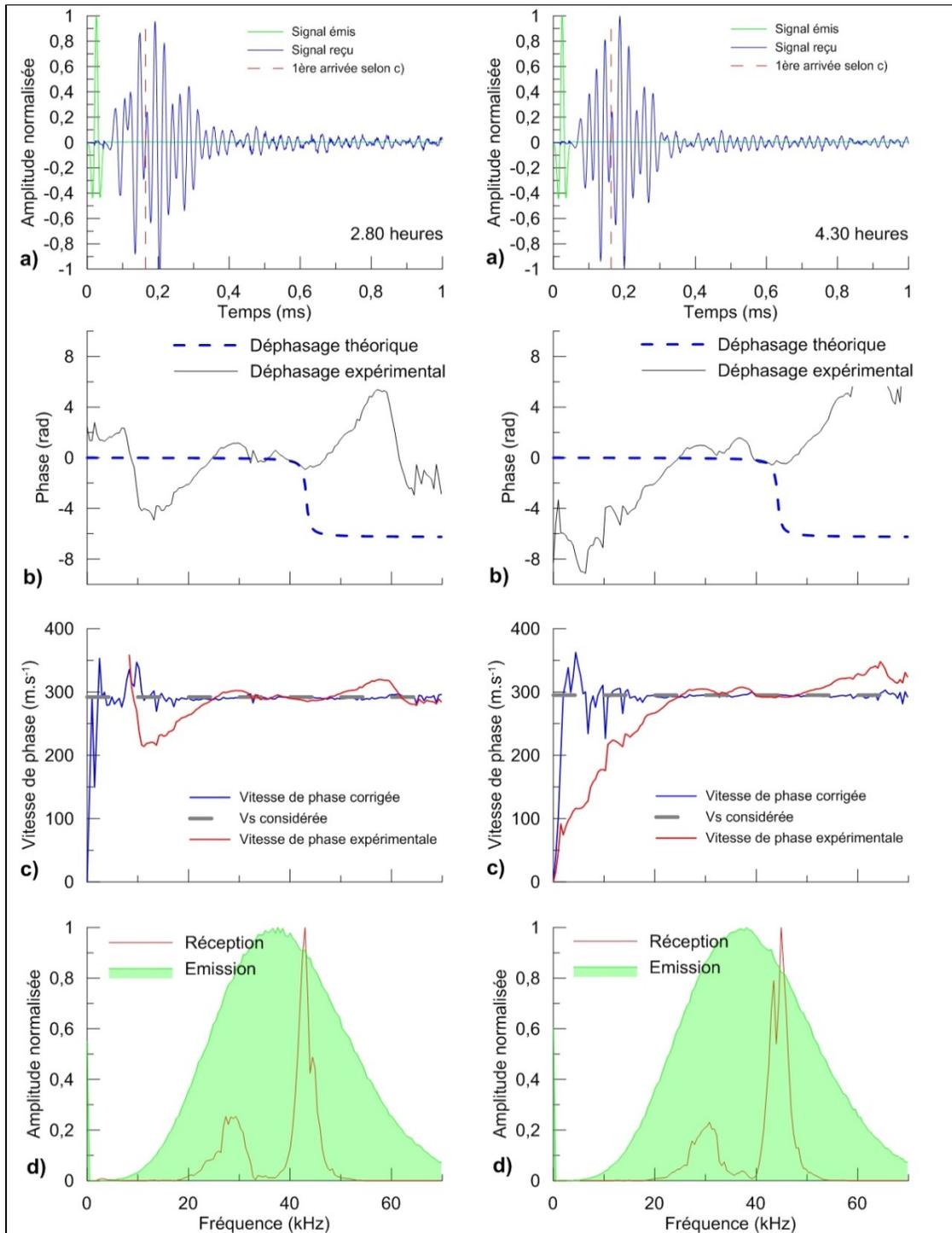


Figure-A II-2 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm



Test 4, plaque 1, transducteurs 22-16mm, Ondelette 8kHz-12V-42dB, 2.80 heures;

Test 6 Ondelette 8kHz-12V-42dB, 4.30 heures.

a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A II-3 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

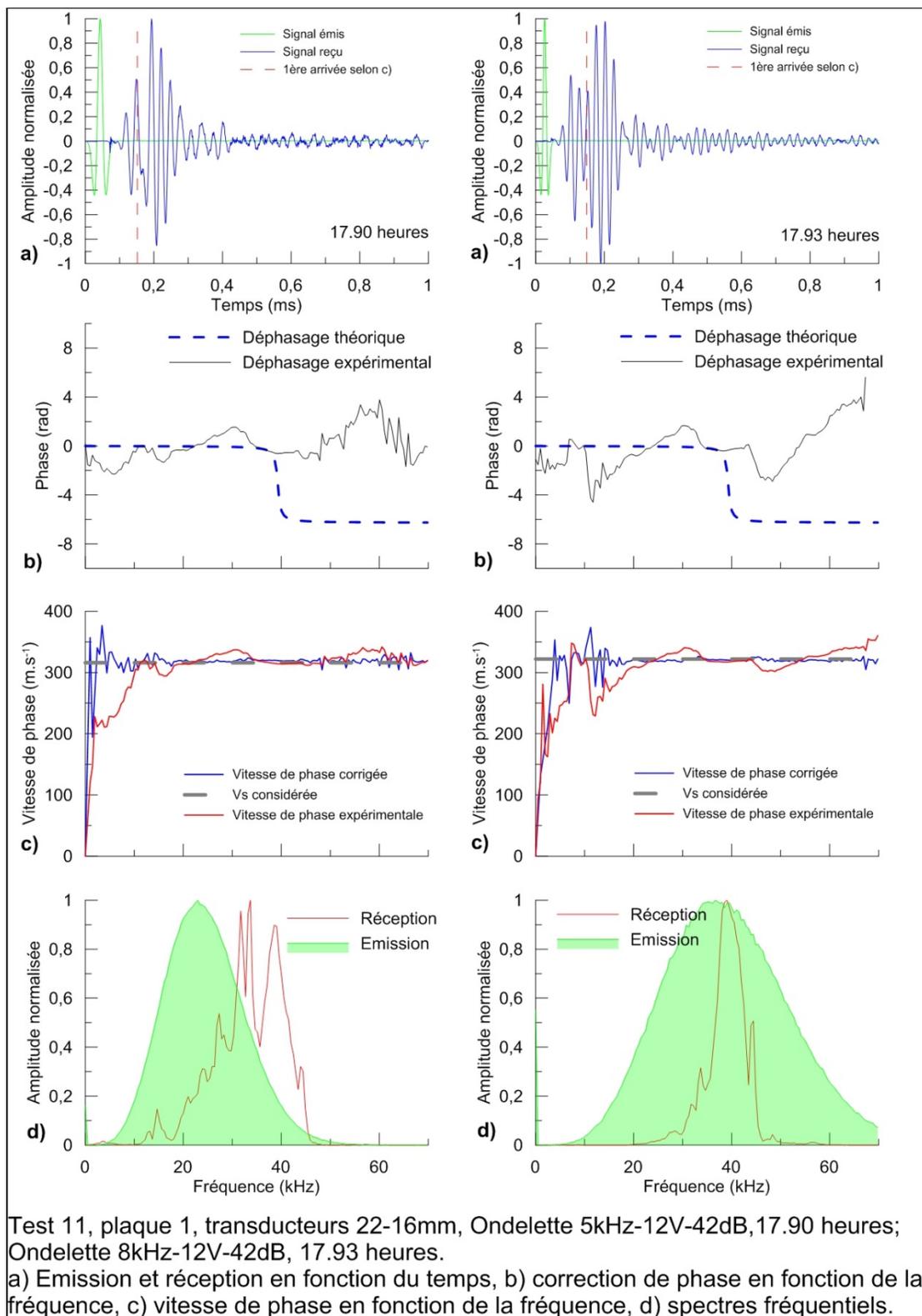


Figure-A II-4 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

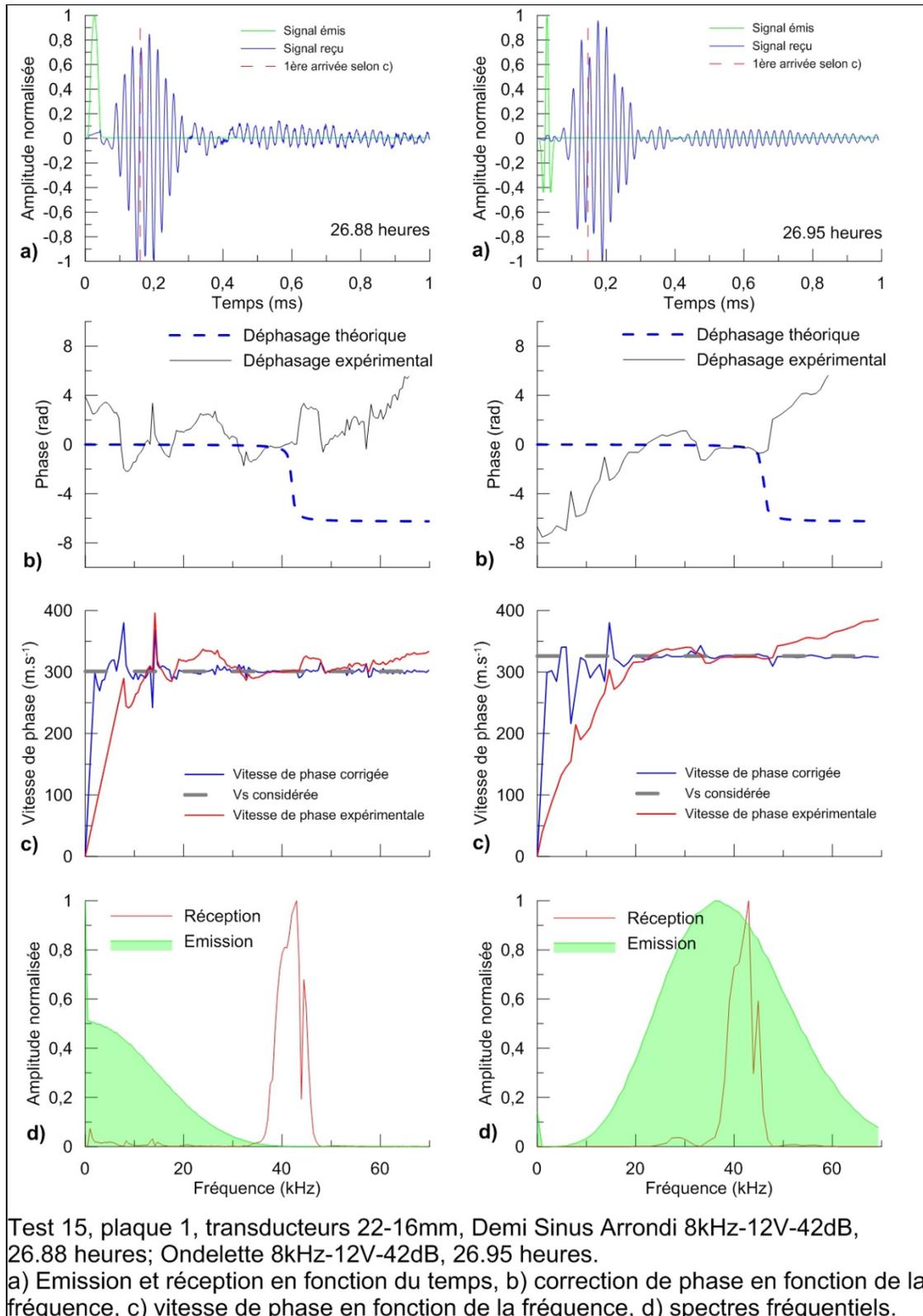


Figure-A II-5 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

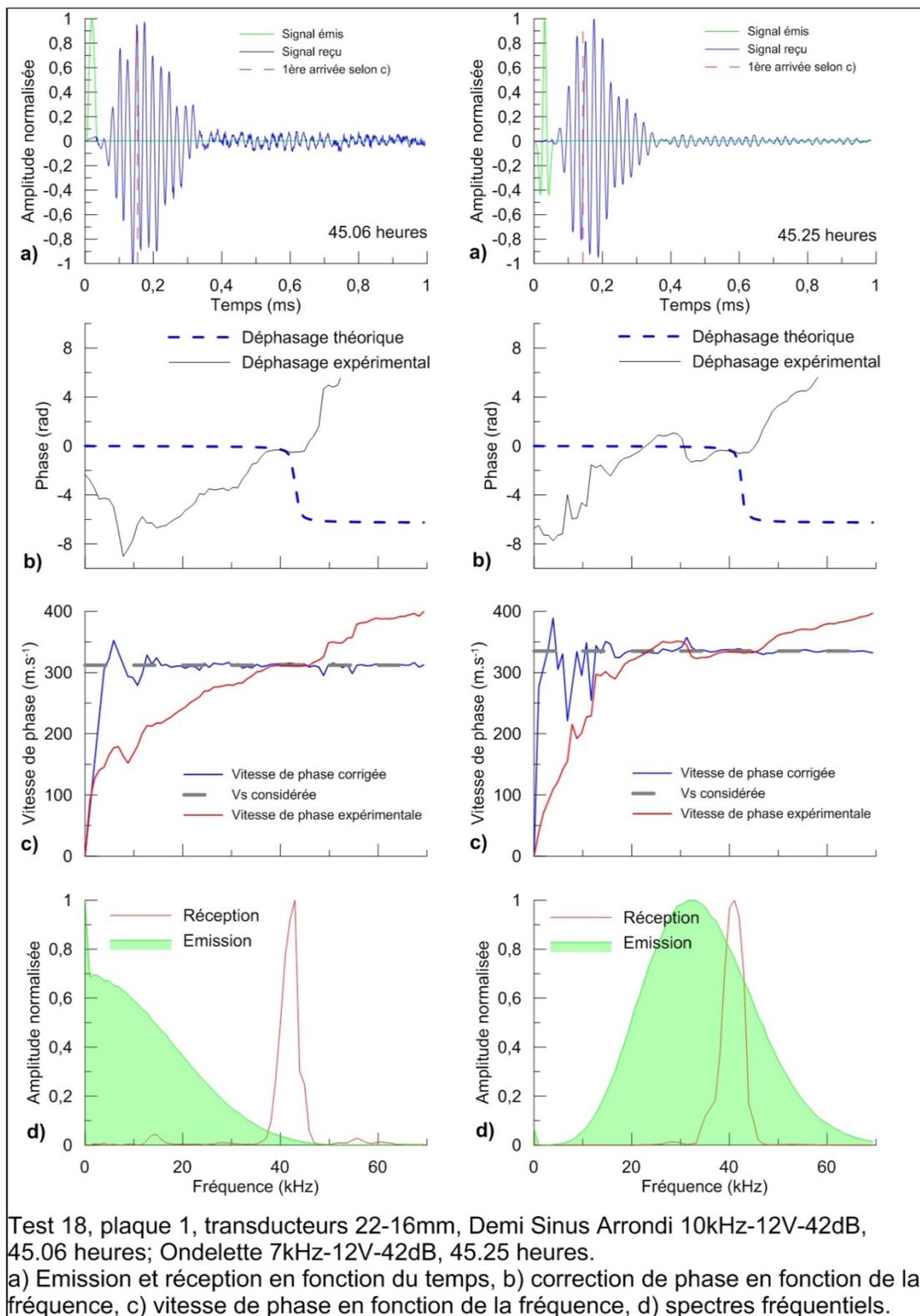


Figure-A II-6 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

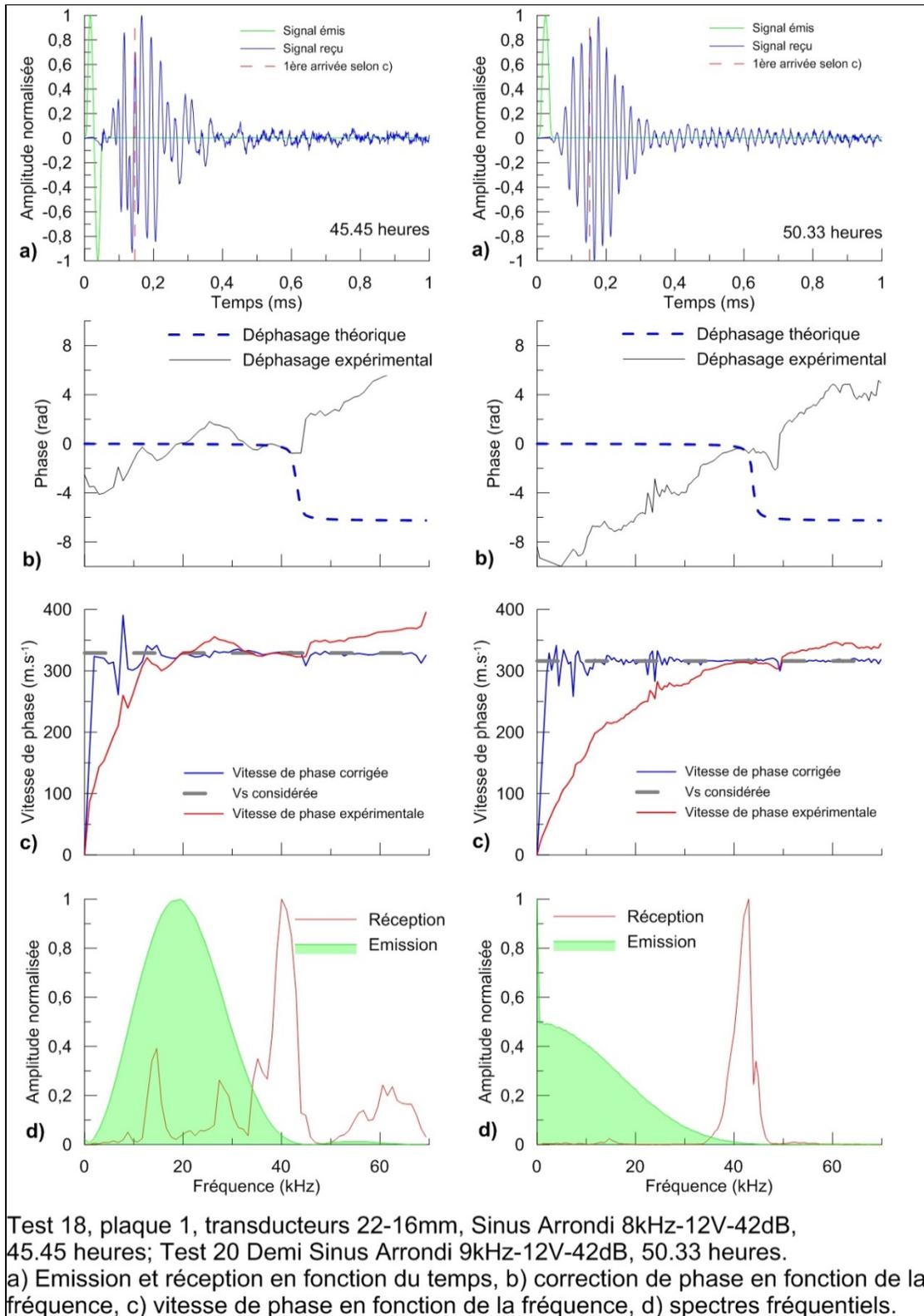
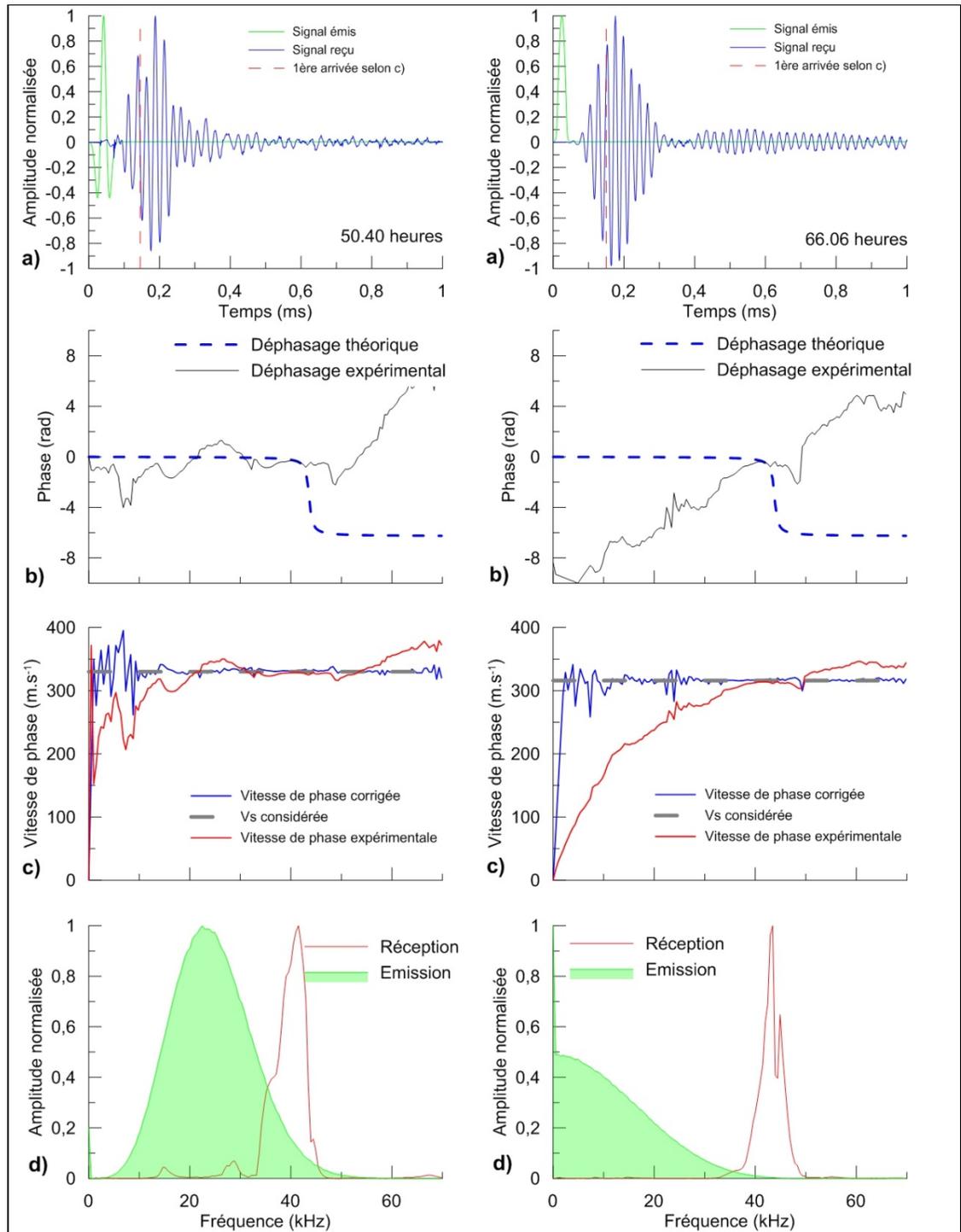
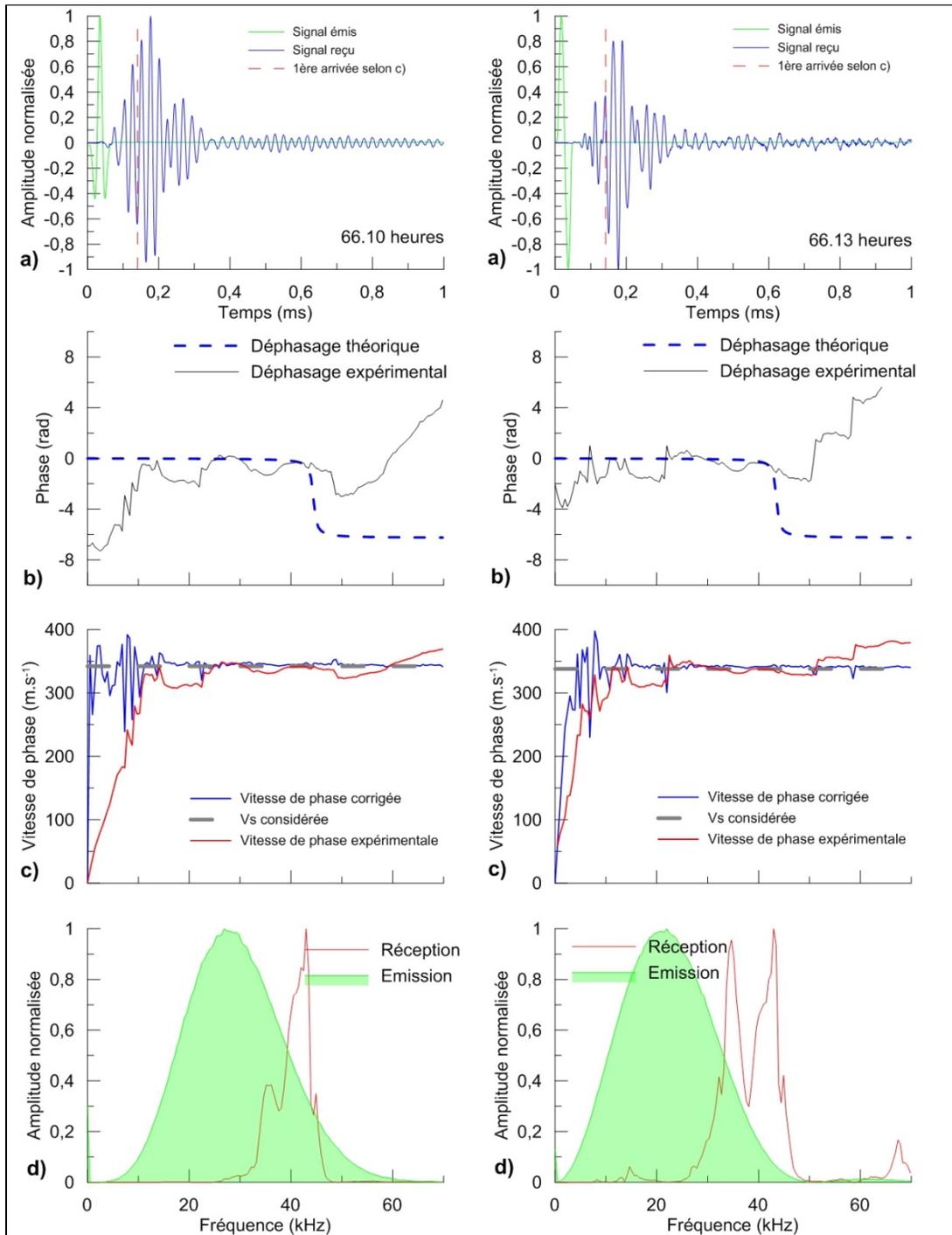


Figure-A II-7 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm



Test 20, plaque 1, transducteurs 22-16mm, Ondelette 5kHz-12V-42dB, 50.40 heures; Test 21 Demi Sinus Arrondi 9kHz-12V-42dB, 66.06 heures.
 a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

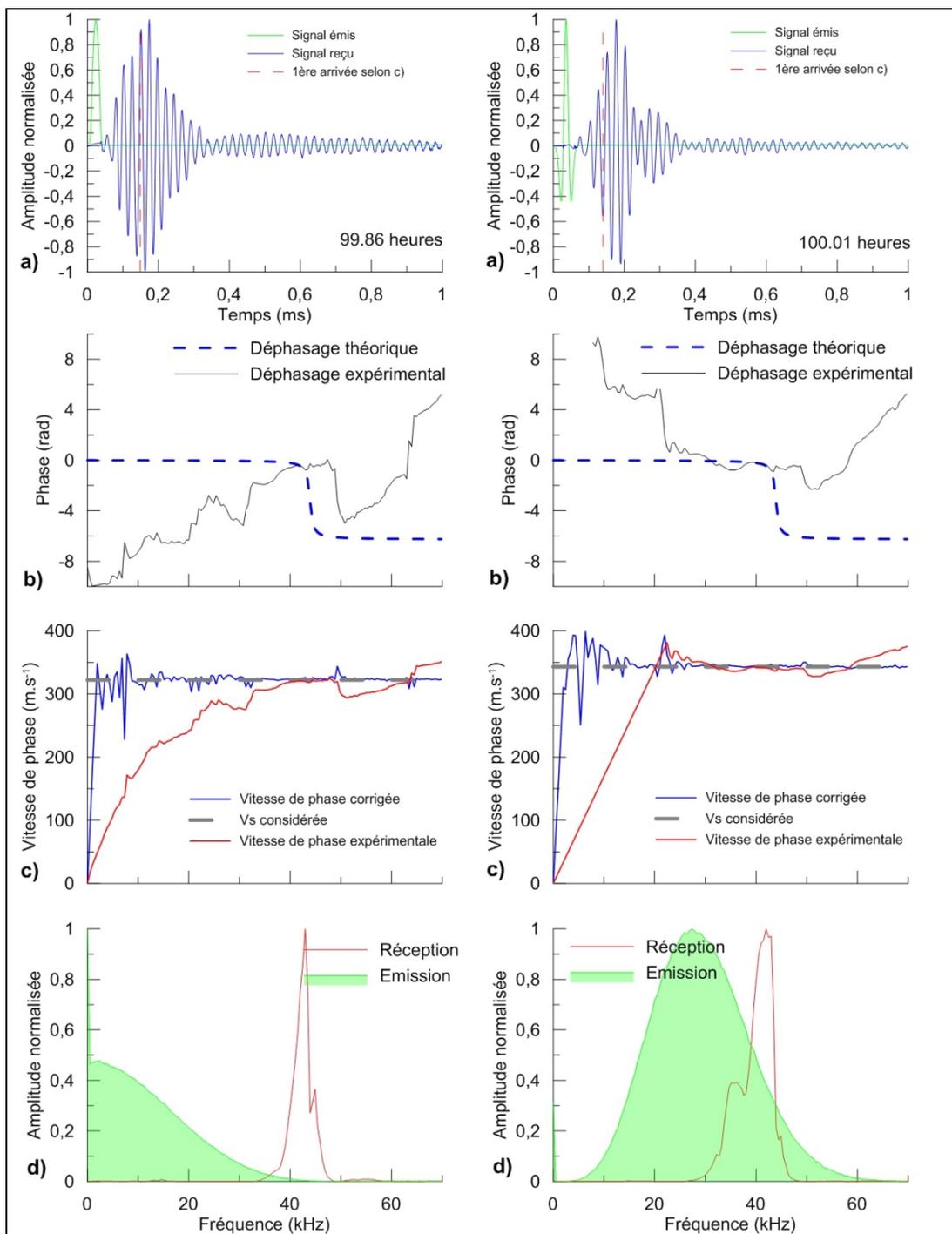
Figure-A II-8 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm



Test 21, plaque 1, transducteurs 22-16mm, Ondelette 6kHz-12V-42dB, 66.10 heures; Sinus Arrondi 9kHz-12V-42dB, 66.13 heures.

a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

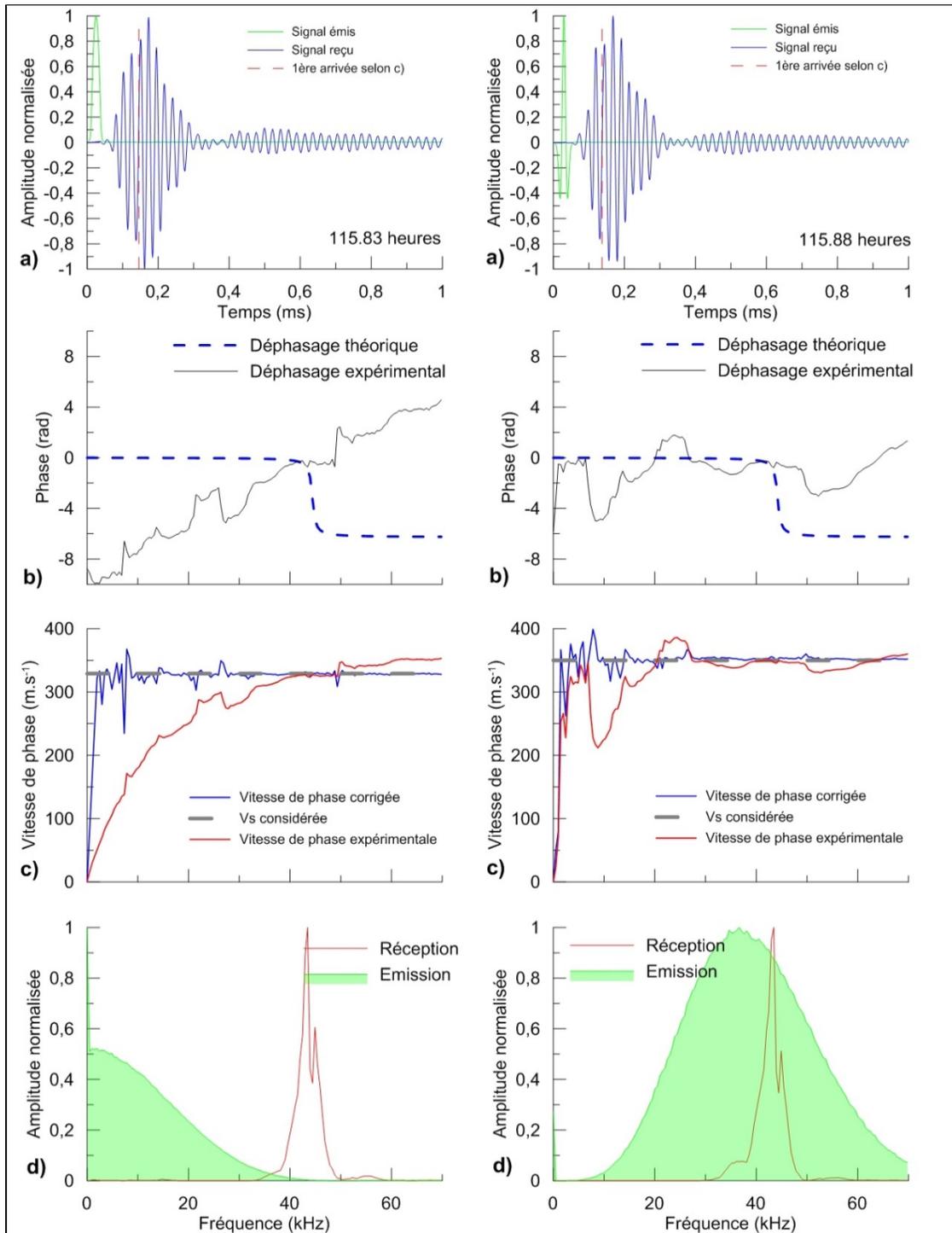
Figure-A II-9 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm



Test 23, plaque 1, transducteurs 22-16mm, Demi Sinus Arrondi 9kHz-12V-42dB, 99.86 heures; Ondelette 6kHz-12V-42dB, 100.01 heures.

a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A II-10 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm



Test 25, plaque 1, transducteurs 22-16mm, Demi Sinus Arrondi 9kHz-12V-42dB, 115.83 heures; Ondelette 8kHz-12V-42dB, 115.88 heures.

a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A II-11 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

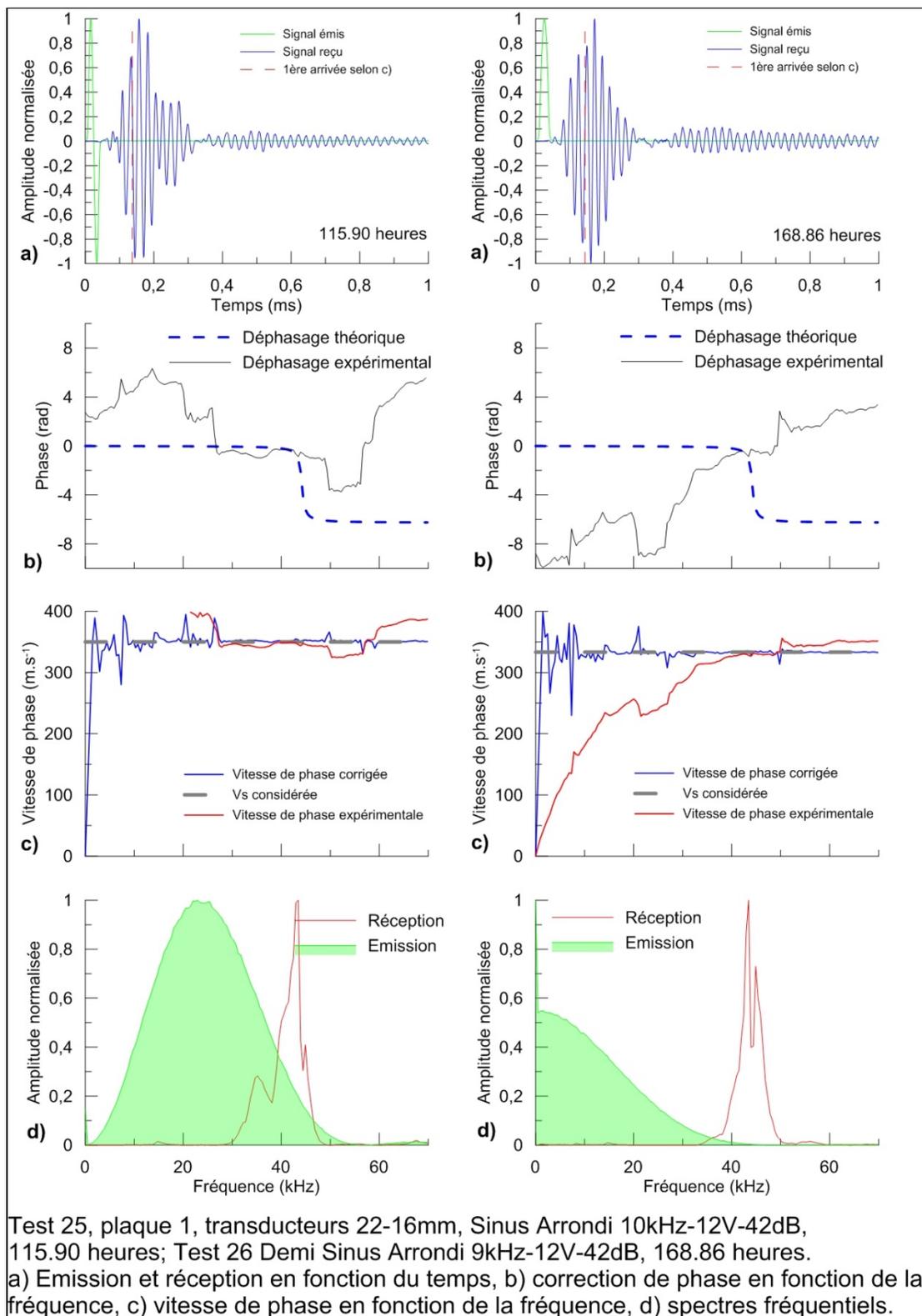
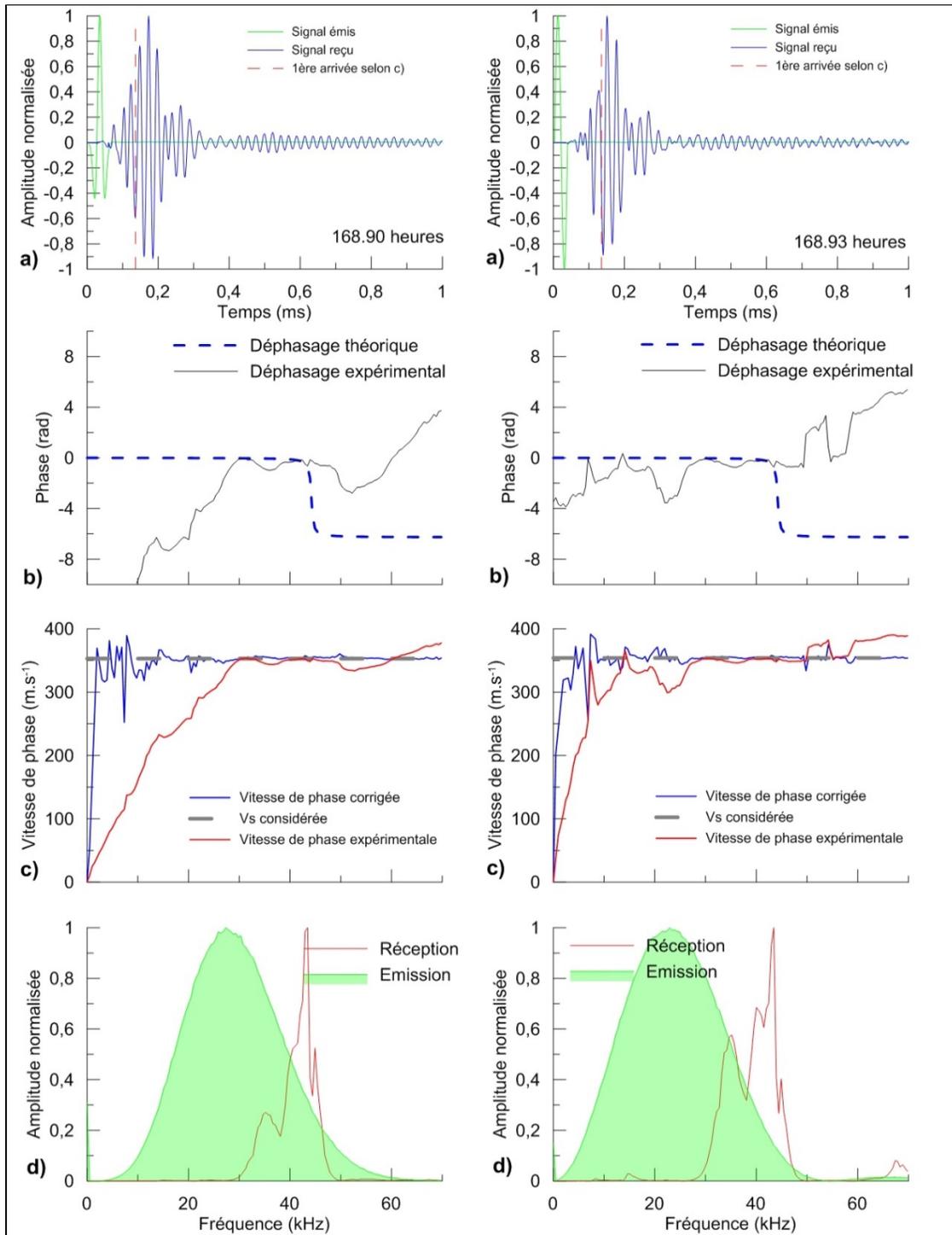


Figure-A II-12 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm



Test 26, plaque 1, transducteurs 22-16mm, Ondelette 6kHz-12V-42dB, 168.90 heures; Sinus Arrondi 9kHz-12V-42dB, 168.93 heures.

a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A II-13 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

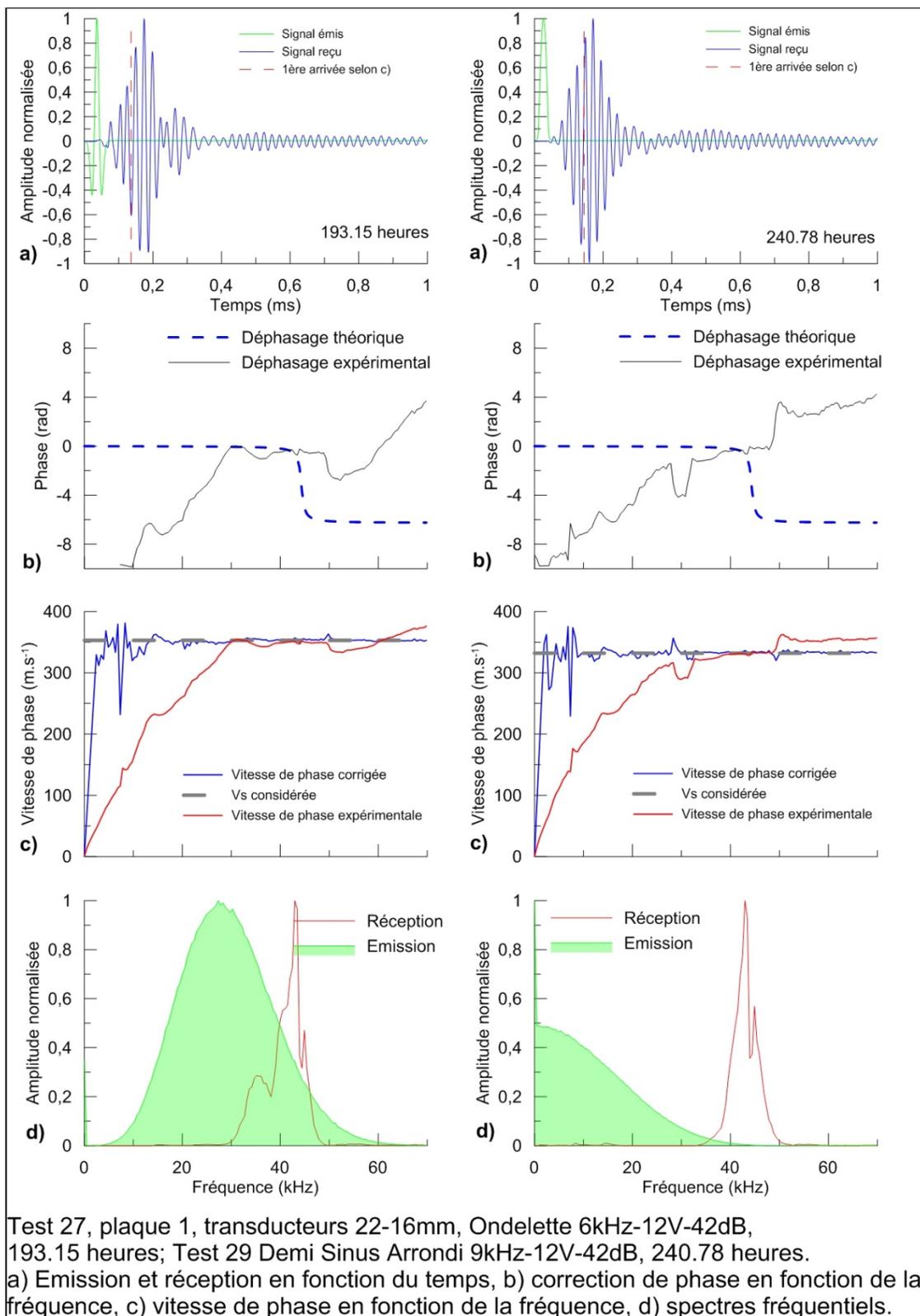


Figure-A II-14 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

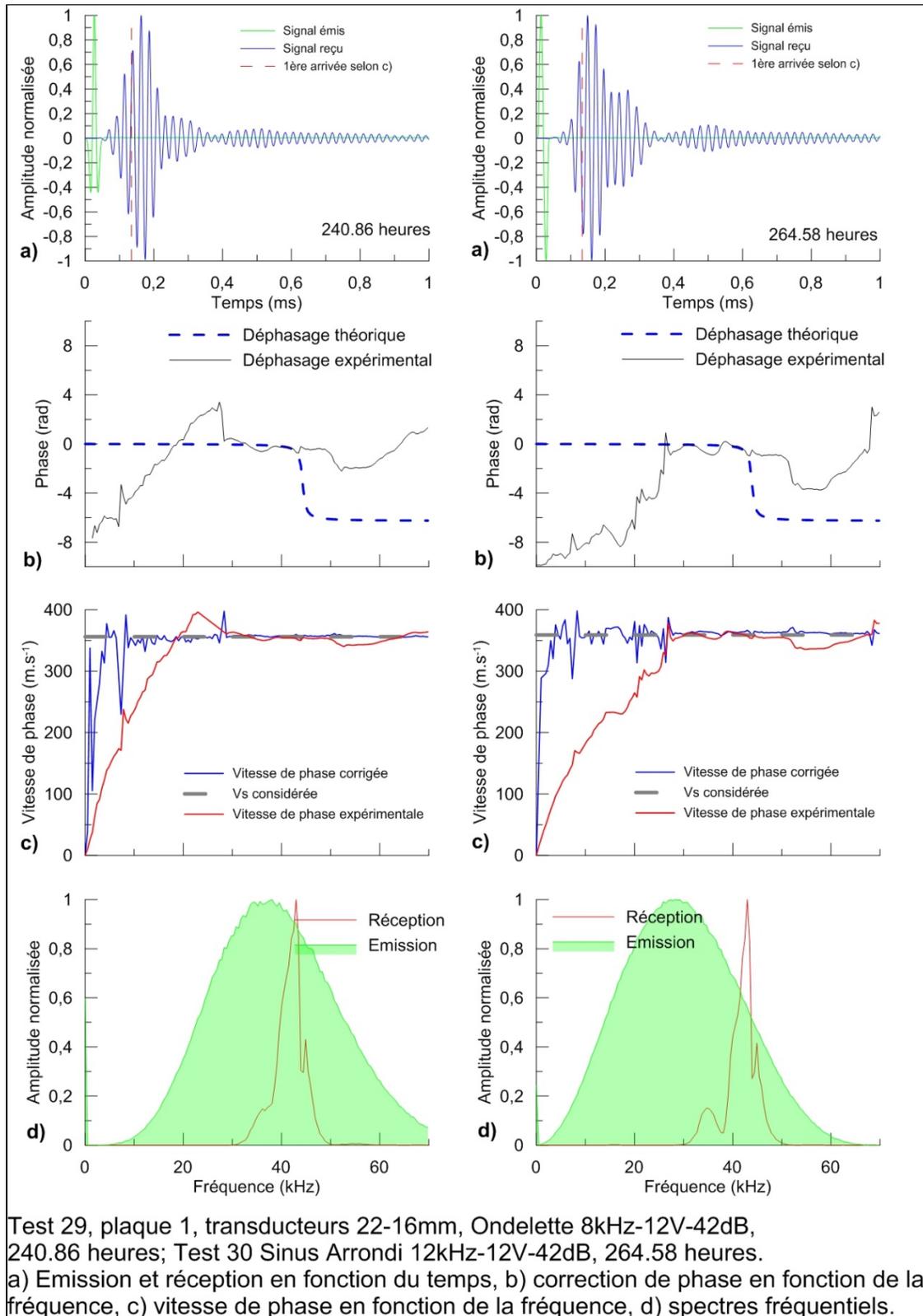


Figure-A II-15 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

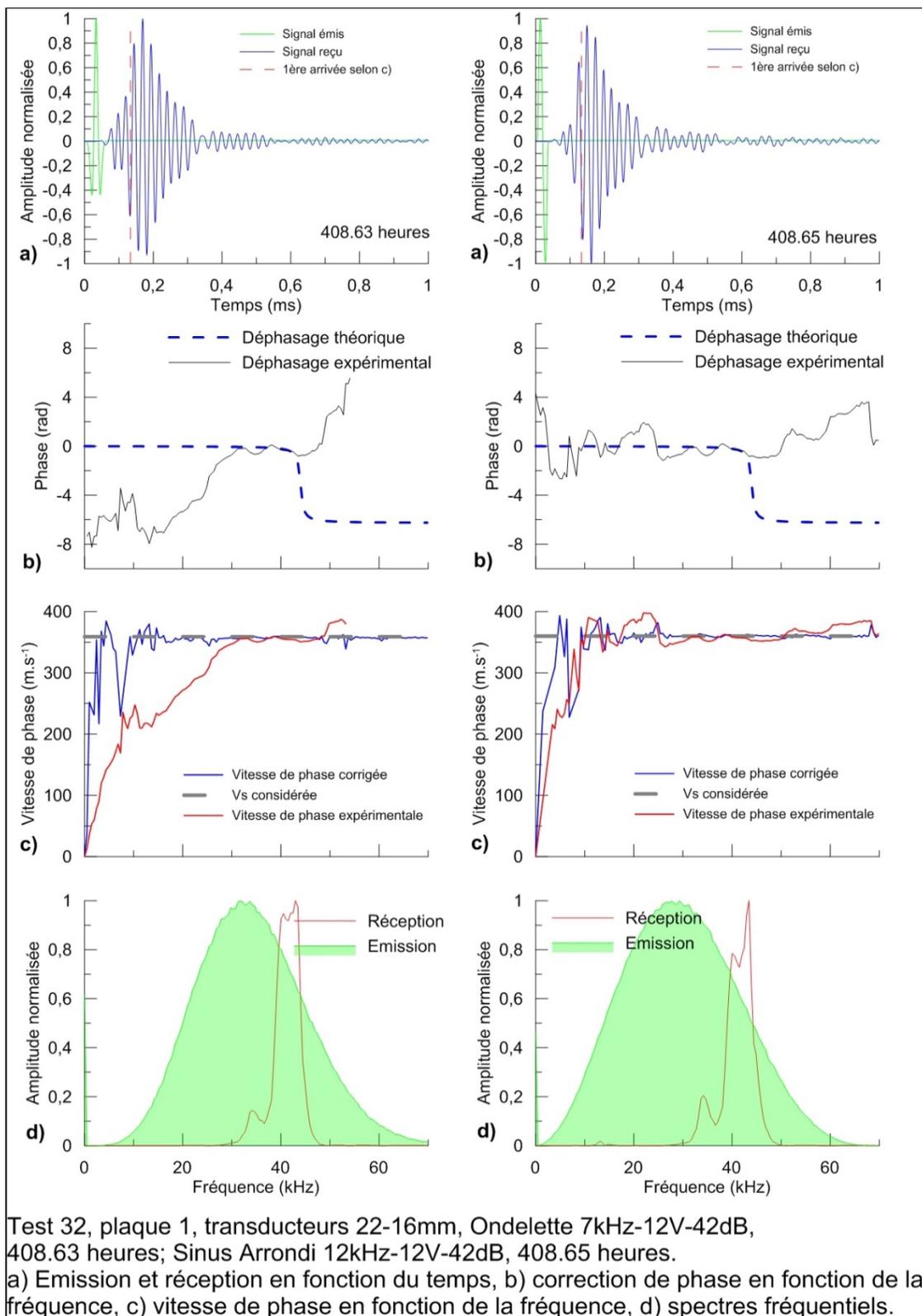
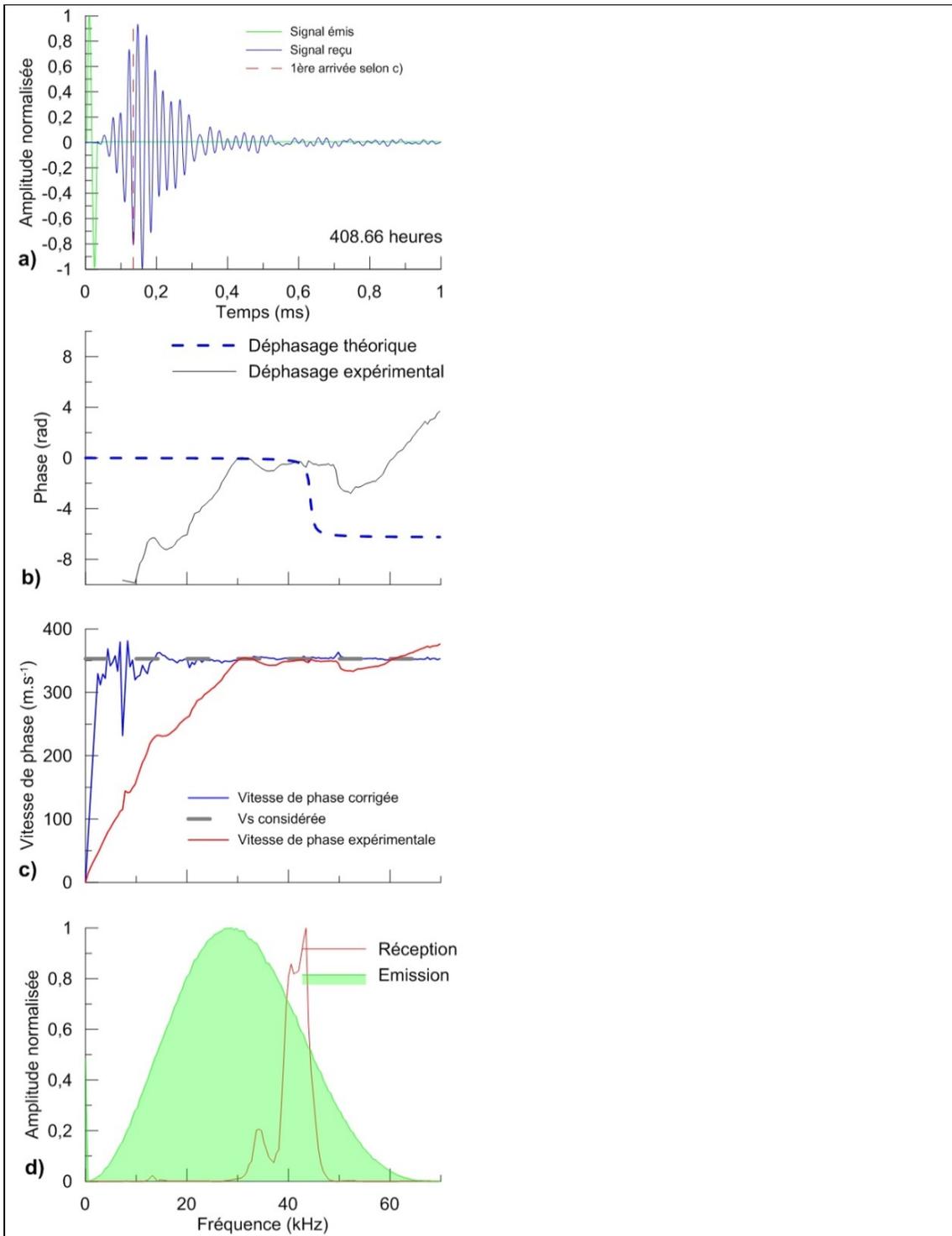


Figure-A II-16 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm



Test 32, plaque 1, transducteurs 22-16mm, Sinus 15kHz-12V-42dB, 408.66 heures.
 a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A II-17 Plaque 1, transducteurs 22-16 mm

ANNEXE III

Analyse fréquentielle plaque 1, transducteurs 38-34 mm

Tableau-A III-1 Tableau récapitulatif des valeurs obtenues et utilisées pour le couple 38-34 mm, plaque 1

Test	Heure	Jour	Heure	Signal d'entrée				Vs mesurée	Vs réelle	Masse d'eau
1	15:14:00	0,010	0,233	DSA	5	12	14	257	259,73	547,55
1	15:11:00	0,008	0,183	Ondelette	3	12	14	255	257,71	548,60
2	16:00:00	0,042	1,000	DSA	5	12	28	261	263,77	531,63
2	16:05:00	0,045	1,083	SA	5	12	14	261	263,77	529,93
5	18:11:00	0,133	3,183	DSA	5	12	14	279	281,96	488,89
5	18:13:00	0,134	3,217	Ondelette	3	12	14	284	287,02	488,26
6	18:57:00	0,165	3,950	DSA	5	12	14	284	287,02	474,77
7	20:12:00	0,217	5,200	DSA	8	12	14	285	288,03	452,73
7	20:17	0,220	5,283	SA	5	12	14	284	287,02	451,30
9	22:48:00	0,325	7,800	DSA	8	12	14	296	299,15	410,62
9	23:01:00	0,334	8,017	SA	5	12	14	295	298,13	407,34
10	00:00:00	0,375	9,000	DSA	8	12	14	298	301,17	392,84
11	08:35:00	0,733	17,583	DSA	5	12	14	319	322,39	293,64
11	08:38:00	0,735	17,633	Ondelette	3	12	14	317	320,37	293,20
13	11:23:00	0,849	20,383	DSA	5	12	14	319	322,39	270,95
14	14:00:00	0,958	23,000	Ondelette	3	12	14	323	326,43	253,59
14	13:54:00	0,954	22,900	DSA	5	12	14	320	323,40	254,19
16	21:50:00	1,285	30,833	SA	5	12	14	324	327,44	223,52
17	23:53:00	1,370	32,883	DSA	5	12	14	329	332,50	218,61
18	11:42:00	1,863	44,700	DSA	5	12	14	329	332,50	195,39
18	11:46:00	1,865	44,767	SA	5	12	14	333	336,54	195,28
20	17:04:00	2,086	50,067	Ondelette	4	12	14	335	338,56	187,07
20	17:02:00	2,085	50,033	DSA	8	12	14	337	340,58	187,12
23	18:36:00	3,150	75,600	SA	5	12	14	347	350,69	157,42
23	18:32:00	3,147	75,533	DSA	10	12	14	346	349,68	157,49
24	12:03:00	3,877	93,050	DSA	8	12	14	347	350,69	141,56
25	10:17:00	4,803	115,283	DSA	8	12	14	349	352,71	127,36
26	15:39:00	7,027	168,650	SA	5	12	14	354	357,76	104,23
27	15:53	8,037	192,883	SA	4	12	14	356	359,78	95,77
30	15:20	11,014	264,333	SA	5	12	14	354	357,76	77,36
30	15:17	11,012	264,283	DSA	8	12	14	354	357,76	77,37
31	17:14	15,093	362,233	DSA	5	12	14	356	359,78	64,16
31	17:14	15,093	362,233	DSA	8	12	14	358	361,80	64,16
31	17:22	15,099	362,367	SA	5	12	14	356	359,78	64,15

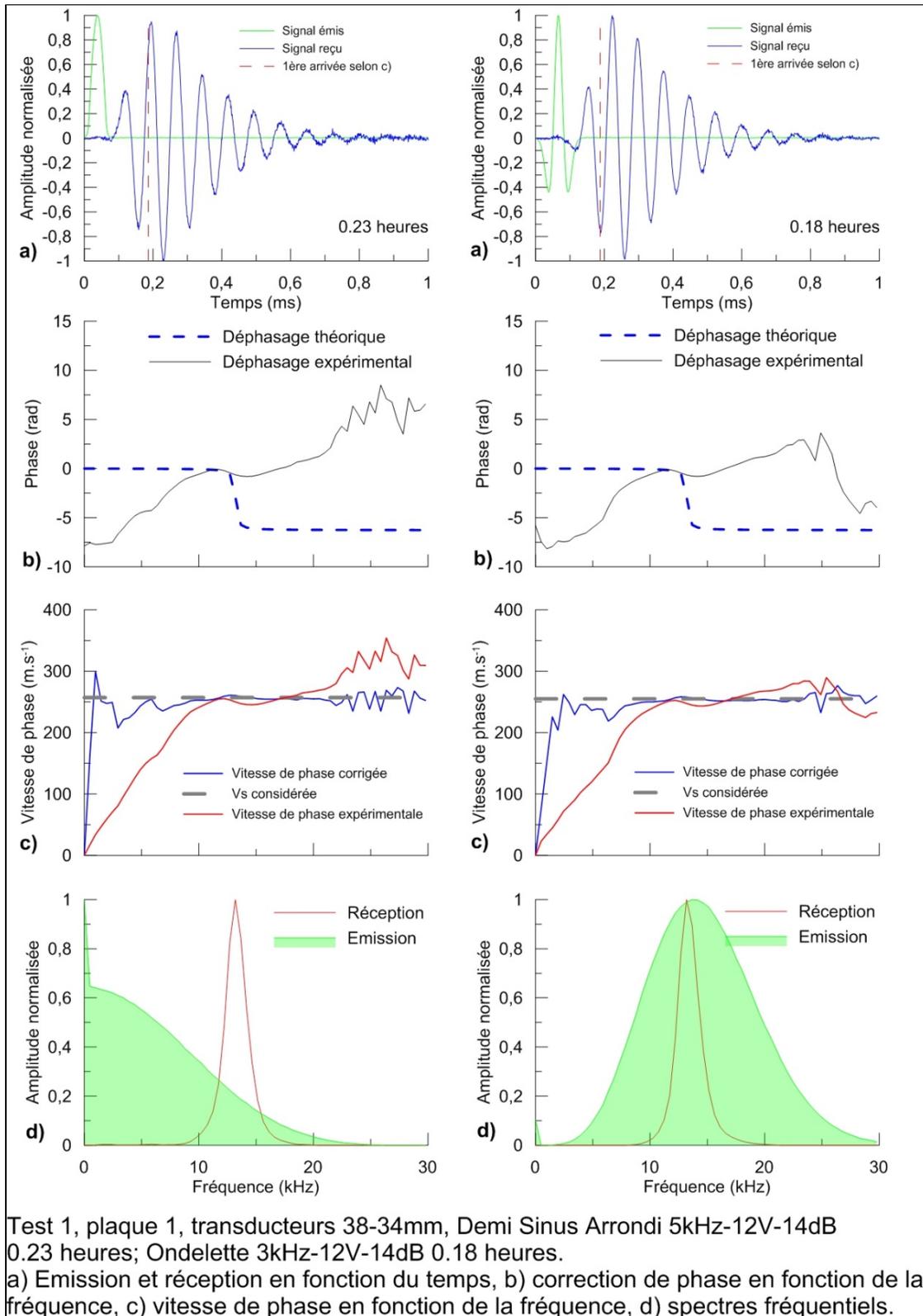


Figure-A III-1 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

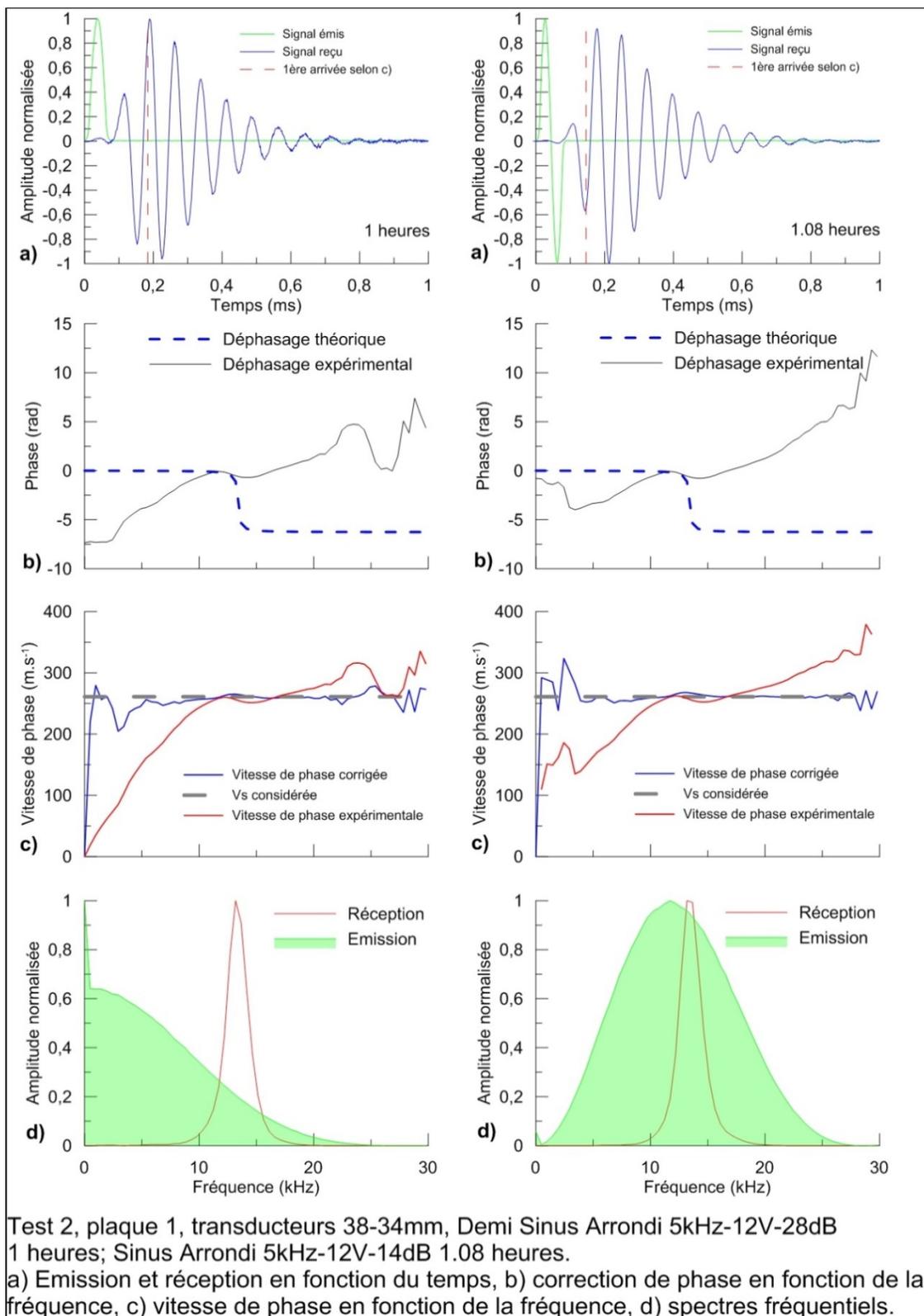


Figure-A III-2 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

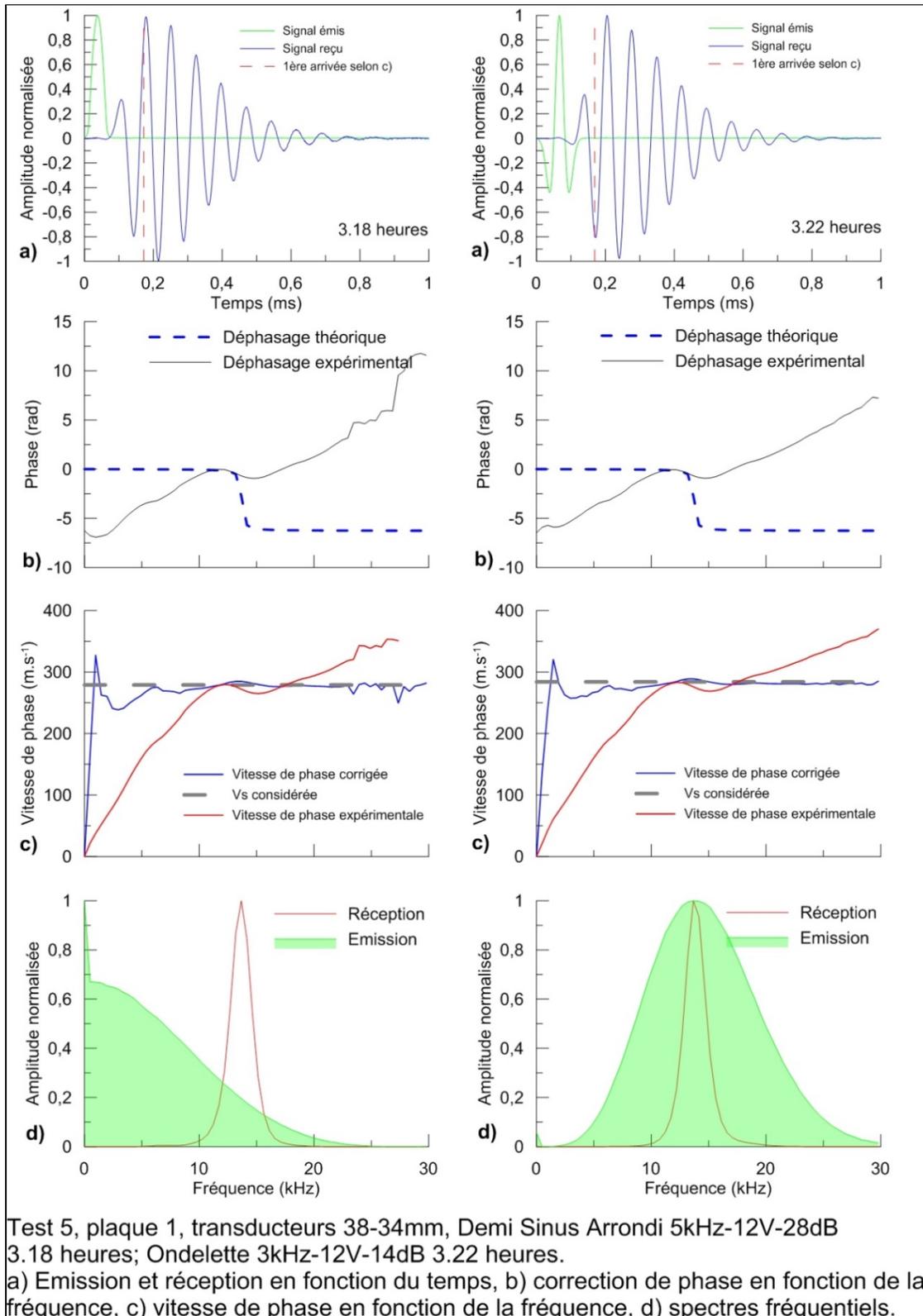


Figure-A III-3 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

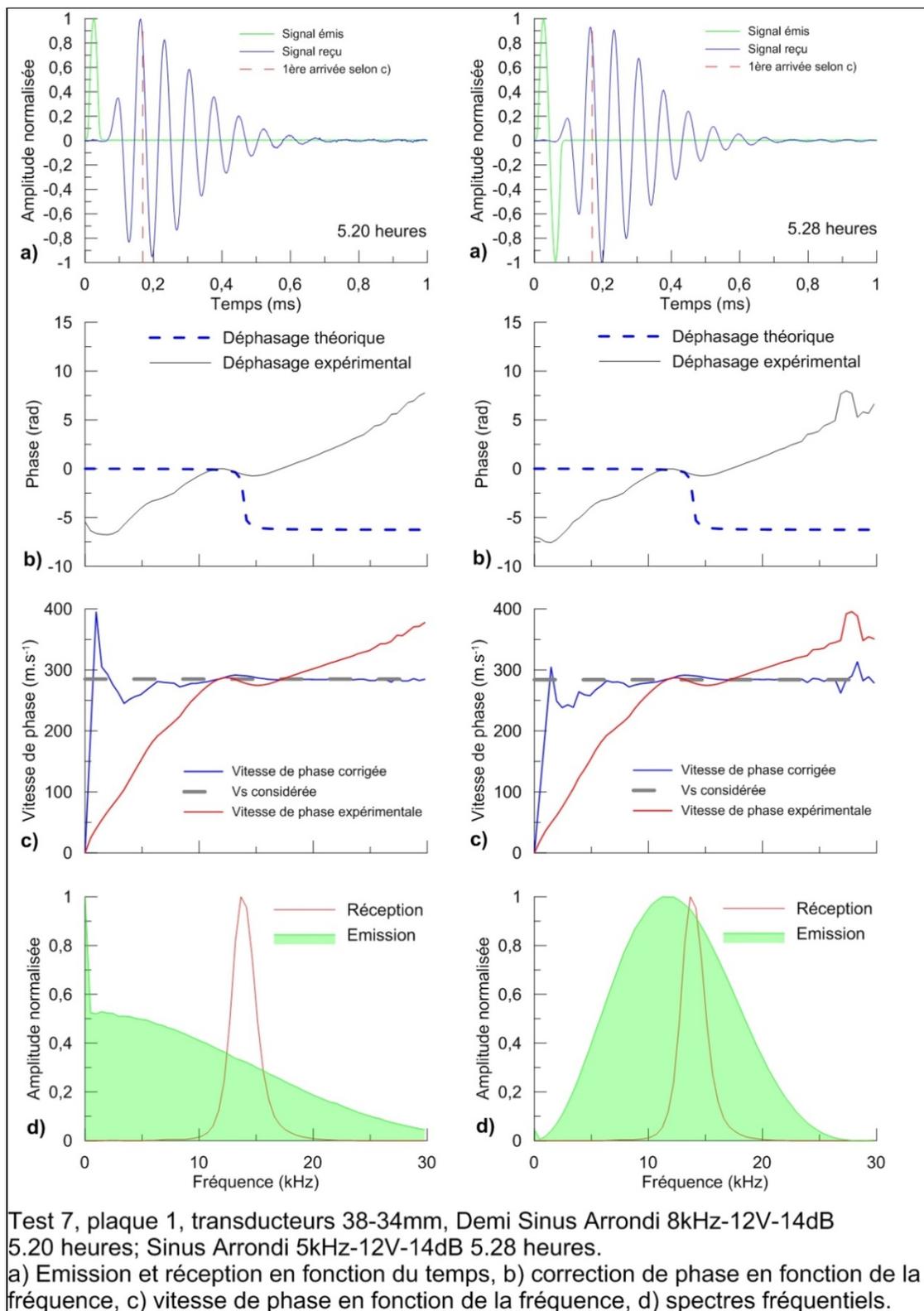


Figure-A III-4 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

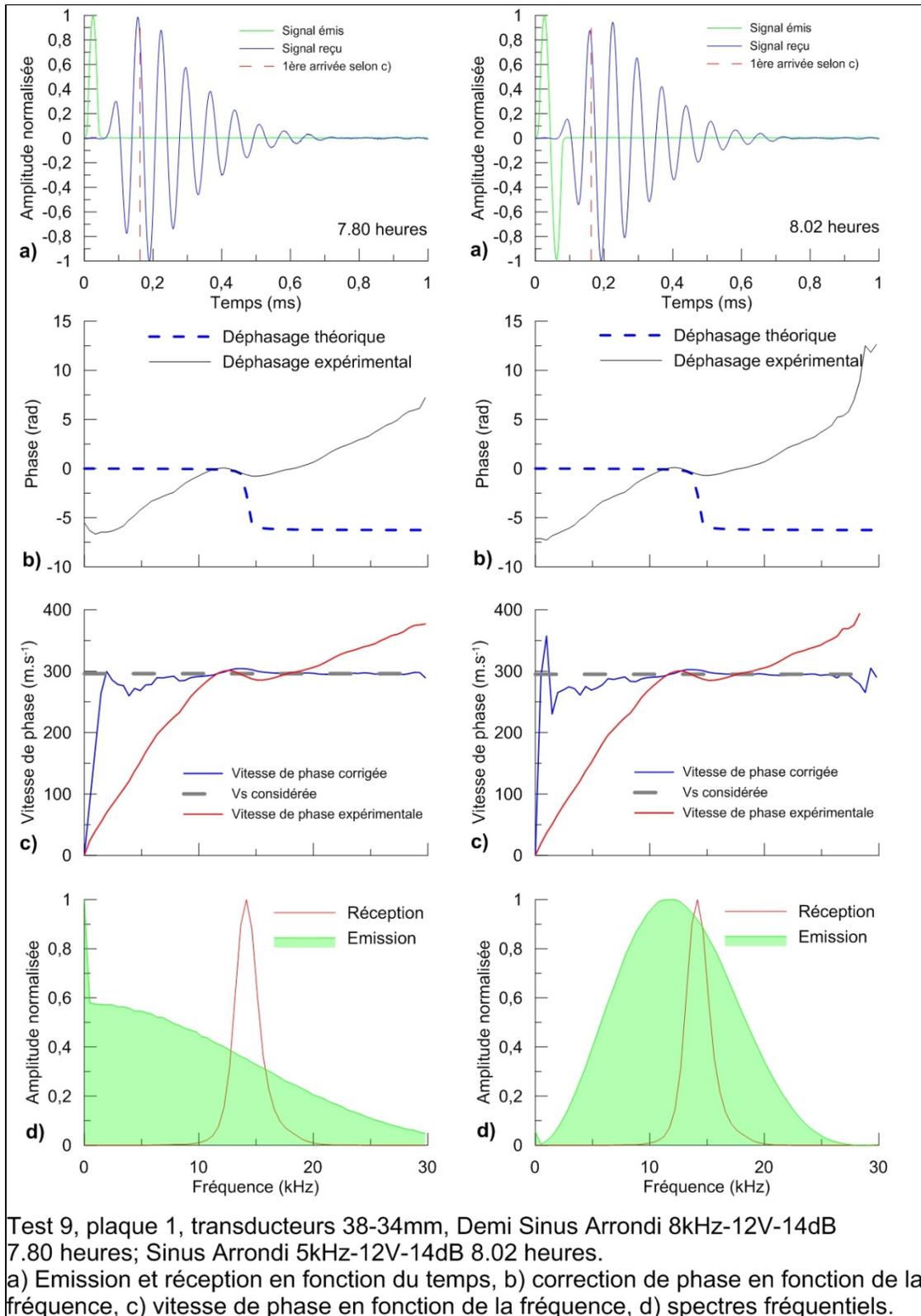


Figure-A III-5 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

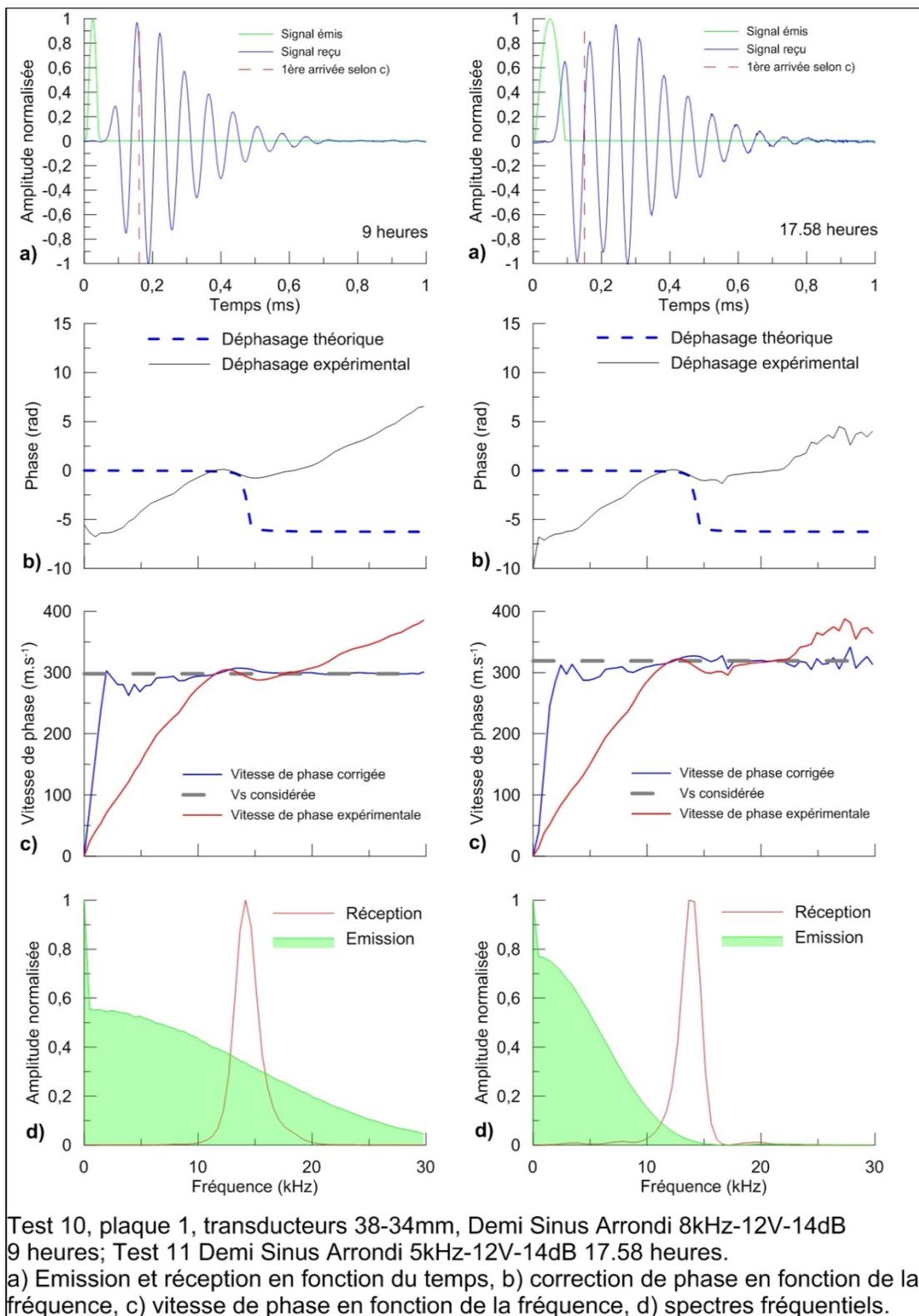


Figure-A III-6 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

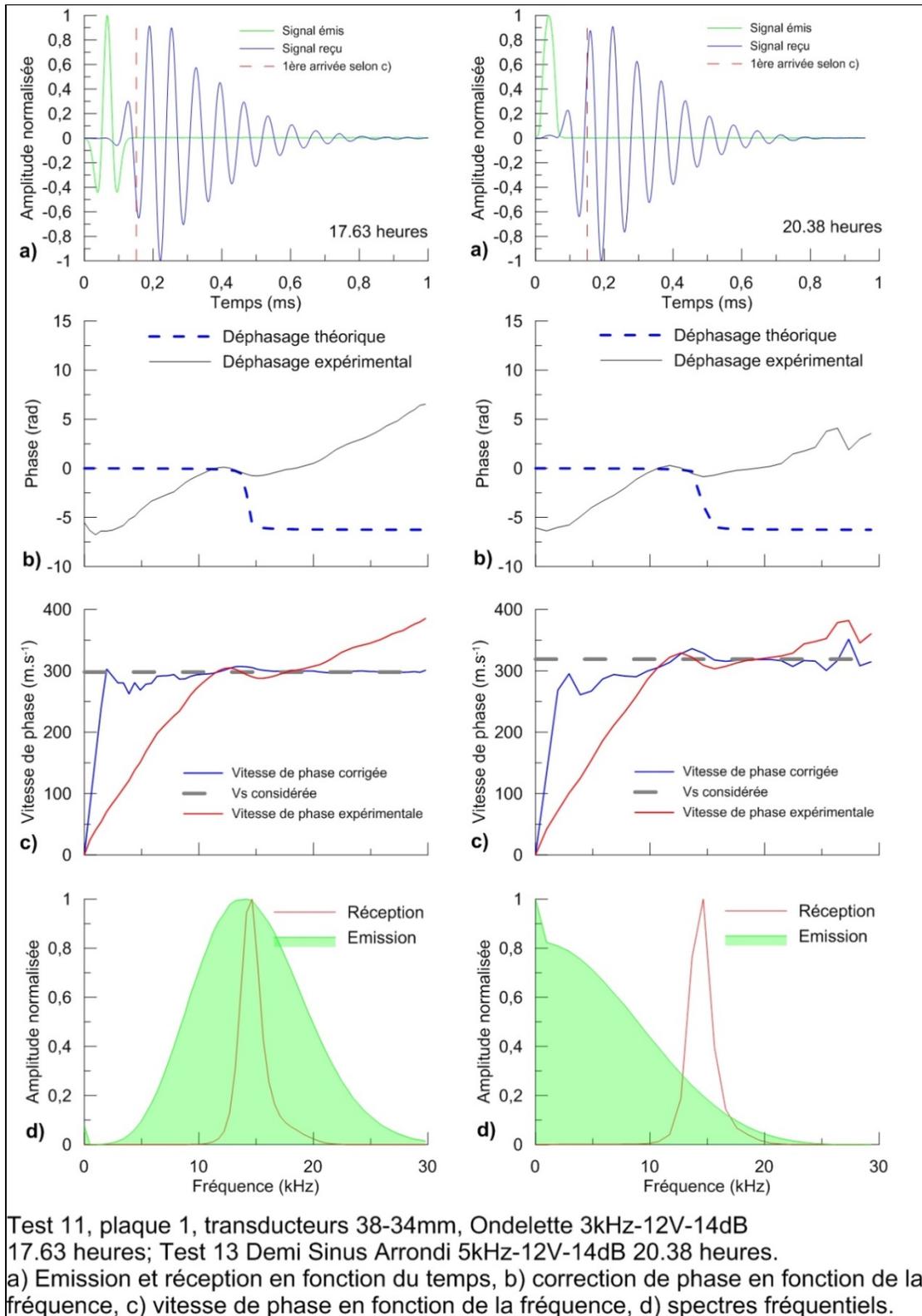


Figure-A III-7 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

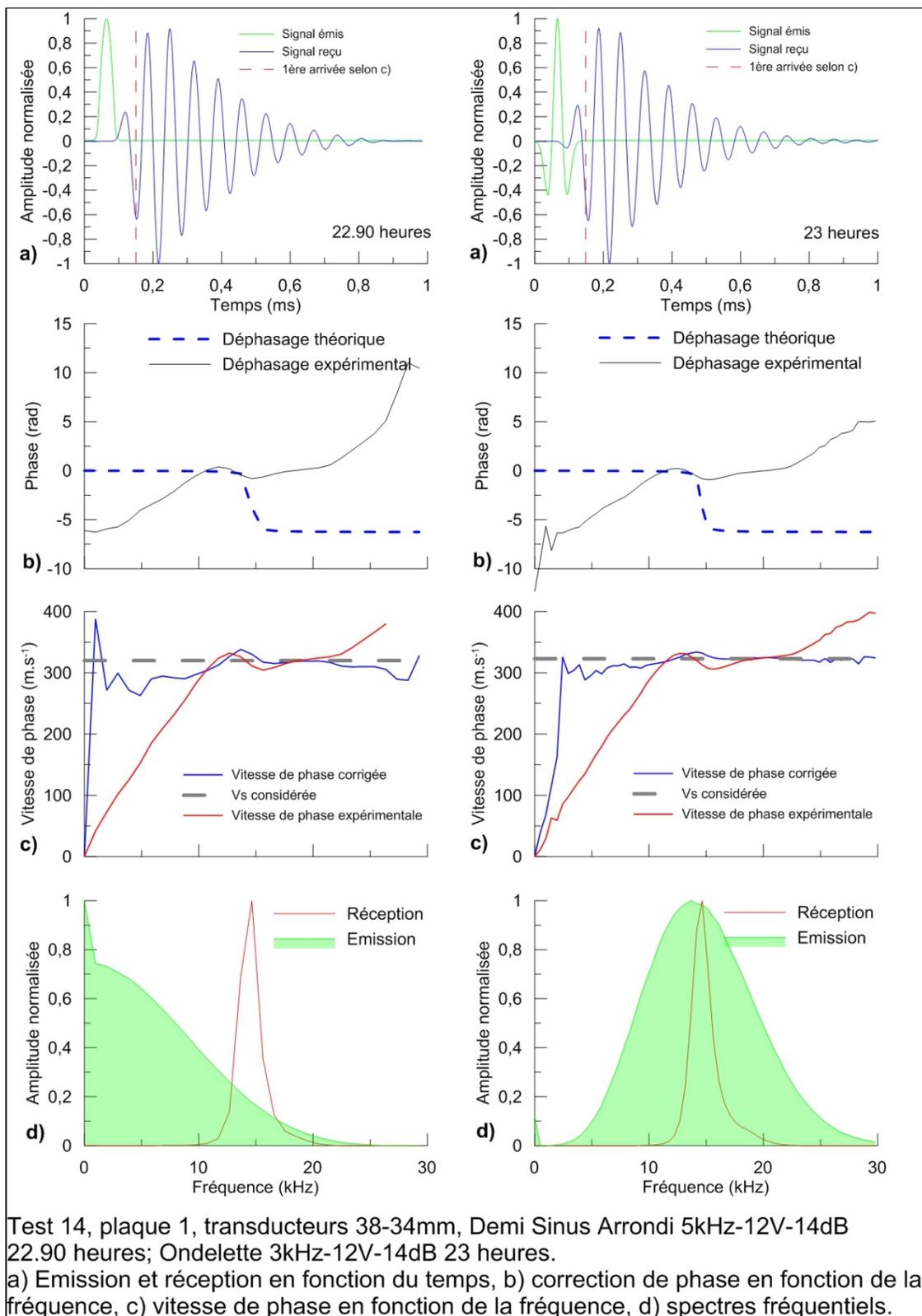
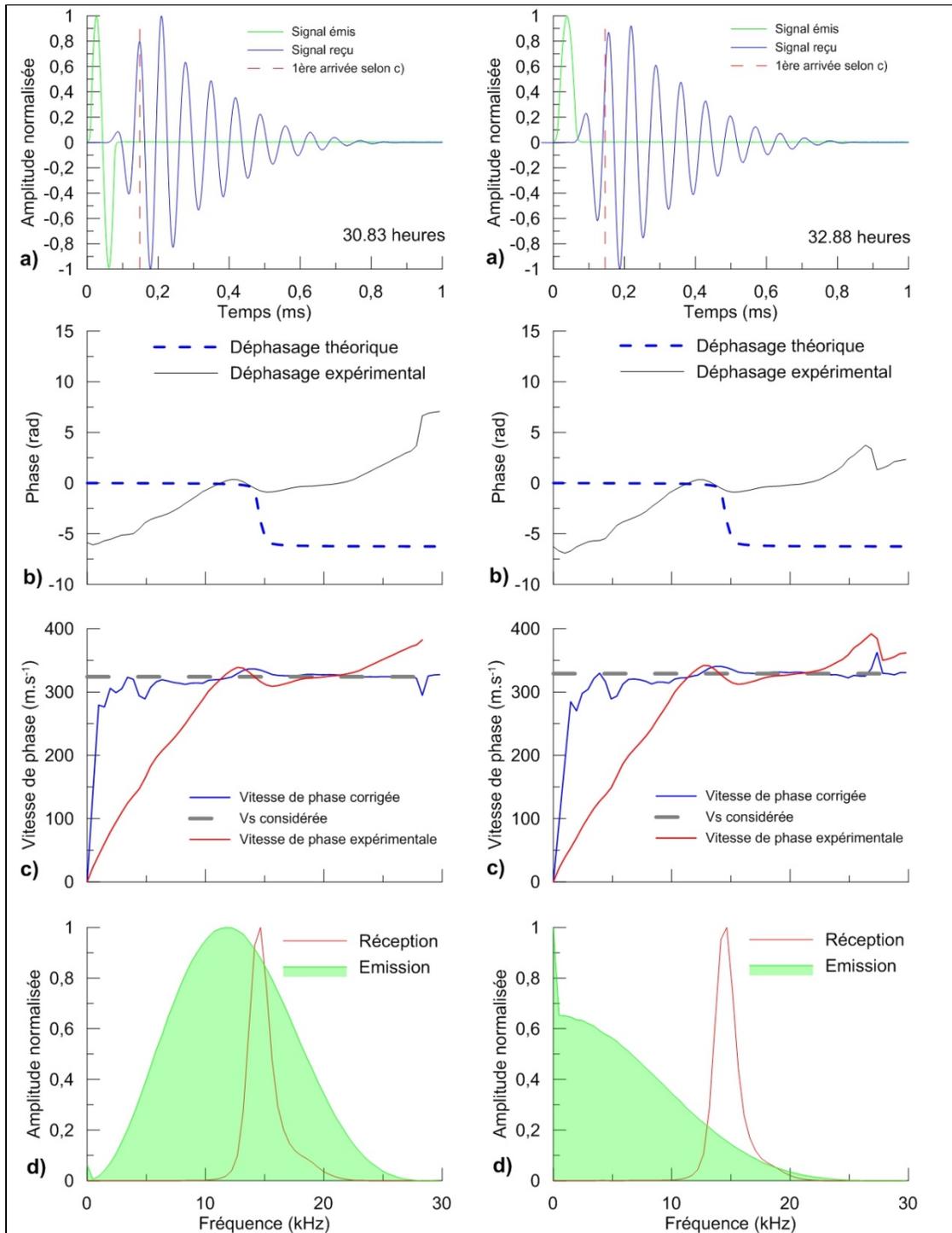


Figure-A III-8 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm



Test 16, plaque 1, transducteurs 38-34mm, Sinus Arrondi 5kHz-12V-14dB

30.83 heures; Test 17 Demi Sinus Arrondi 5kHz-12V-14dB 32.88 heures.

a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A III-9 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

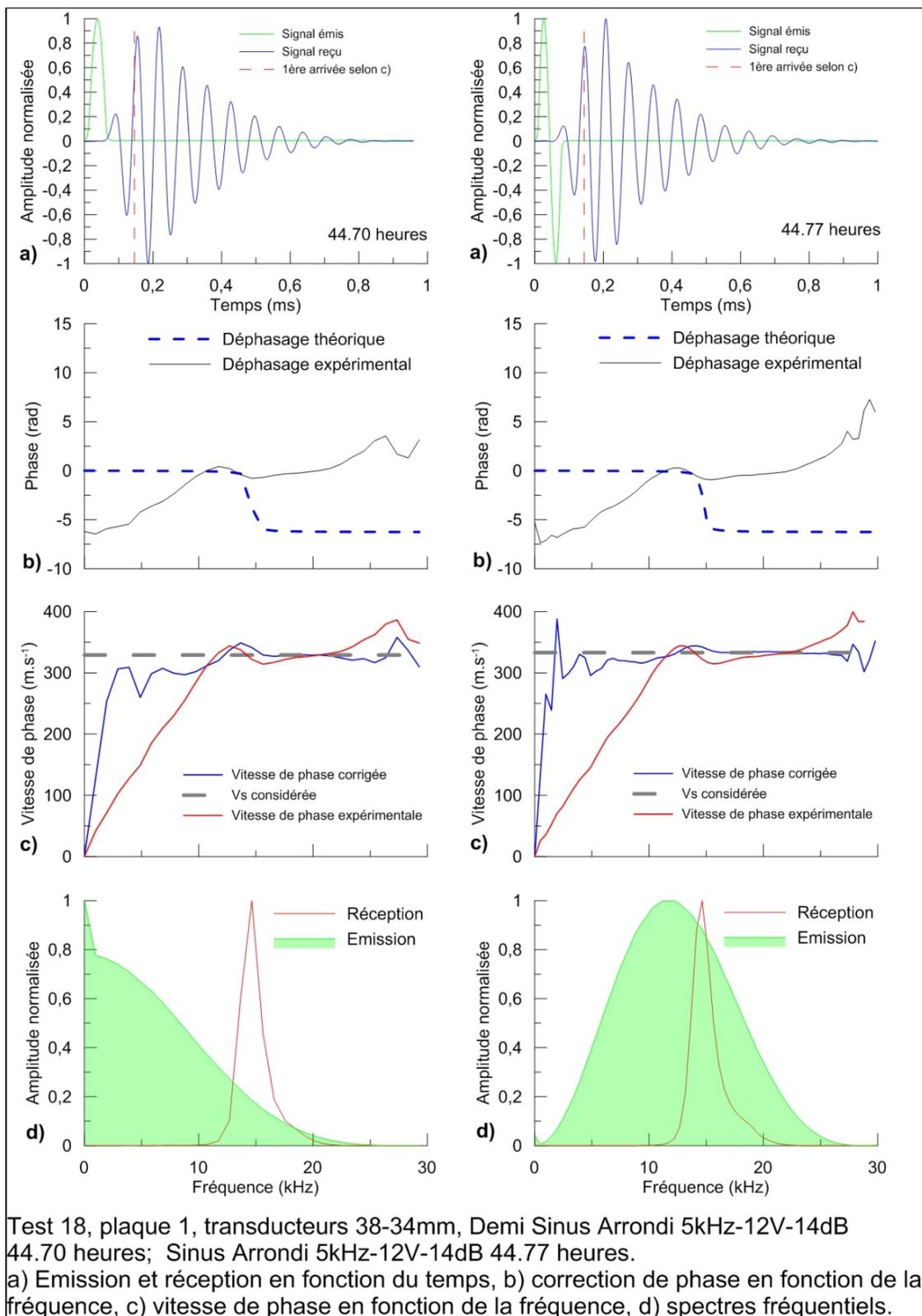


Figure-A III-10 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

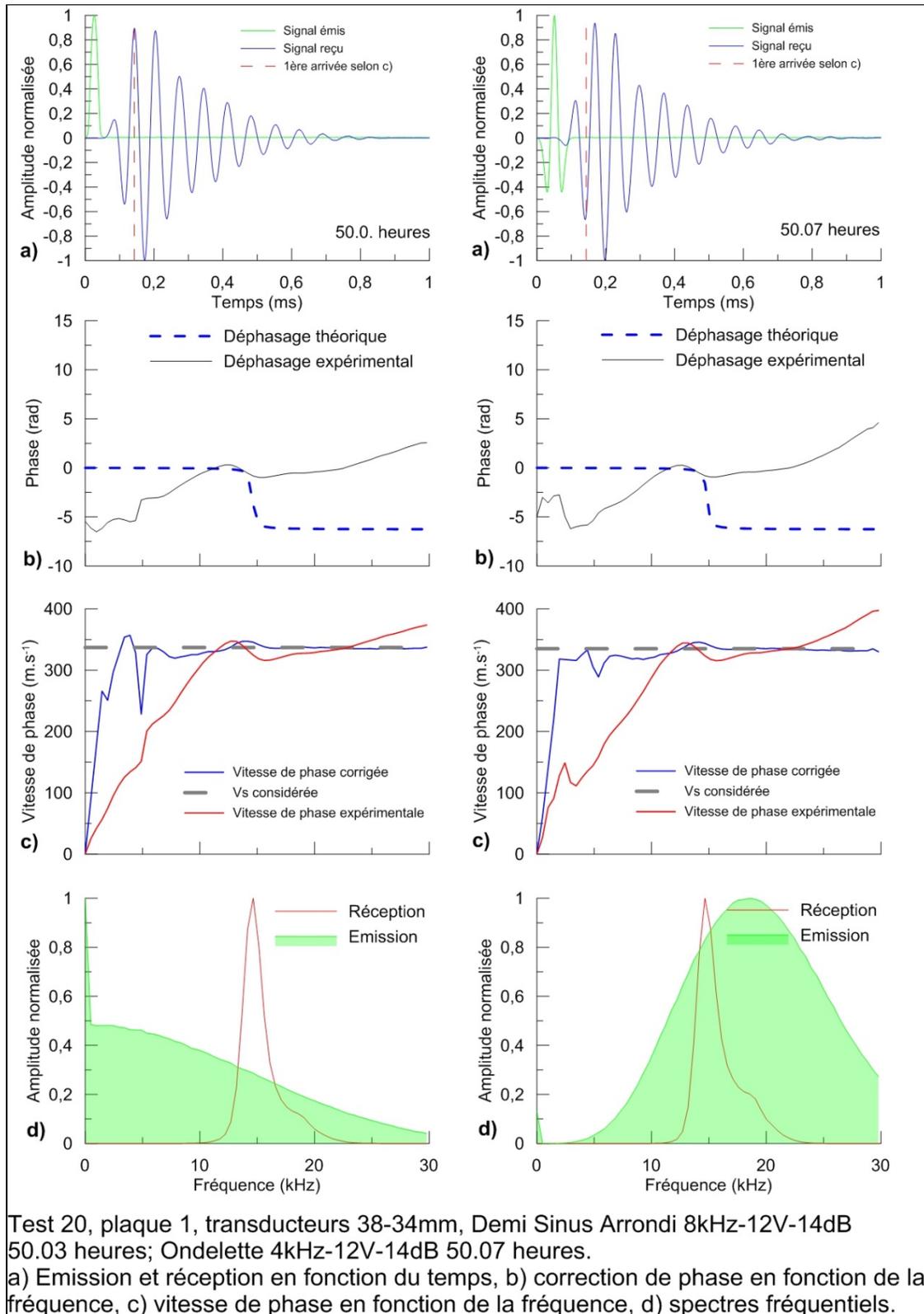


Figure-A III-11 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

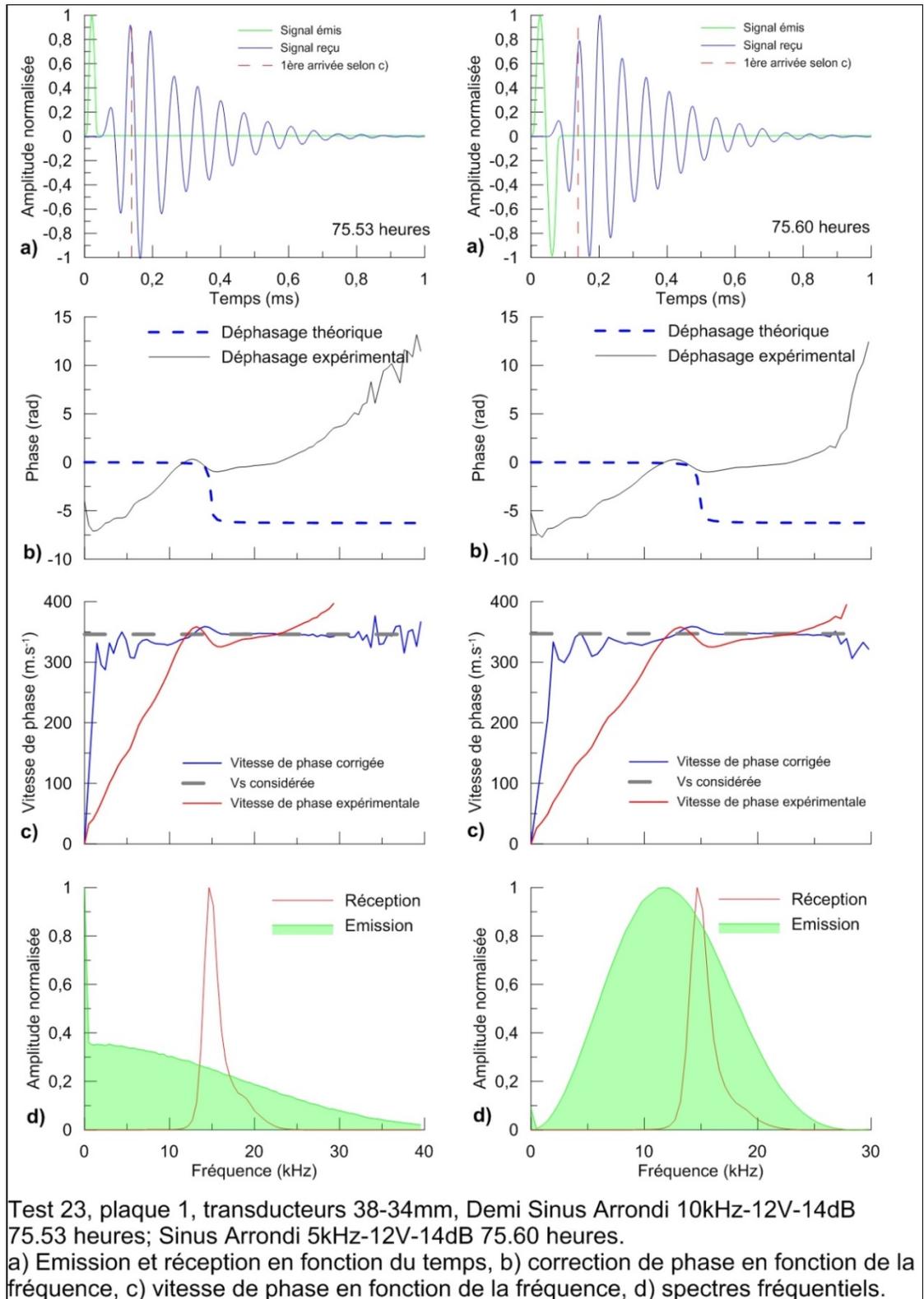


Figure-A III-12 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

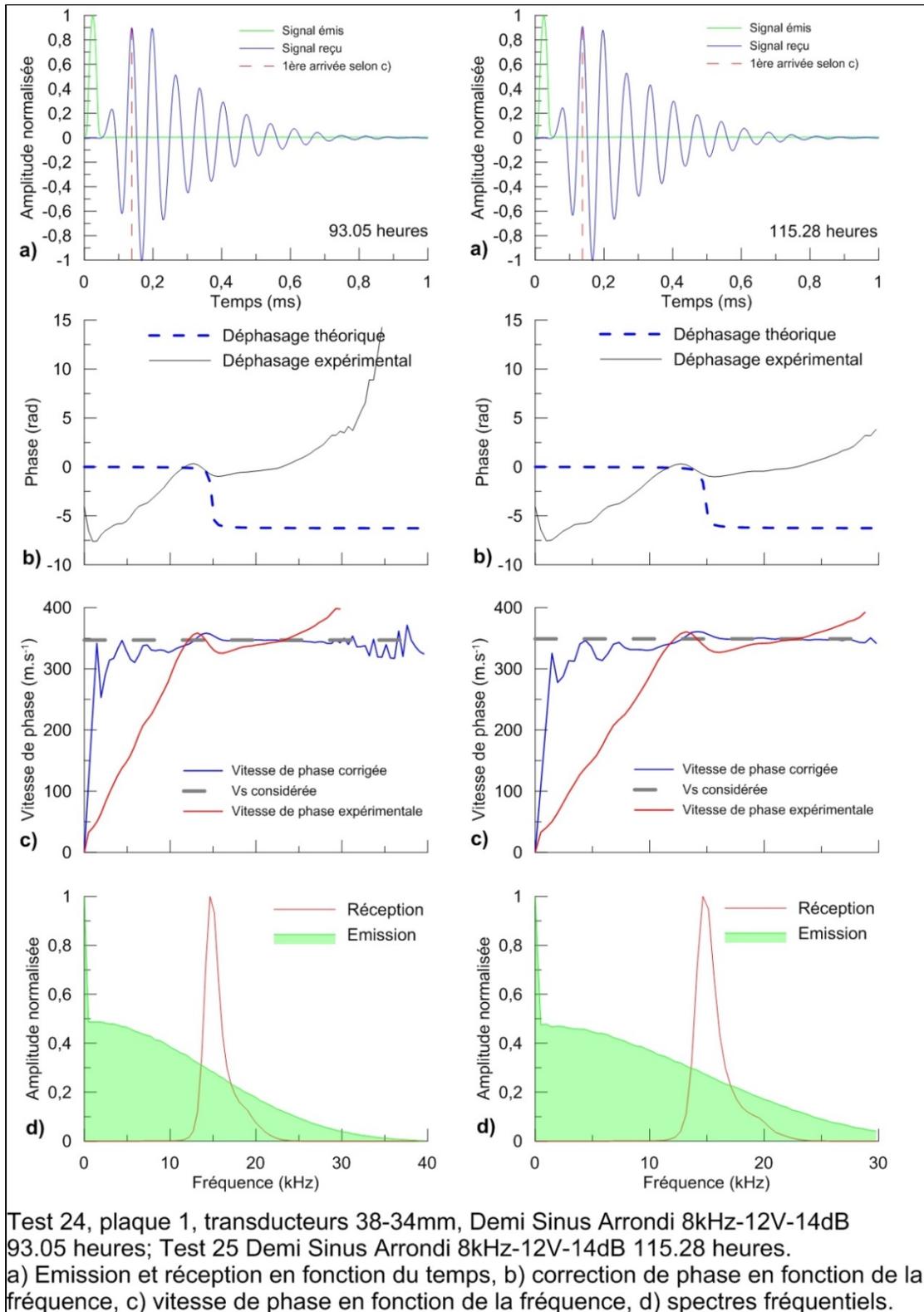


Figure-A III-13 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

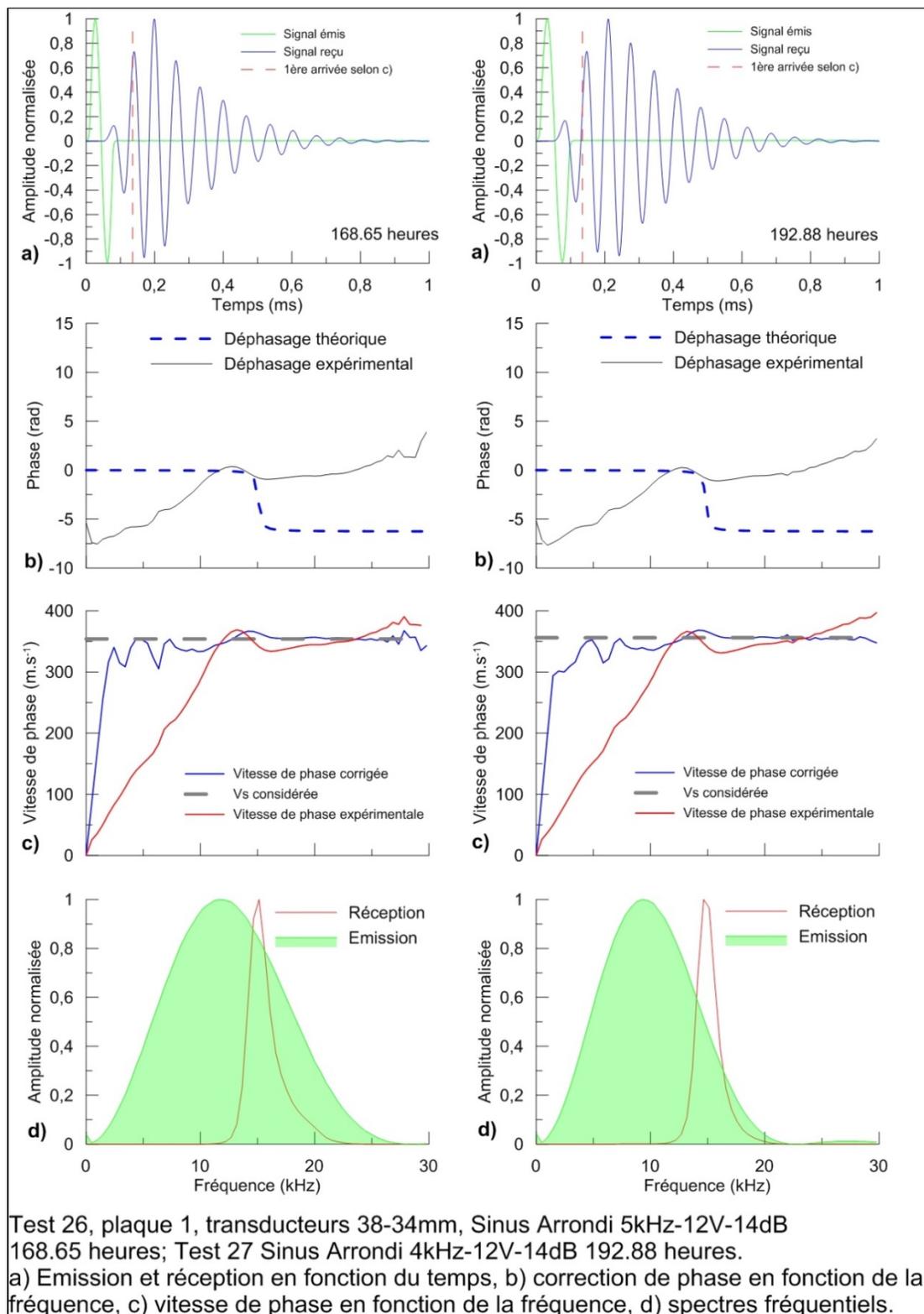


Figure-A III-14 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

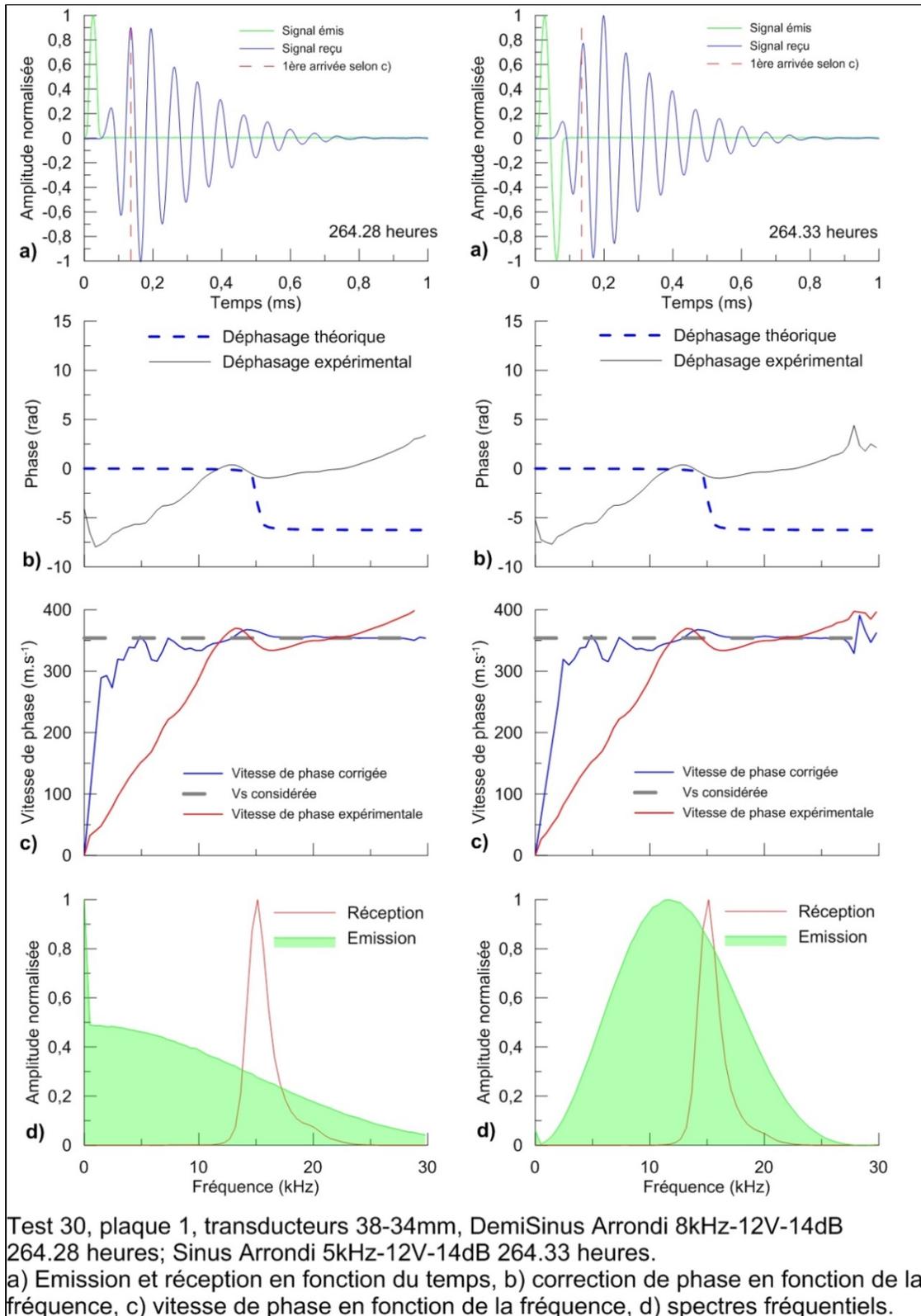


Figure-A III-15 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

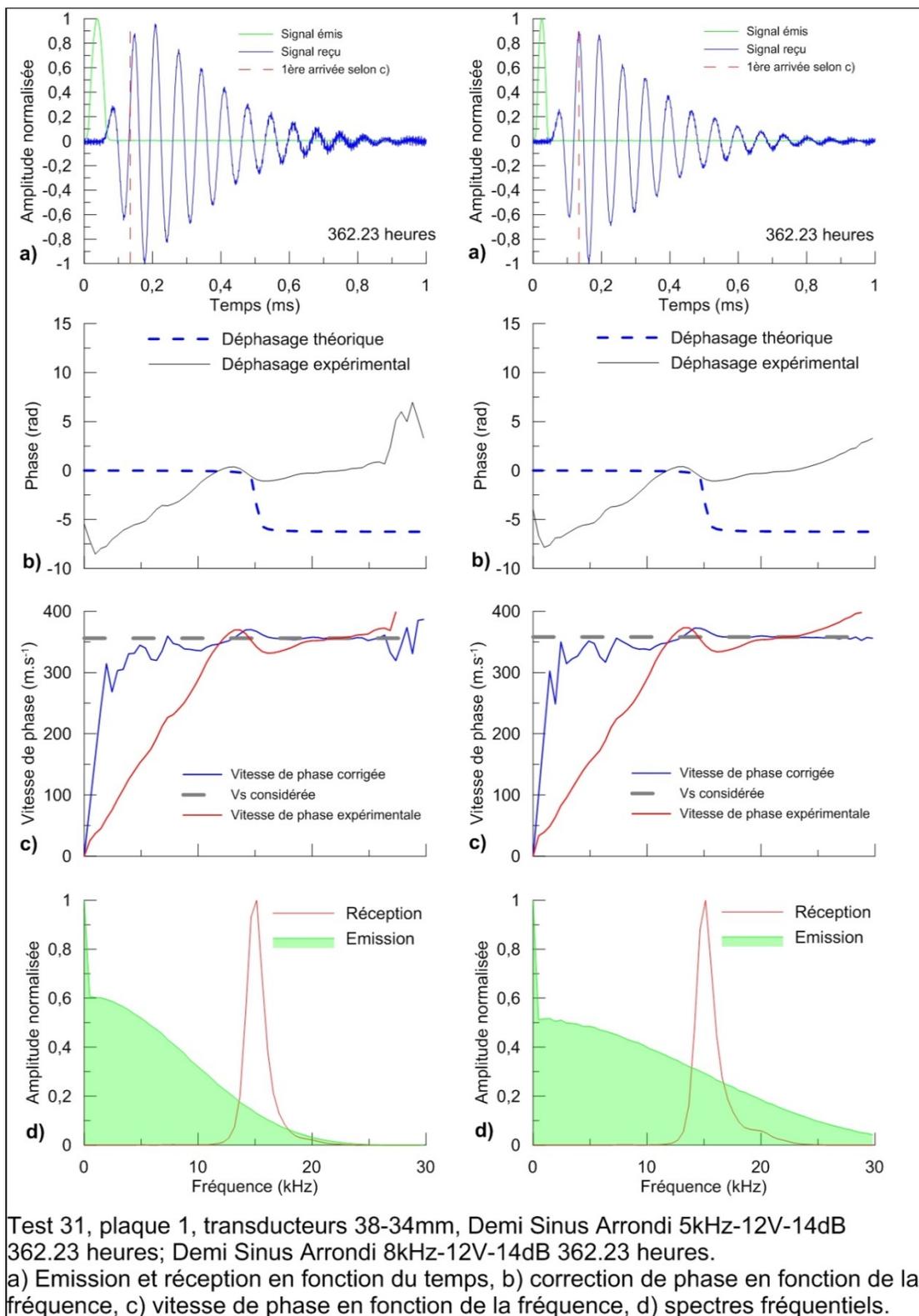


Figure-A III-16 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

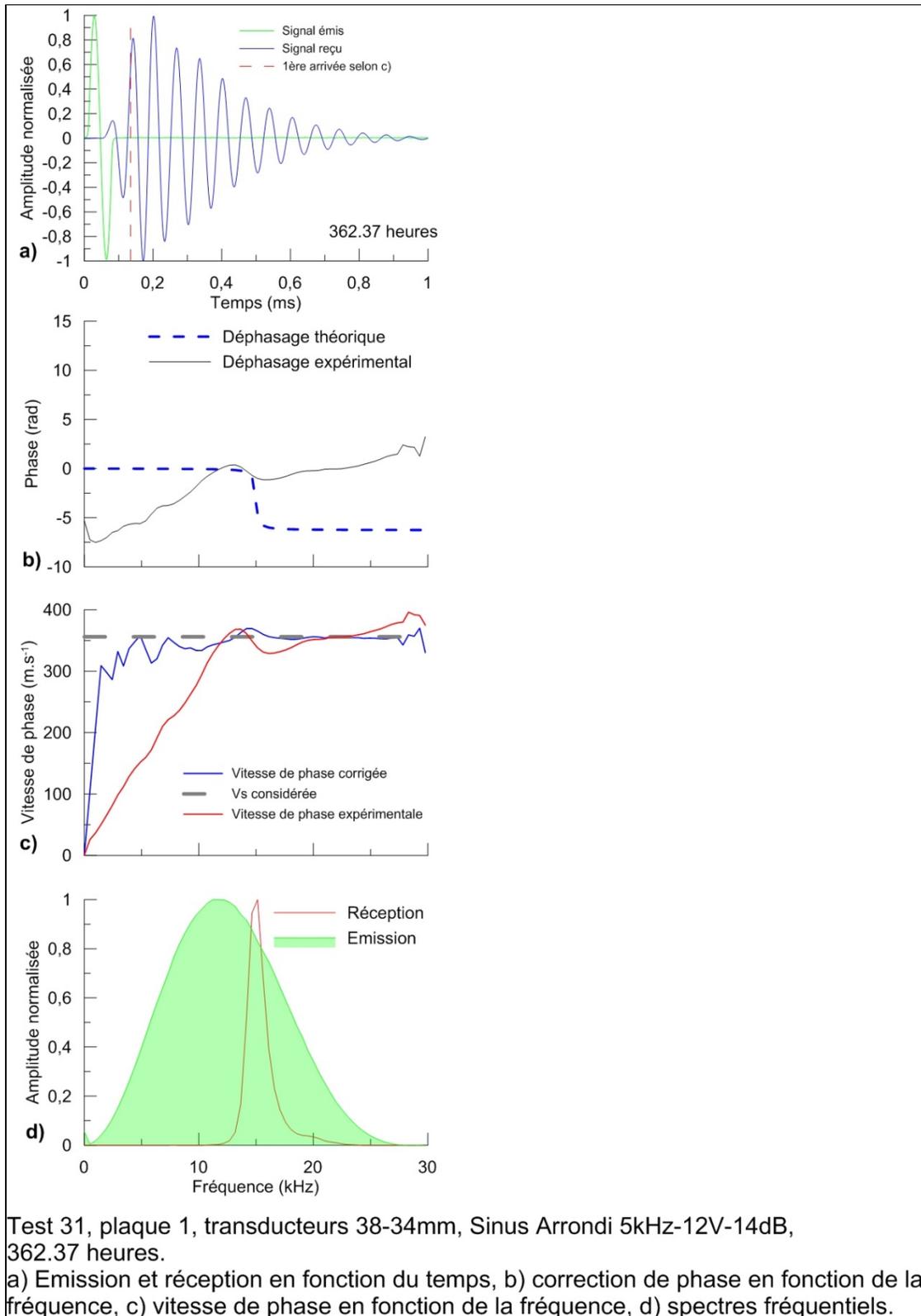


Figure-A III-17 Plaque 1, transducteurs 38-34 mm

ANNEXE IV

Analyse fréquentielle plaque 1, transducteurs 51-45

Tableau-A IV-1 Tableau récapitulatif des valeurs obtenues et utilisées pour le couple 51-45 mm, plaque 1

Test	Heure	Jour	Heure	Signal d'entrée	Vs mesurée	Vs réelle	Masse d'eau
1	15:27:00	0,019	0,450	DSA 3 12 14	271	271	543,00
2	16:12:00	0,050	1,200	DSA 3 12 14	284	284	527,55
2	16:21:00	0,056	1,350	Sinus 3 12 14	284	284	524,52
2	16:08:00	0,047	1,133	SA 3 12 14	282	282	528,91
3	16:49:00	0,076	1,817	DSA 3 12 14	285	285	515,19
3	16:54:00	0,079	1,900	SA 5 12 28	281	281	513,55
4	17:32:00	0,106	2,533	SA 3 12 28	300	300	501,21
4	17:24:00	0,100	2,400	DSA 3 12 14	296	296	503,78
6	19:08:00	0,172	4,133	Ondelette 3 12 14	321	321	326,09
6	19:07:00	0,172	4,117	Demi Sinus 5 12 14	320	320	326,18
6	19:05:00	0,170	4,083	DSA 5 12 14	321	321	326,37
30	15:26:00	11,018	264,433	Ondelette 2 12 14	376	376	77,34
30	15:23:00	11,016	264,383	DSA 3 12 14	379	379	77,35
32	15:45	16,031	384,750	Ondelette 2 12 14	378	378	62,48

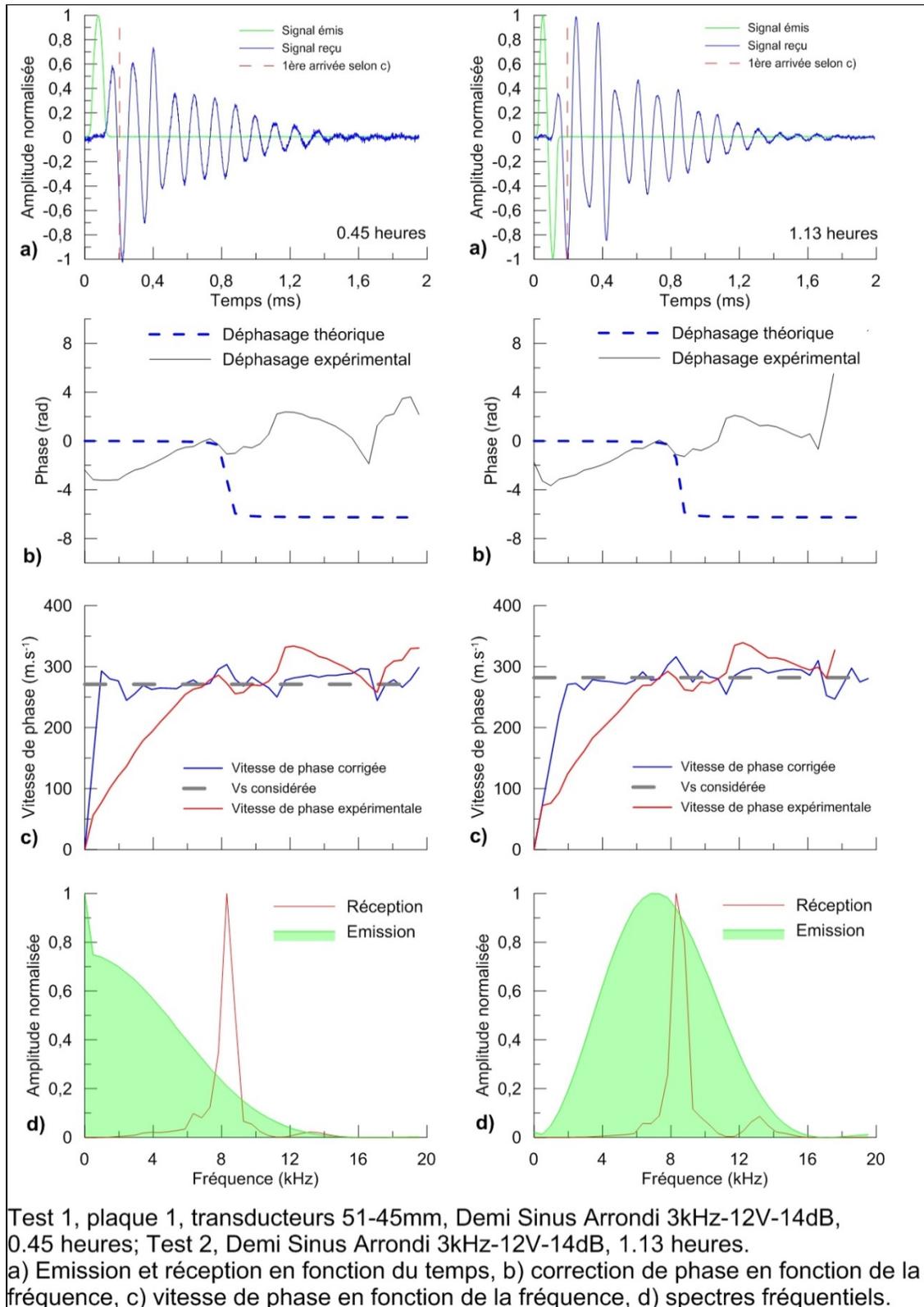


Figure-A IV-1 Plaque 1, transducteurs 51-45 mm

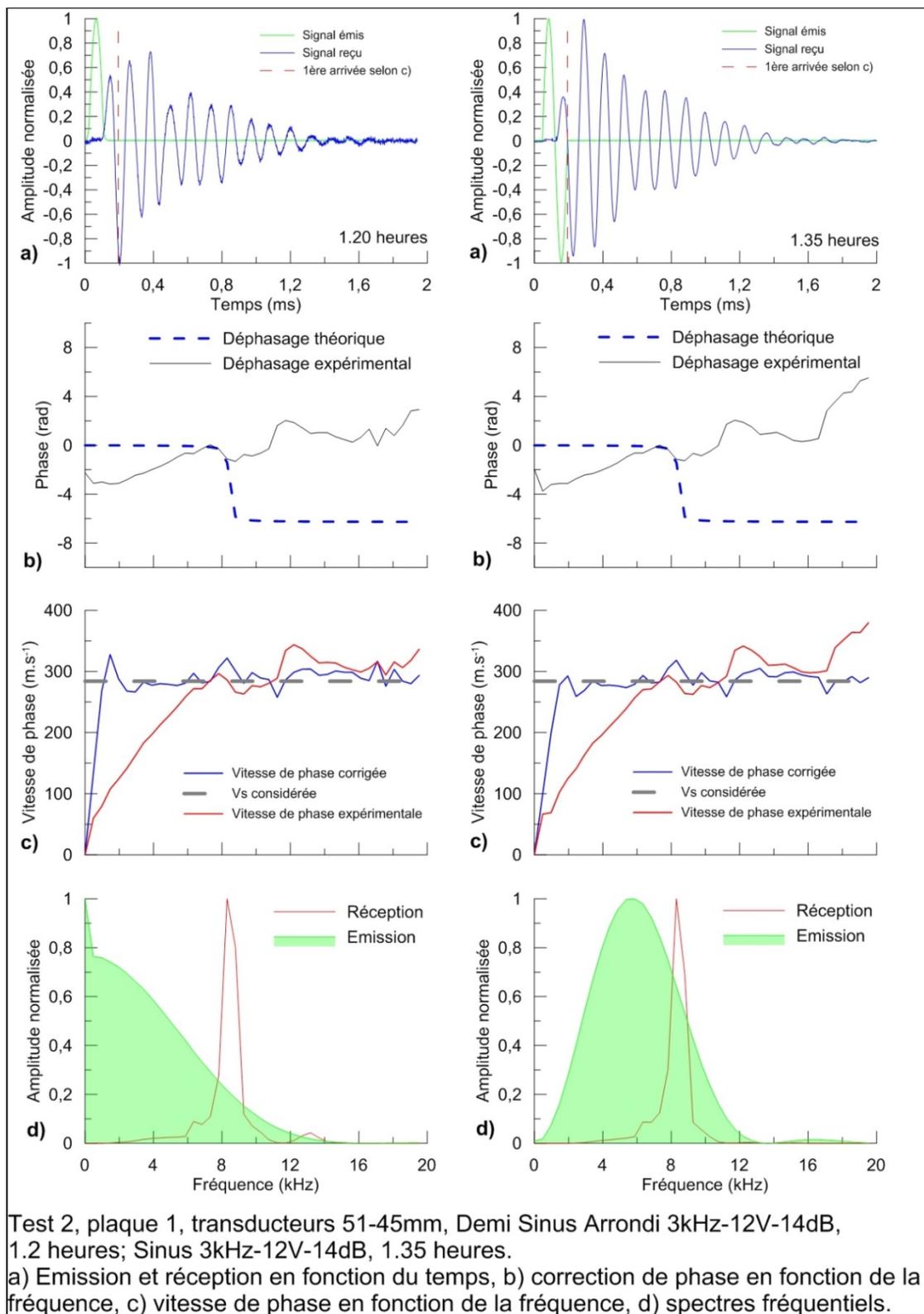


Figure-A IV-2 Plaque 1, transducteurs 51-45 mm

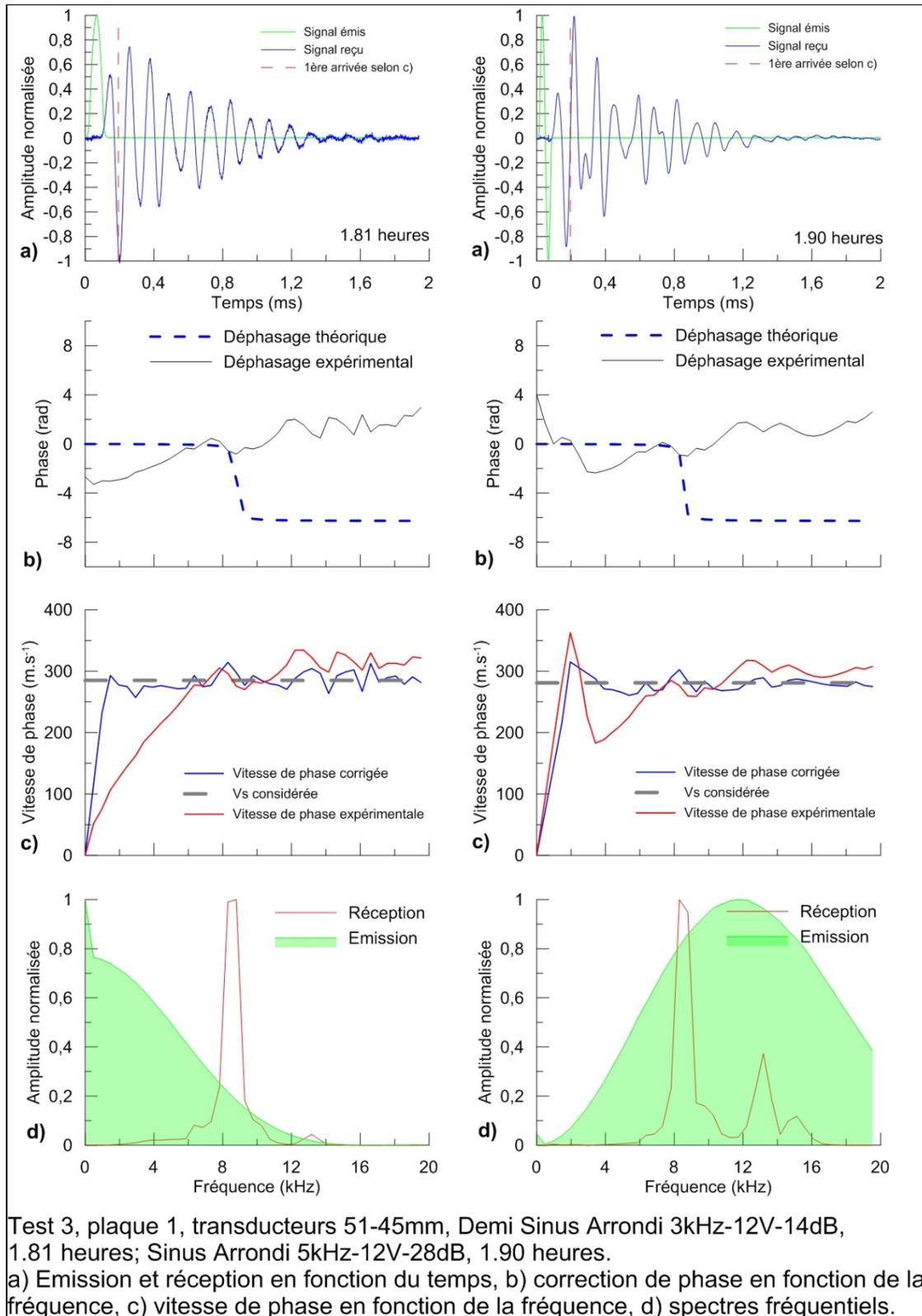


Figure-A IV-3 Plaque 1, transducteurs 51-45 mm

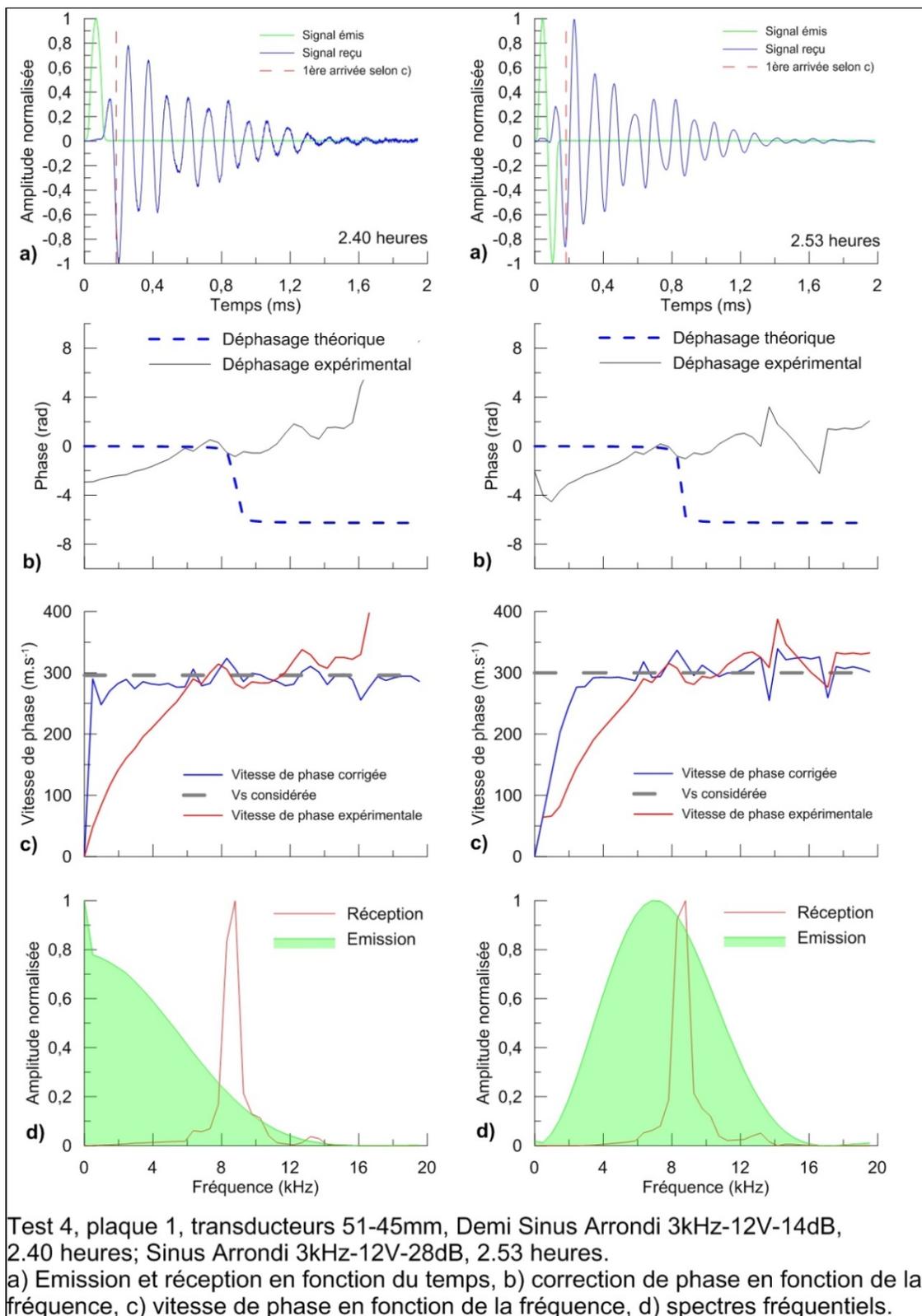


Figure-A IV-4 Plaque 1, transducteurs 51-45 mm

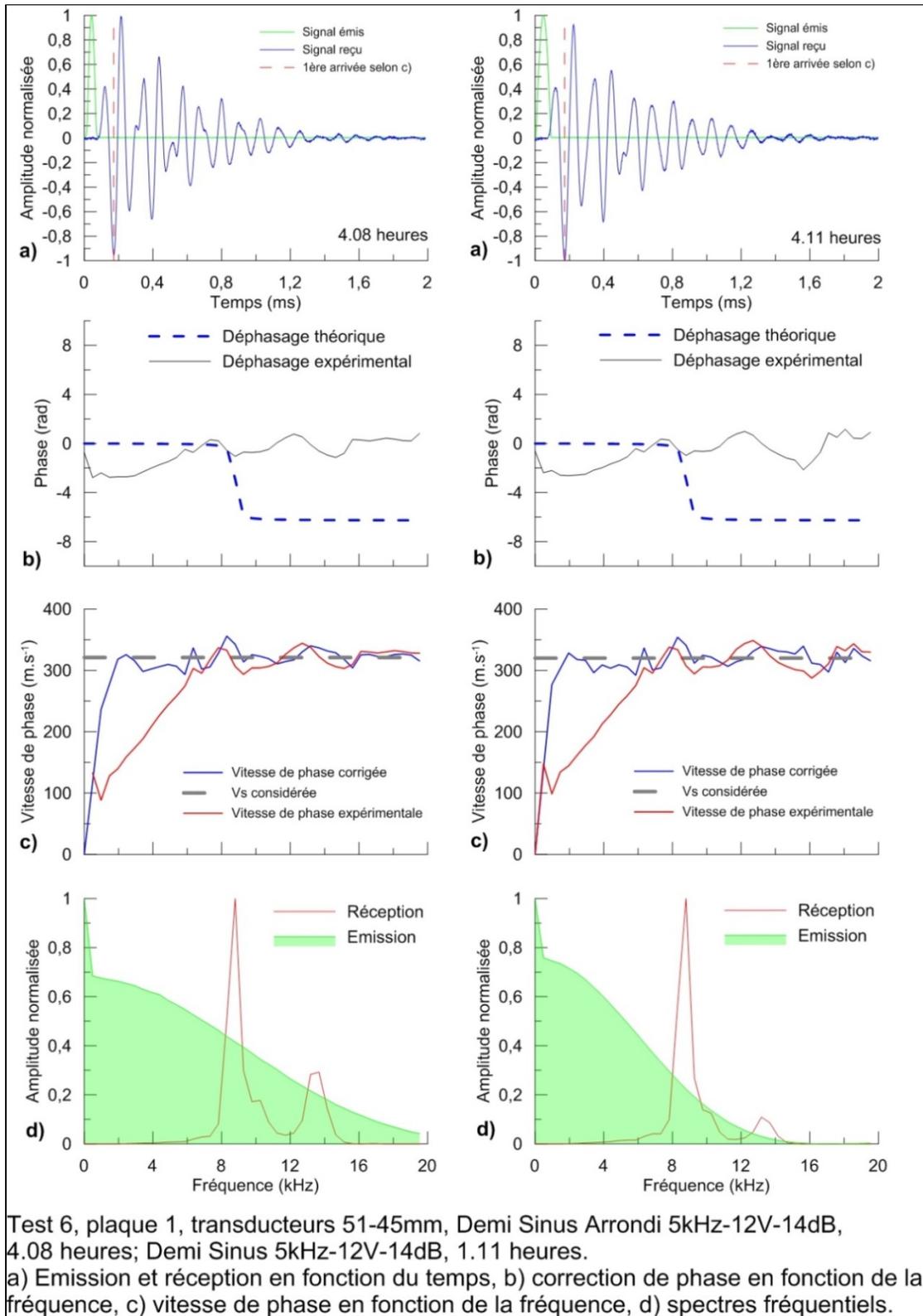


Figure-A IV-5 Plaque 1, transducteurs 51-45 mm

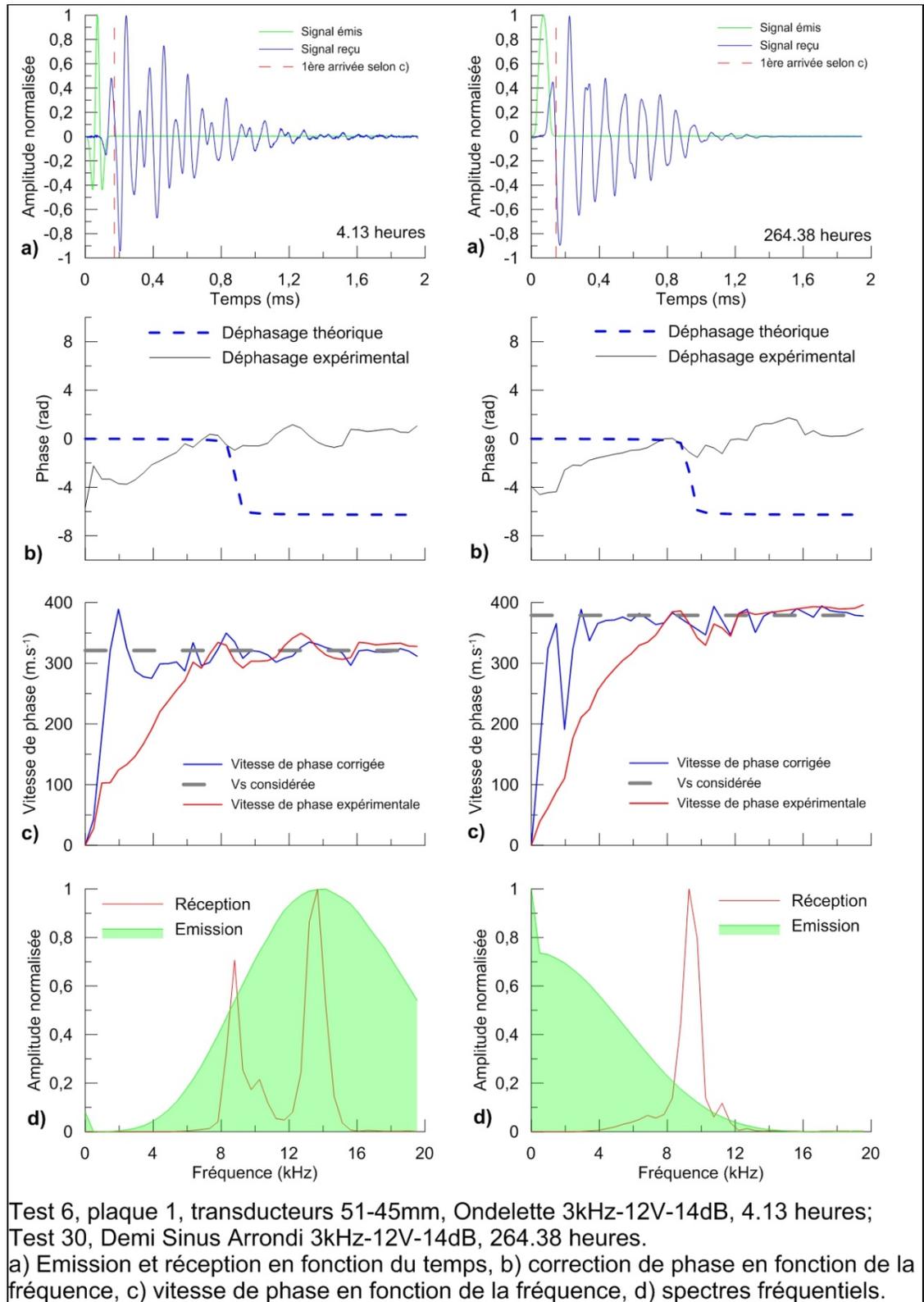
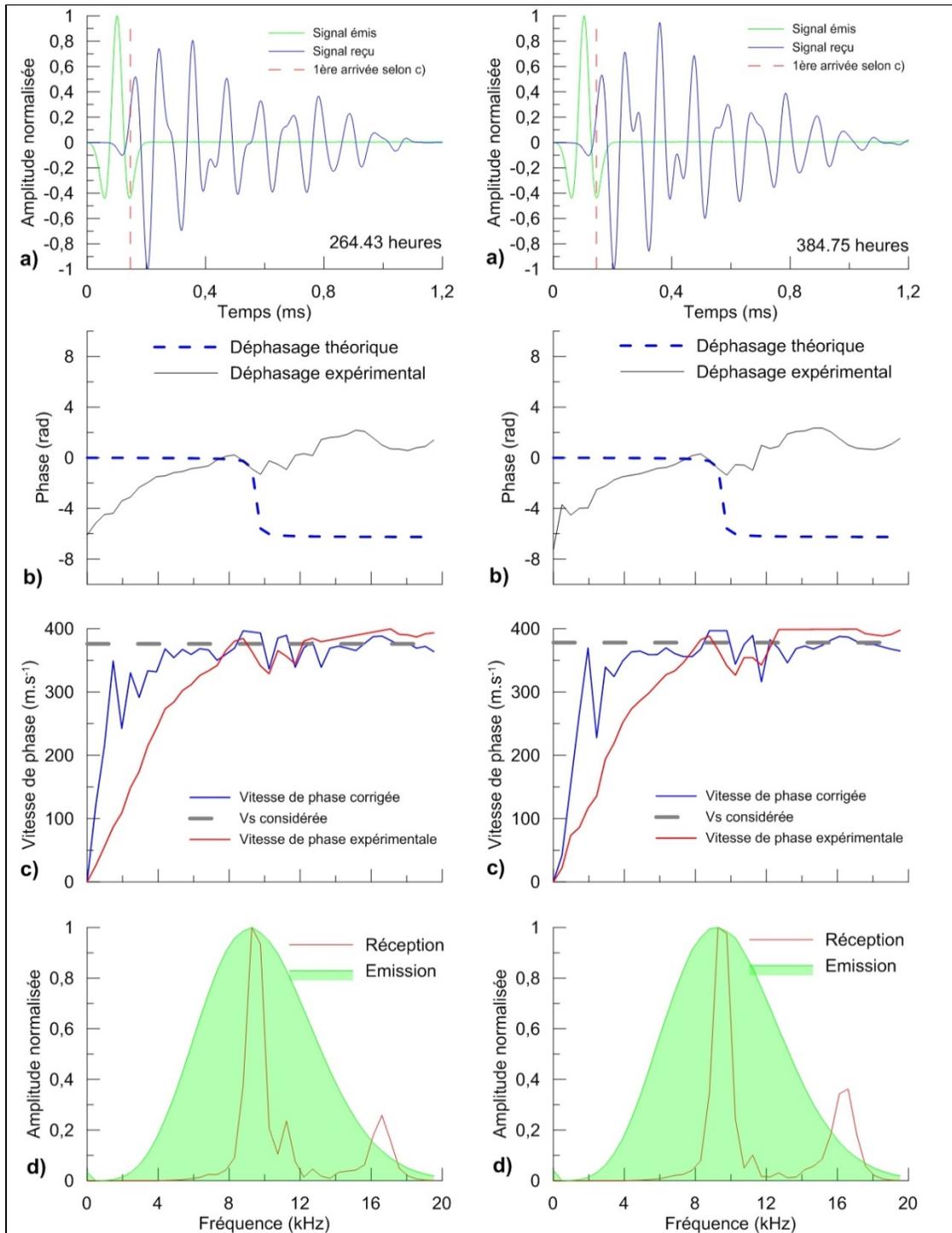


Figure-A IV-6 Plaque 1, transducteurs 51-45 mm



Test 30, plaque 1, transducteurs 51-45mm, Ondelette 2kHz-12V-14dB, 264.43 heures;
 Test 32, Ondelette 2kHz-12V-14dB, 384.75 heures.

a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A IV-7 Plaque 1, transducteurs 51-45 mm

ANNEXE V

Analyse fréquentielle plaque 2, transducteurs 38-34 mm

Tableau-A V-1 Tableau récapitulatif des valeurs obtenues pour le couple 38-34 mm, plaque 2

Test	Heure	Jour	Heure	Signal d'entrée				Vs mesurée	Vs réelle	Masse d'eau
1	15:45:00	0,031	0,750	DSA	8	12	28	249	266,82	588,62
1	16:01:00	0,042	1,017	S	5	12	28	250	267,89	580,65
1	15:45:00	0,031	0,750	DSA	5	12	28	245	262,53	588,62
2	17:03:00	0,085	2,050	DSA	5	12	28	277	296,82	566,46
2	17:11:00	0,091	2,183	SA	4	12	28	272	291,47	564,63
3	17:58:00	0,124	2,967	DSA	5	12	14	281	301,11	553,98
4	19:11:00	0,174	4,183	DSA	5	12	28	282	302,18	537,85
4	19:12:00	0,175	4,200	Ondelette	2	12	28	281	301,11	537,63
9	09:31:00	0,772	18,517	DSA	5	12	28	307	328,97	382,39
9	09:36:00	0,775	18,600	Sinus	5	12	28	306	327,90	381,11
10	11:41:00	0,862	20,683	DSA	4	12	14	312	334,33	351,94
11	13:37:00	0,942	22,617	DSA	4	12	14	313	335,40	329,12
13	17:27:00	1,102	26,450	SA	4	12	14	314	336,47	292,66
13	17:19:00	1,097	26,317	DSA	4	12	14	314	336,47	293,77
14	18:55:00	1,163	27,917	DSA	5	12	14	318	340,76	281,05
16	22:59:00	1,333	31,983	DSA	5	12	14	318	340,76	253,80
17	09:32:00	1,772	42,533	DSA	5	12	14	322	345,04	203,97
18	12:16:00	1,886	45,267	DSA	5	12	14	327	350,40	195,17
19	17:55:00	2,122	50,917	DSA	5	12	14	336	360,05	180,15
20	09:35:00	2,774	66,583	DSA	4	12	14	338	362,19	153,86
20	09:36:00	2,775	66,600	Ondelette	2	12	14	337	361,12	153,84
20	09:36:00	2,775	66,600	Ondelette	4	12	14	337	361,12	153,84
21	15:20:00	3,014	72,333	DSA	5	12	14	337	361,12	147,48
23	11:16:00	3,844	92,267	DSA	5	12	14	338	362,19	129,16
24	16:37:00	4,067	97,617	DSA	5	12	14	338	362,19	124,38
25	12:52:00	4,911	117,867	DSA	4	12	14	346	370,76	108,30
26	12:26:00	6,893	165,433	SA	4	12	14	347	371,83	84,87
26	12:21:00	6,890	165,350	DSA	5	12	14	346	370,76	84,90
27	16:00:00	8,042	193,000	DSA	5	12	14	348	372,90	73,49
28	15:29:00	9,020	216,483	DSA	4	12	14	343	367,55	64,97
30	12:15:00	10,885	261,250	DSA	5	12	14	348	372,90	51,41
30	12:17:00	10,887	261,283	Ondelette	2,5	12	14	346	370,76	51,40
31	17:13	14,092	338,217	DSA	5	12	14	346	370,76	35,00
32	18:01	16,126	387,017	DSA	5	12	14	351	376,12	28,10
33	15:42	37,029	888,700	DSA	5	12	14	355	380,40	17,73
33	15:43	37,030	888,717	Ondelette	2	12	14	355	380,40	17,73

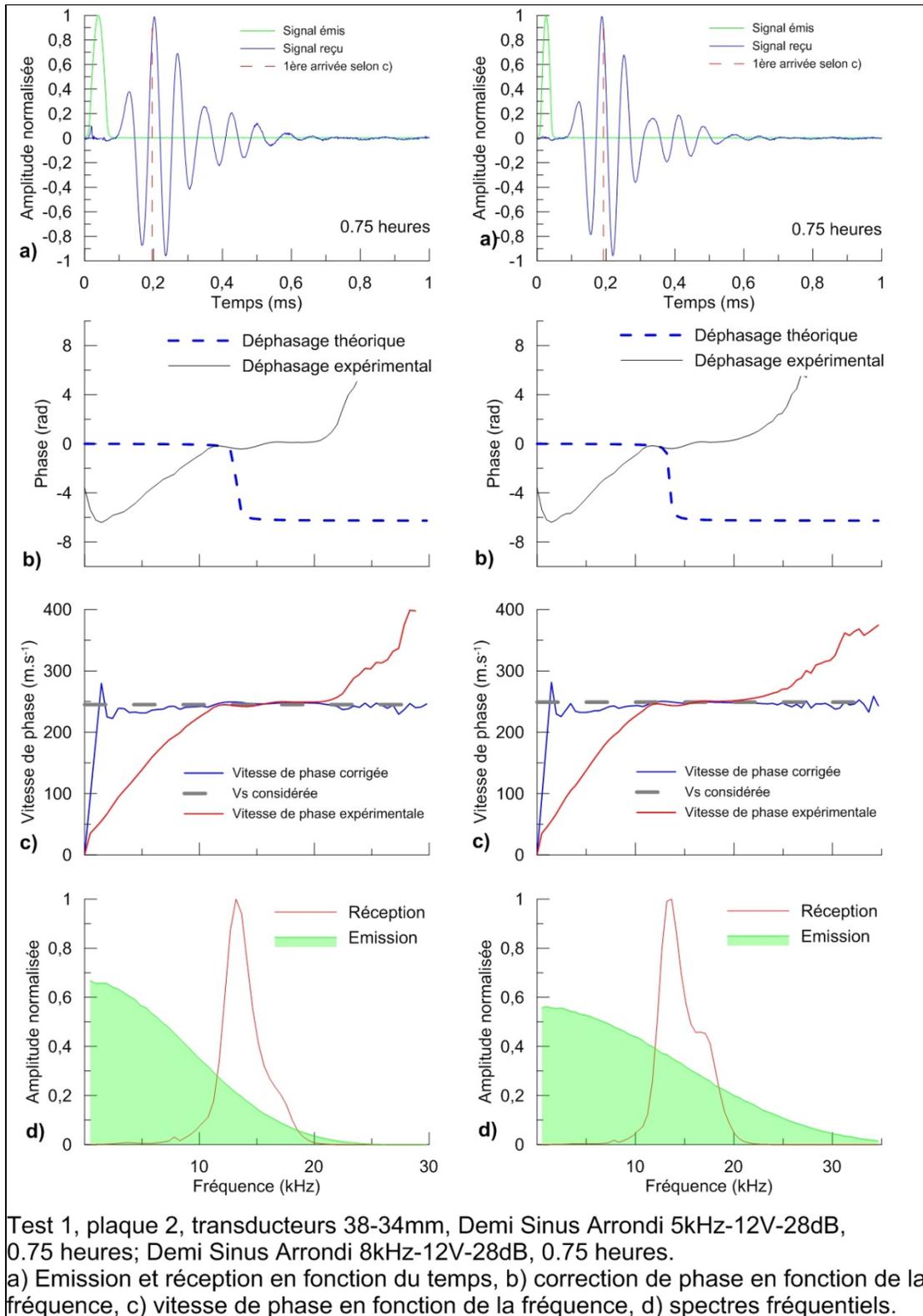


Figure-A V-1 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

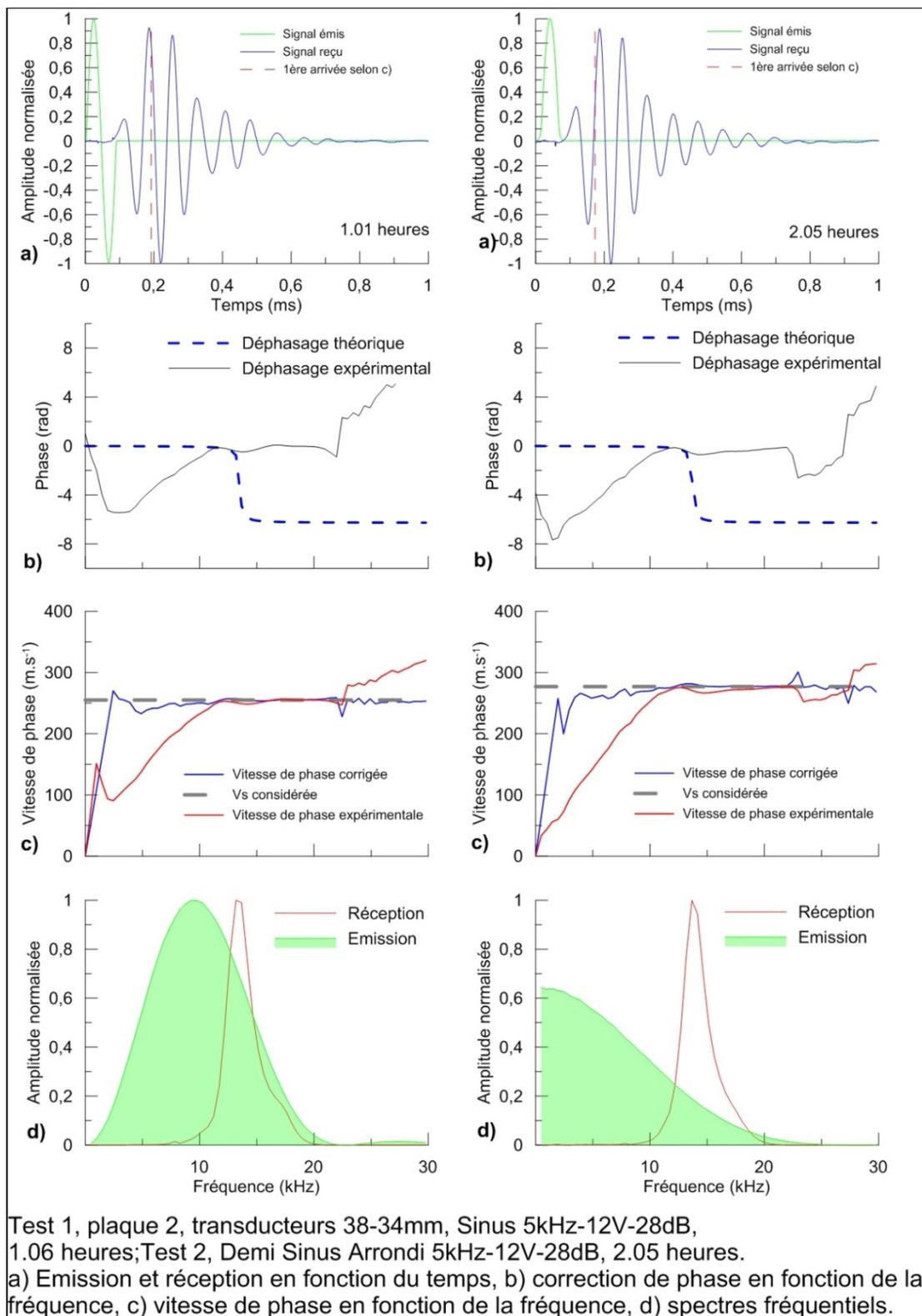


Figure-A V-2 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

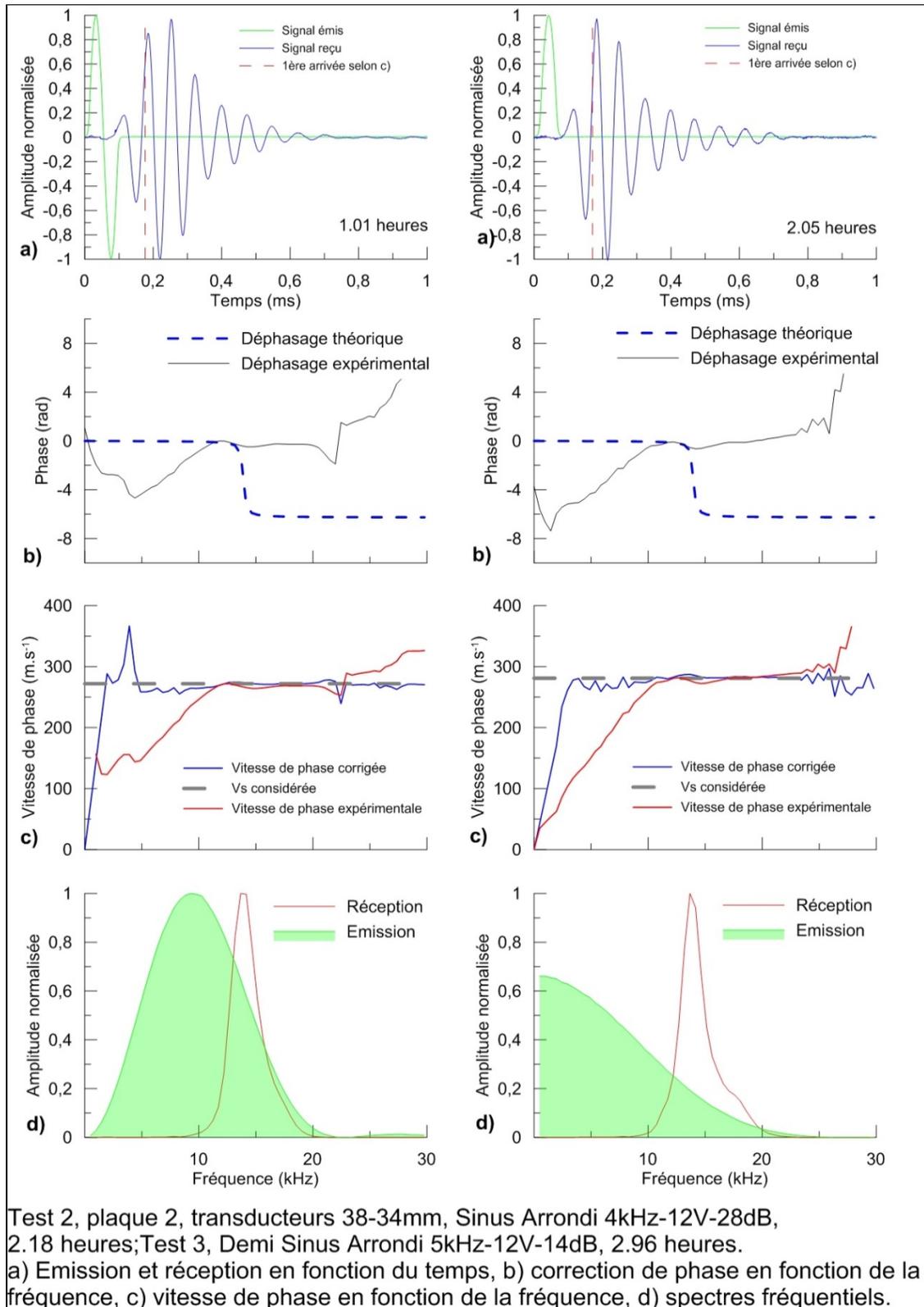


Figure-A V-3 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

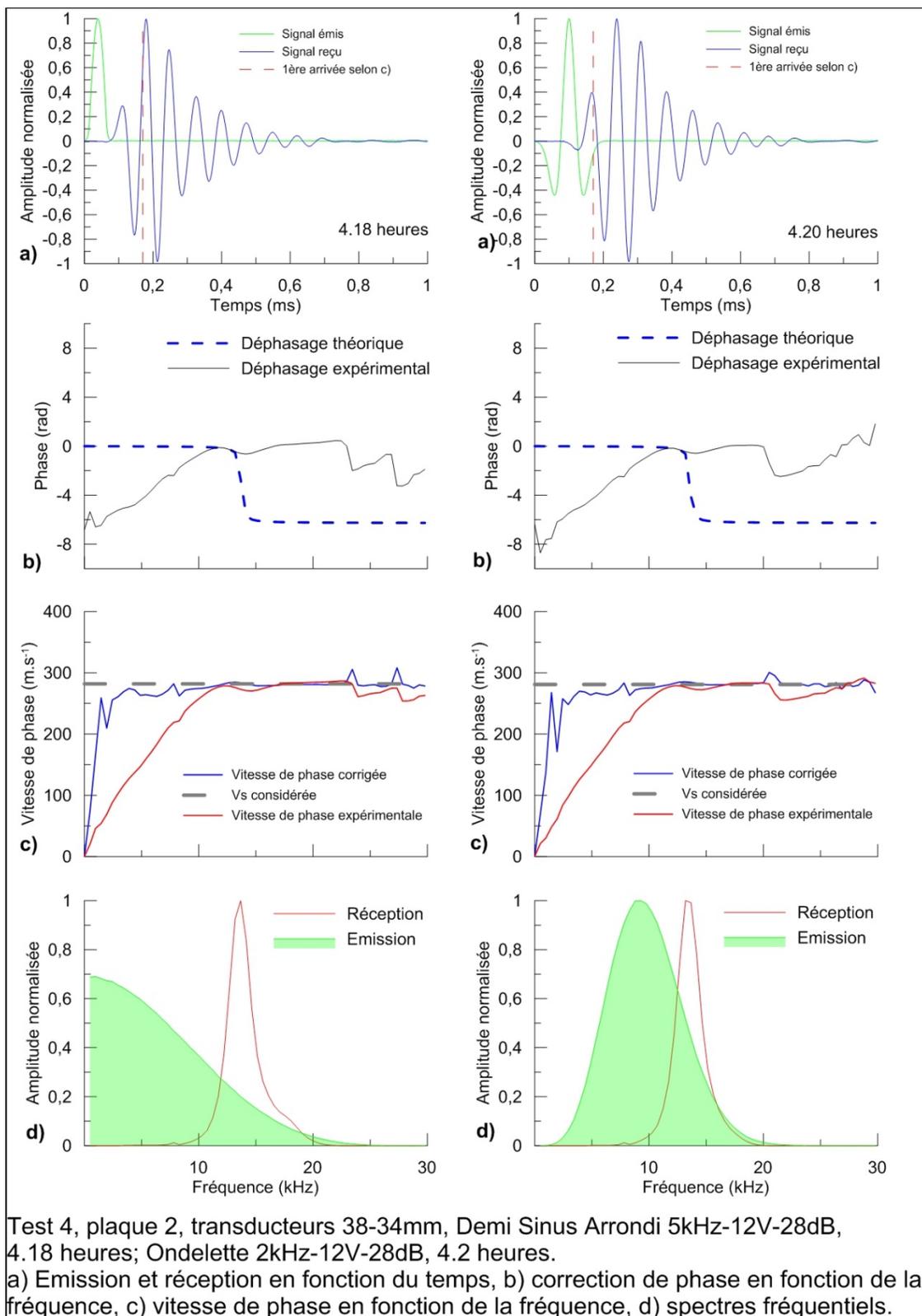


Figure-A V-4 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

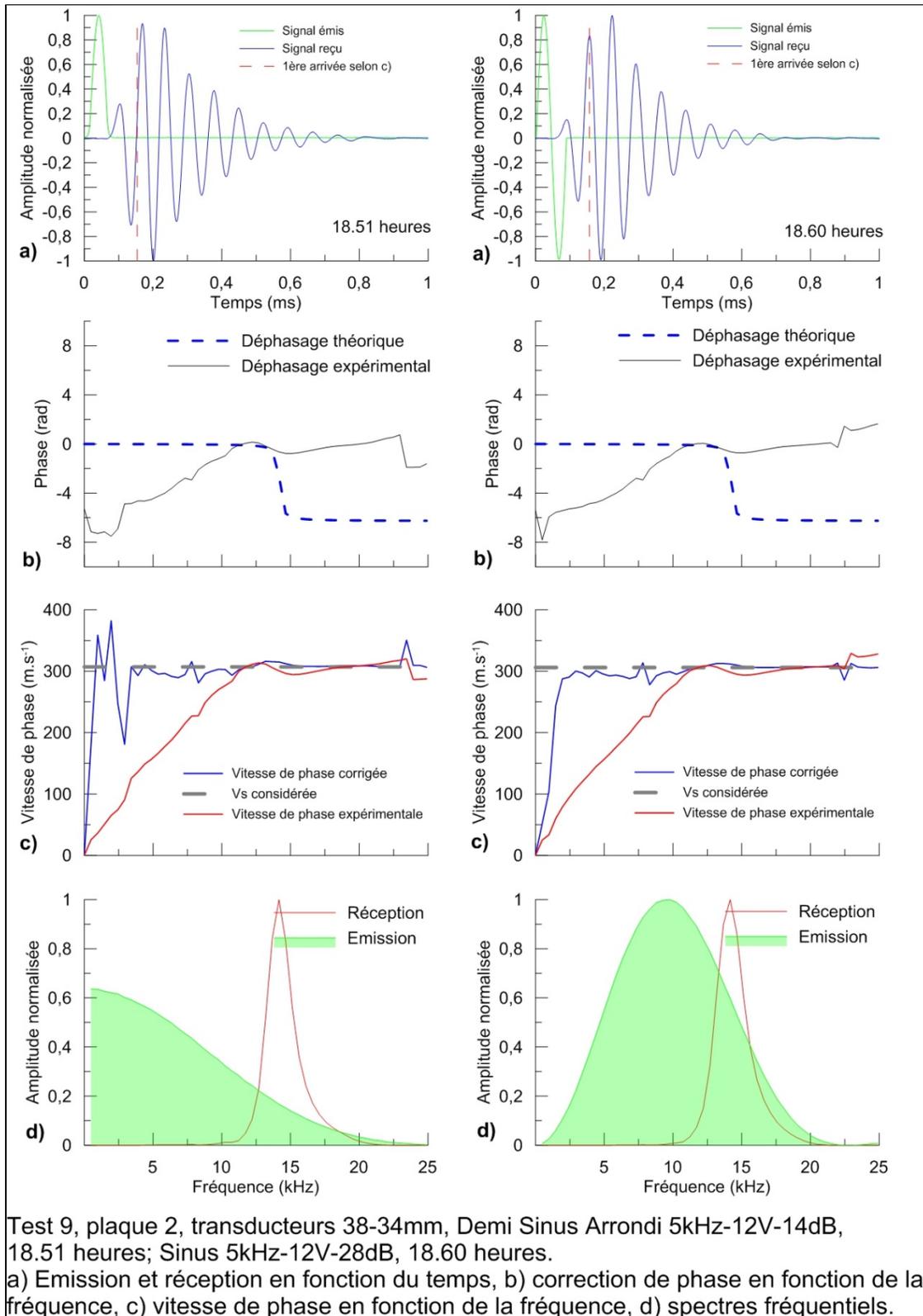


Figure-A V-5 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

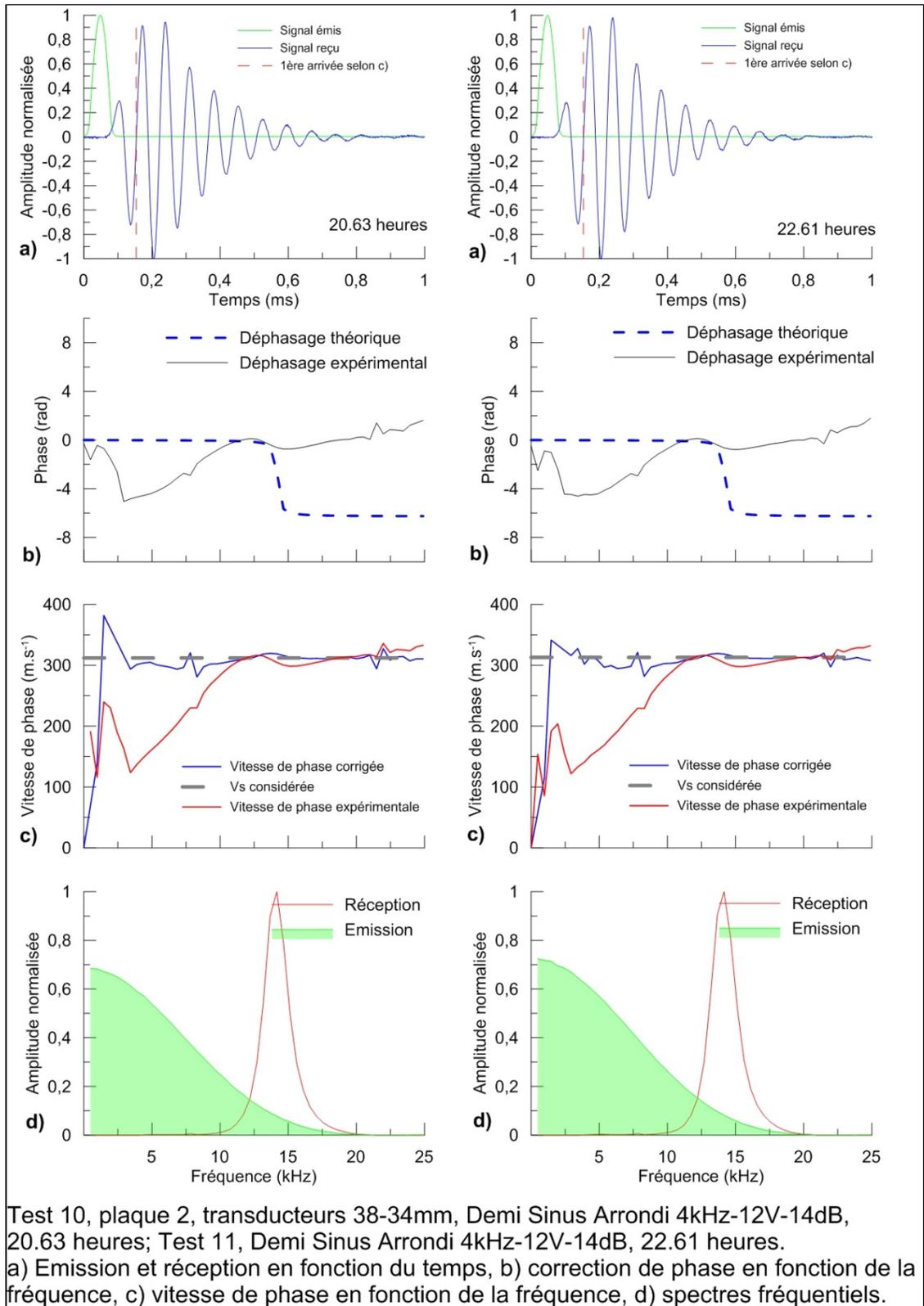


Figure-A V-6 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

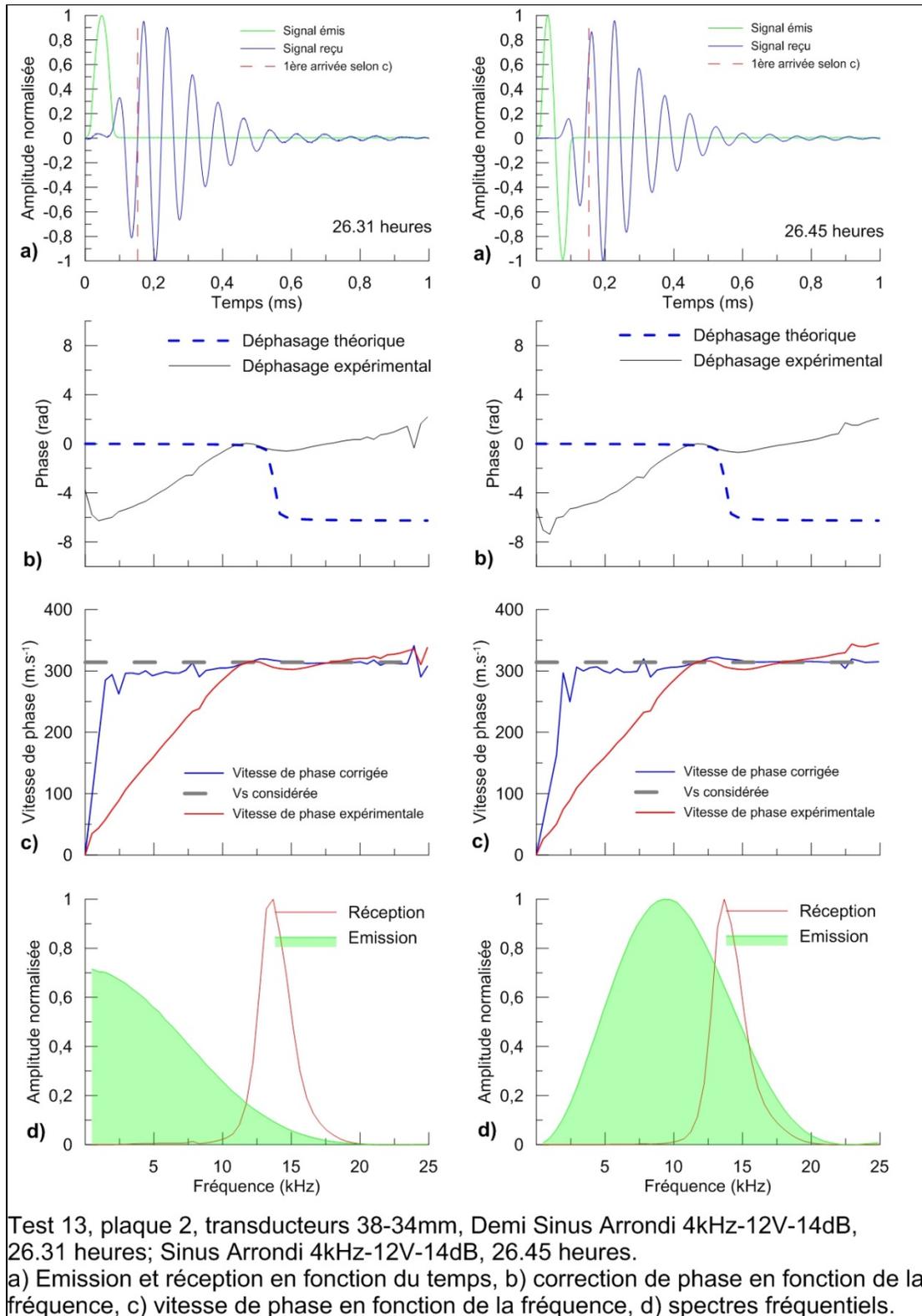


Figure-A V-7 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

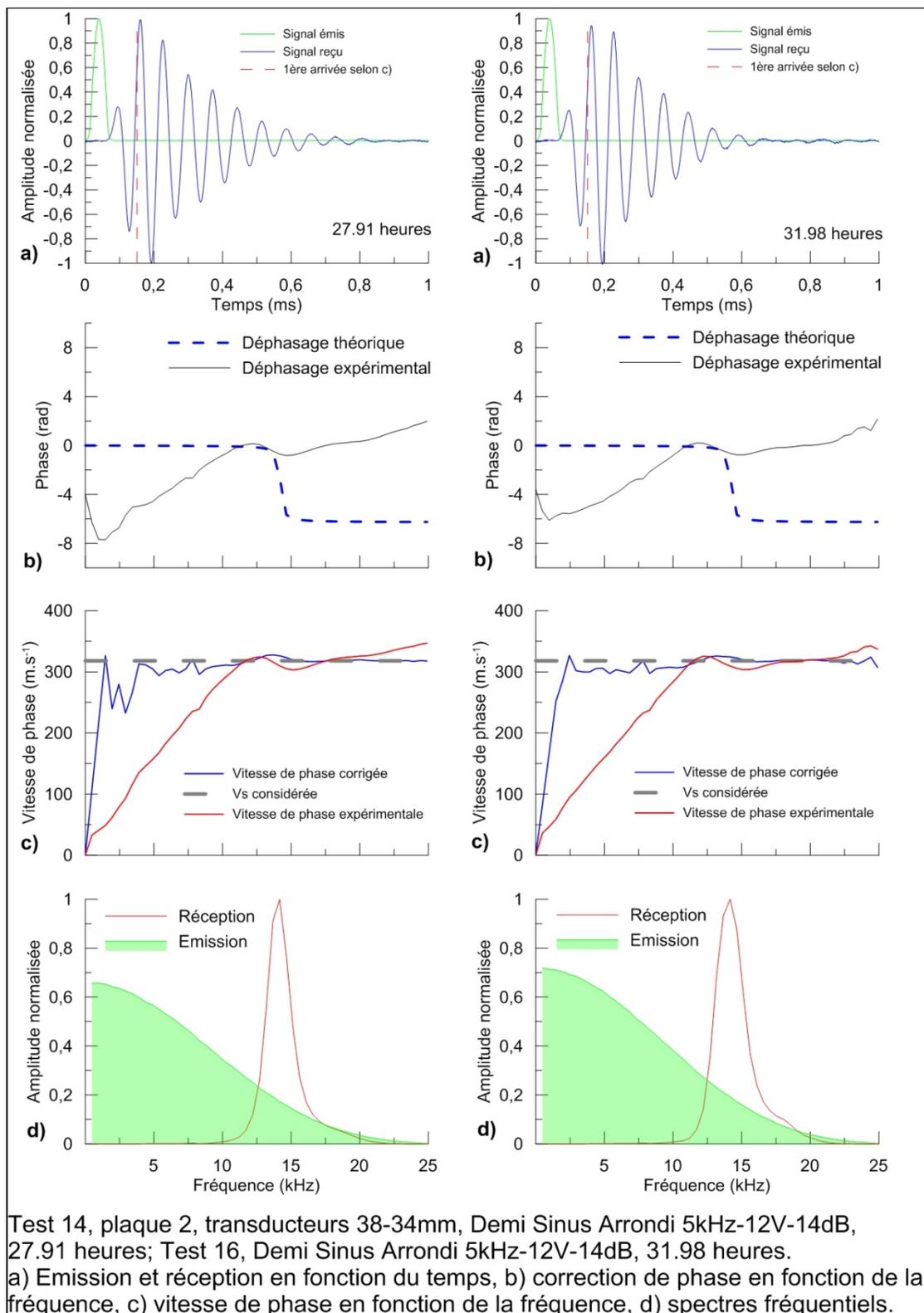


Figure-A V-8 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

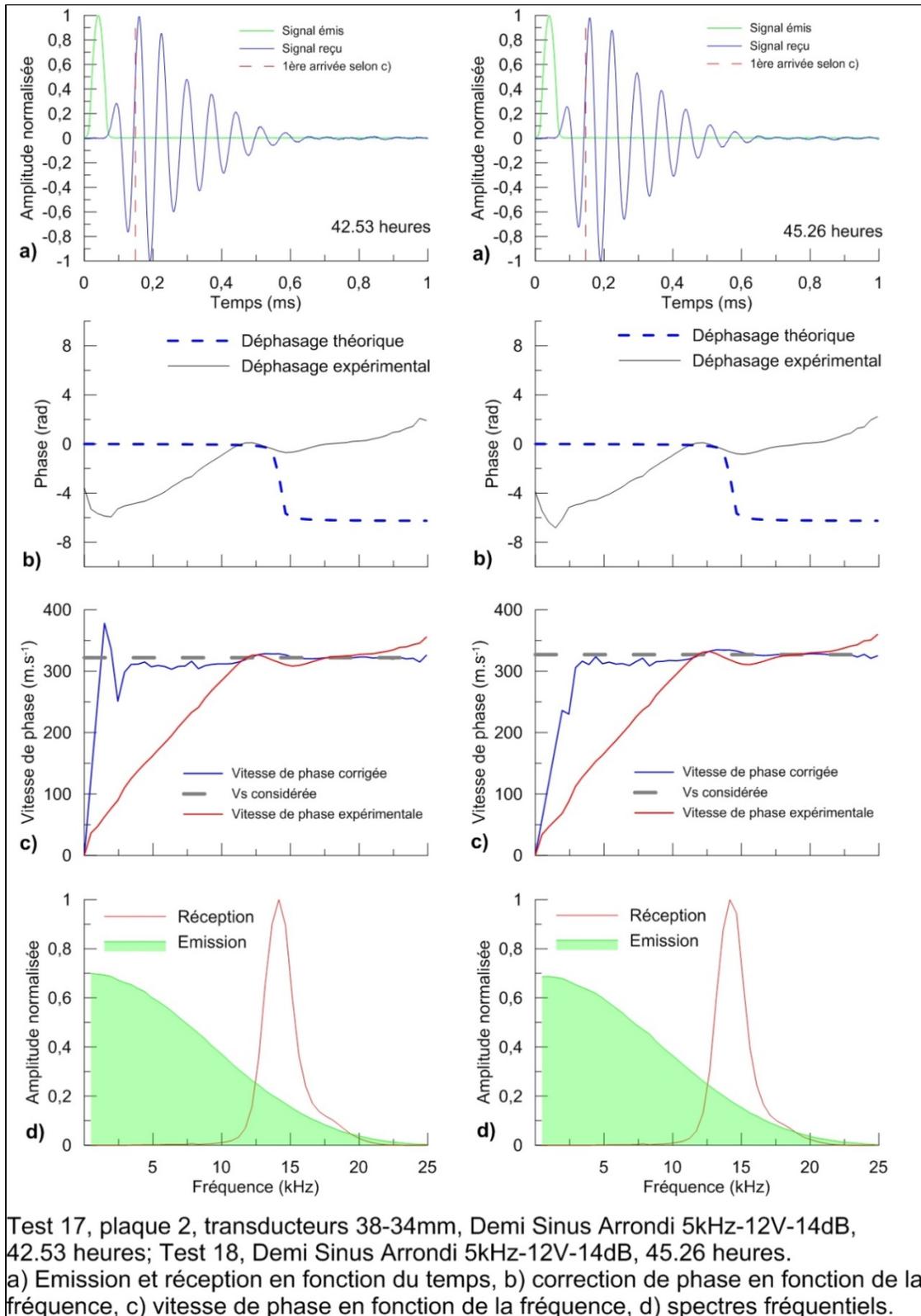


Figure-A V-9 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

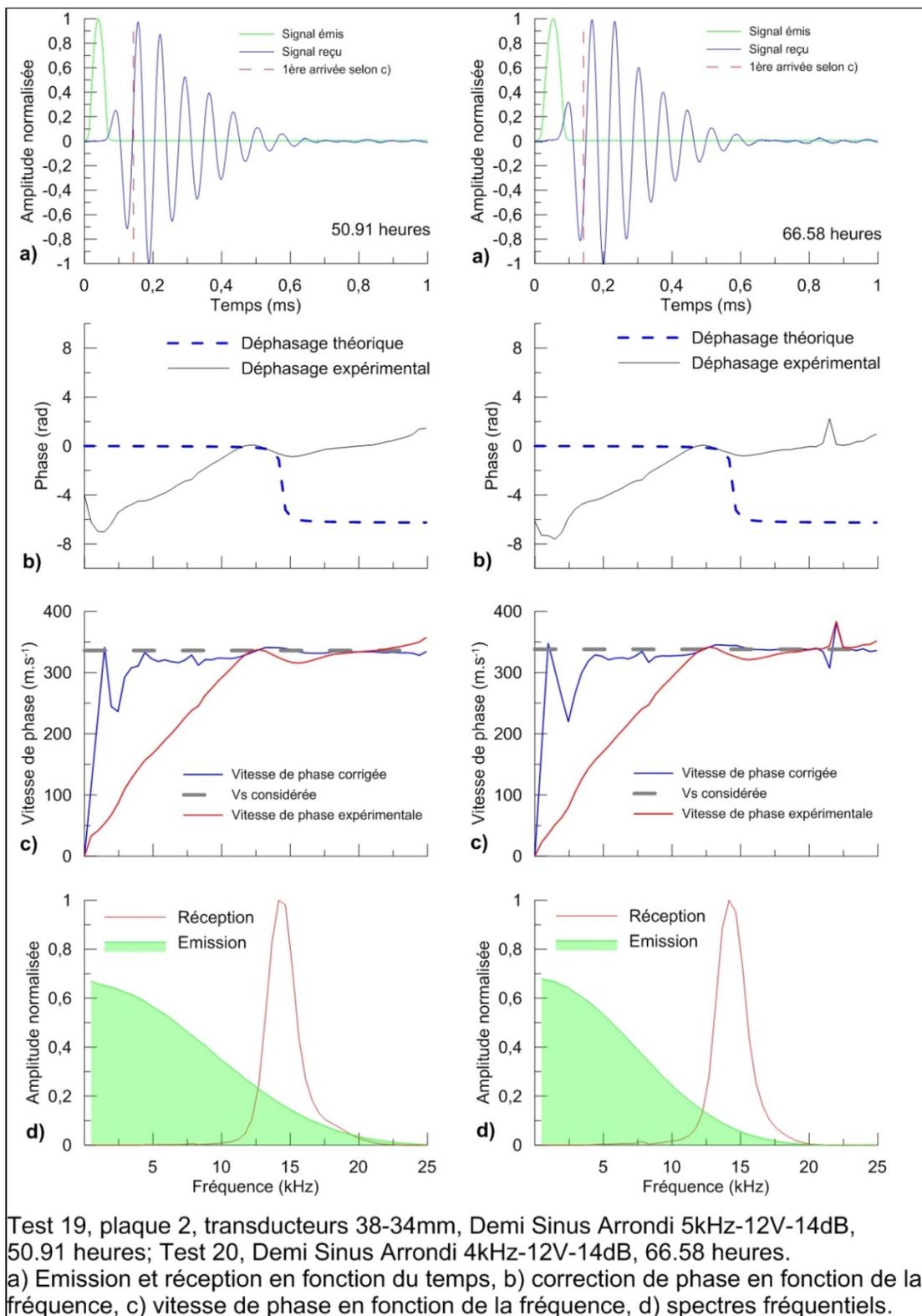
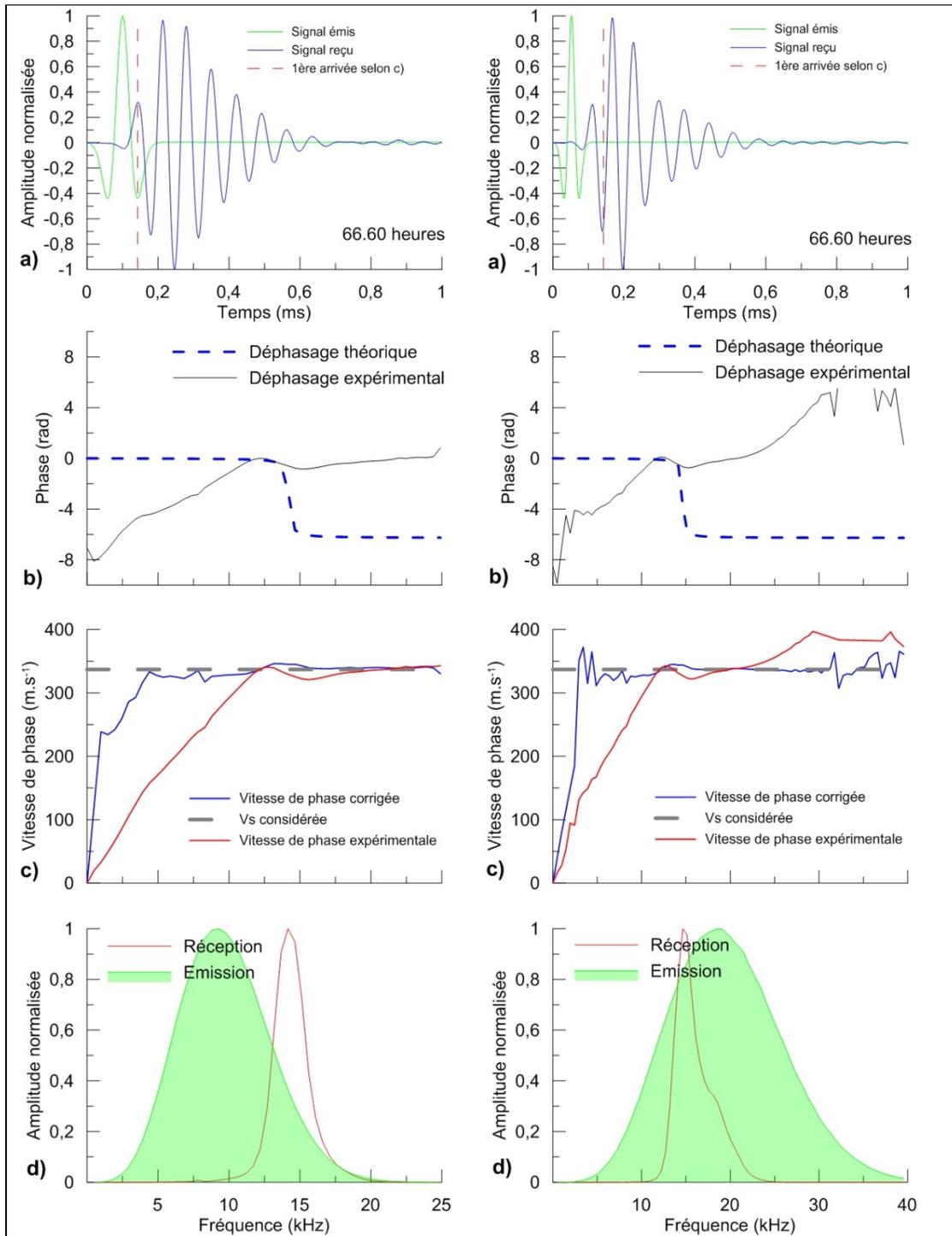


Figure-A V-10 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm



Test 20, plaque 2, transducteurs 38-34mm, Ondelette 2kHz-12V-14dB, 66.60 heures; Ondelette 4kHz-12V-14dB, 66.60 heures.

a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A V-11 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

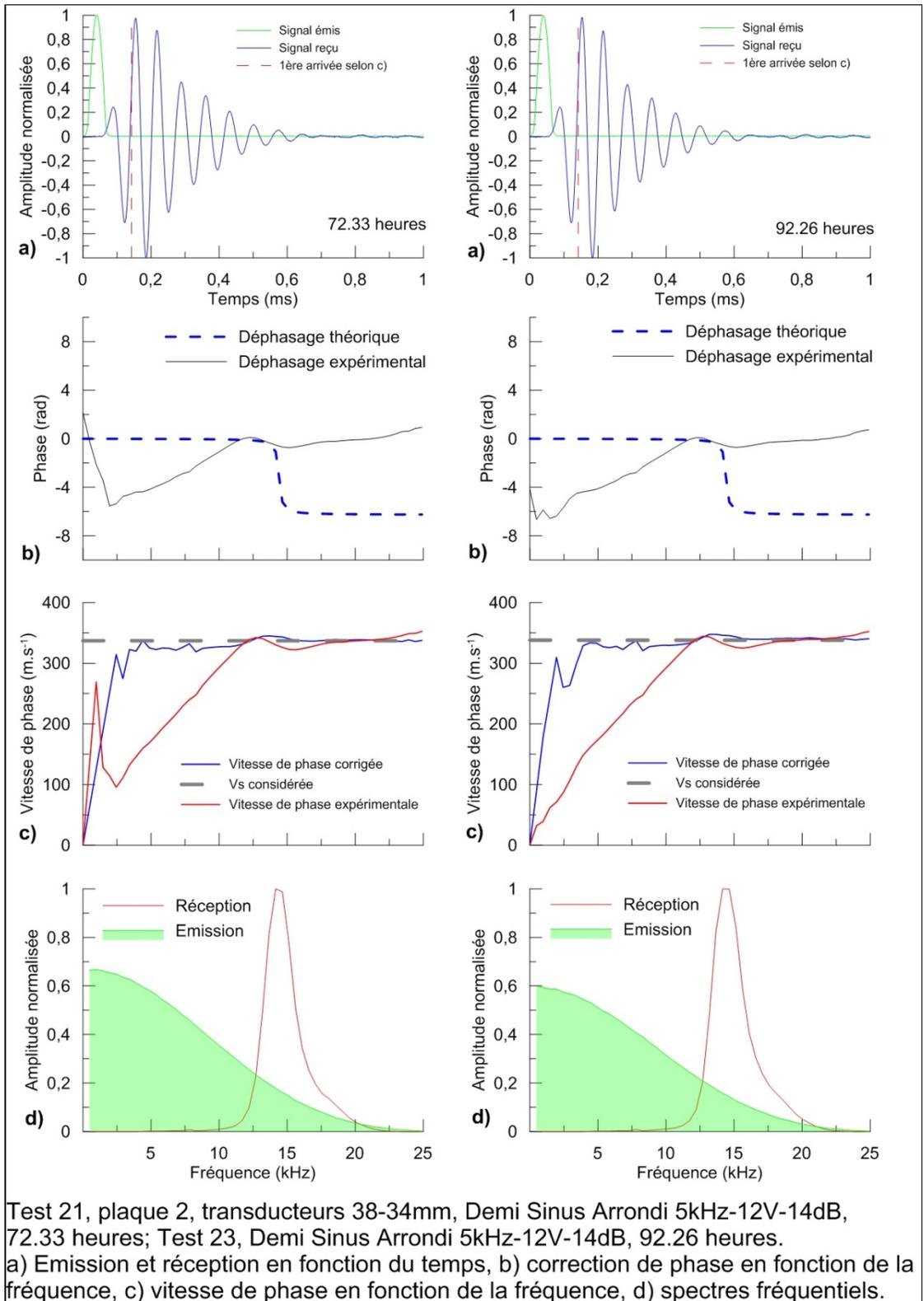


Figure-A V-12 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

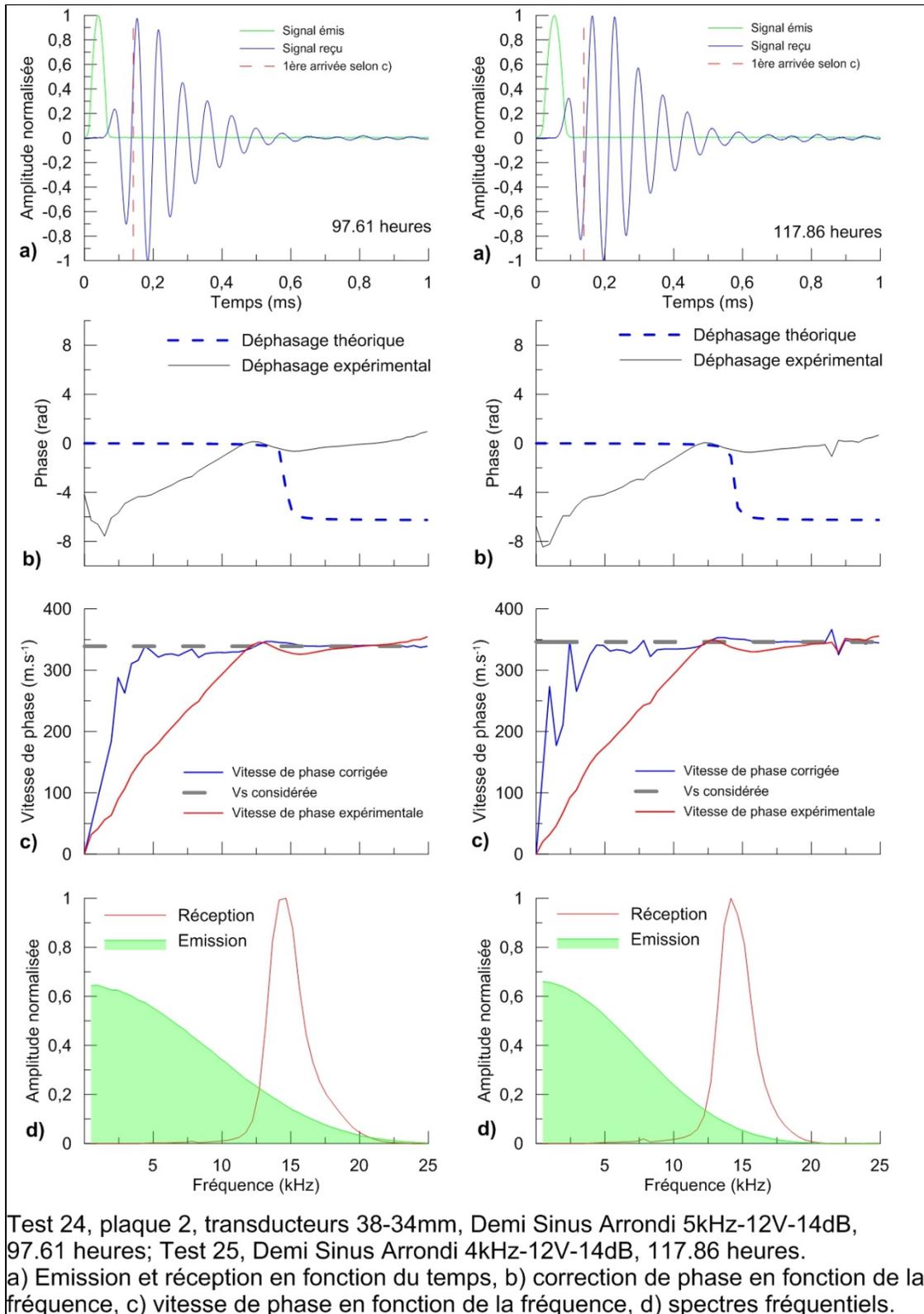


Figure-A V-13 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

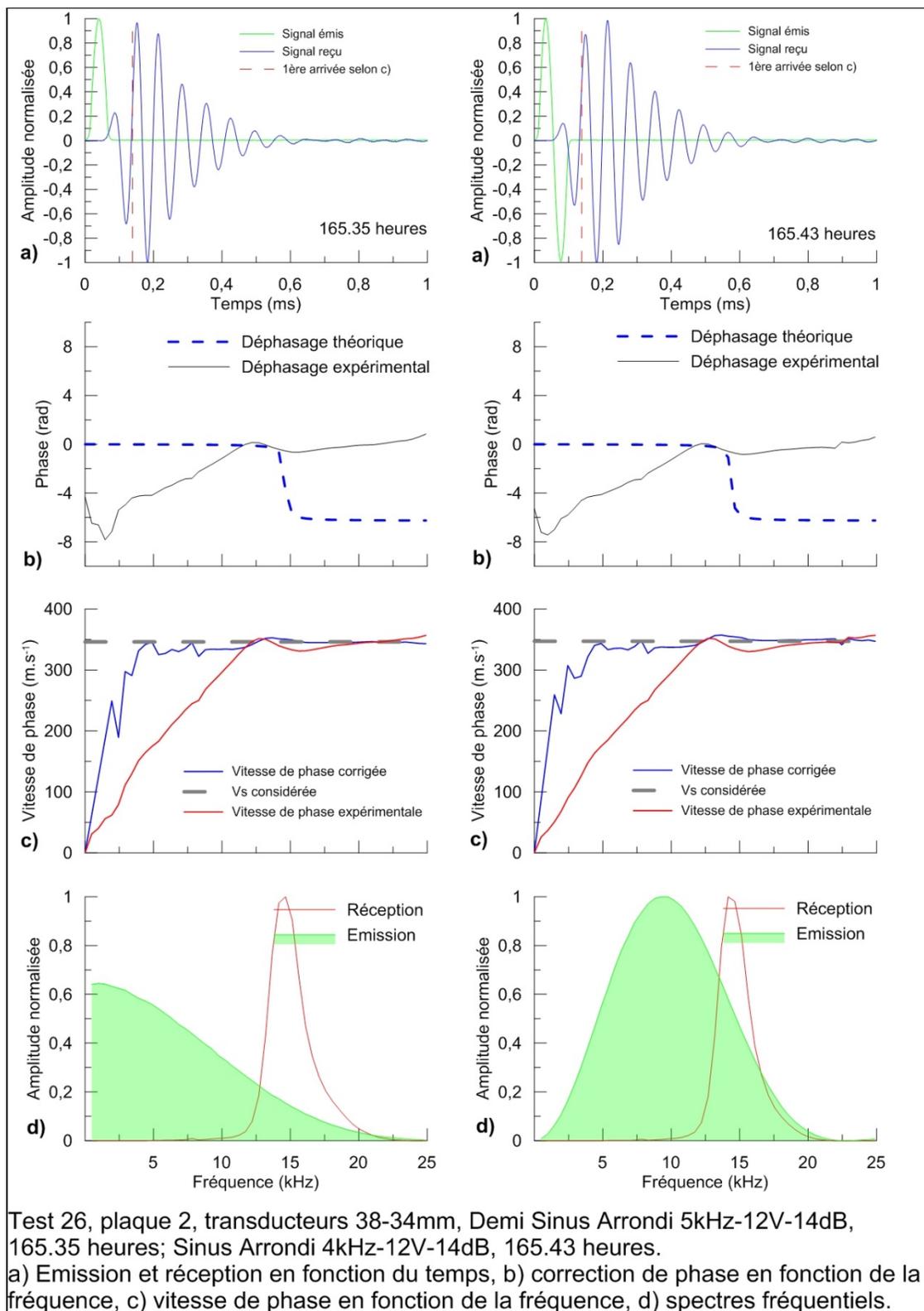
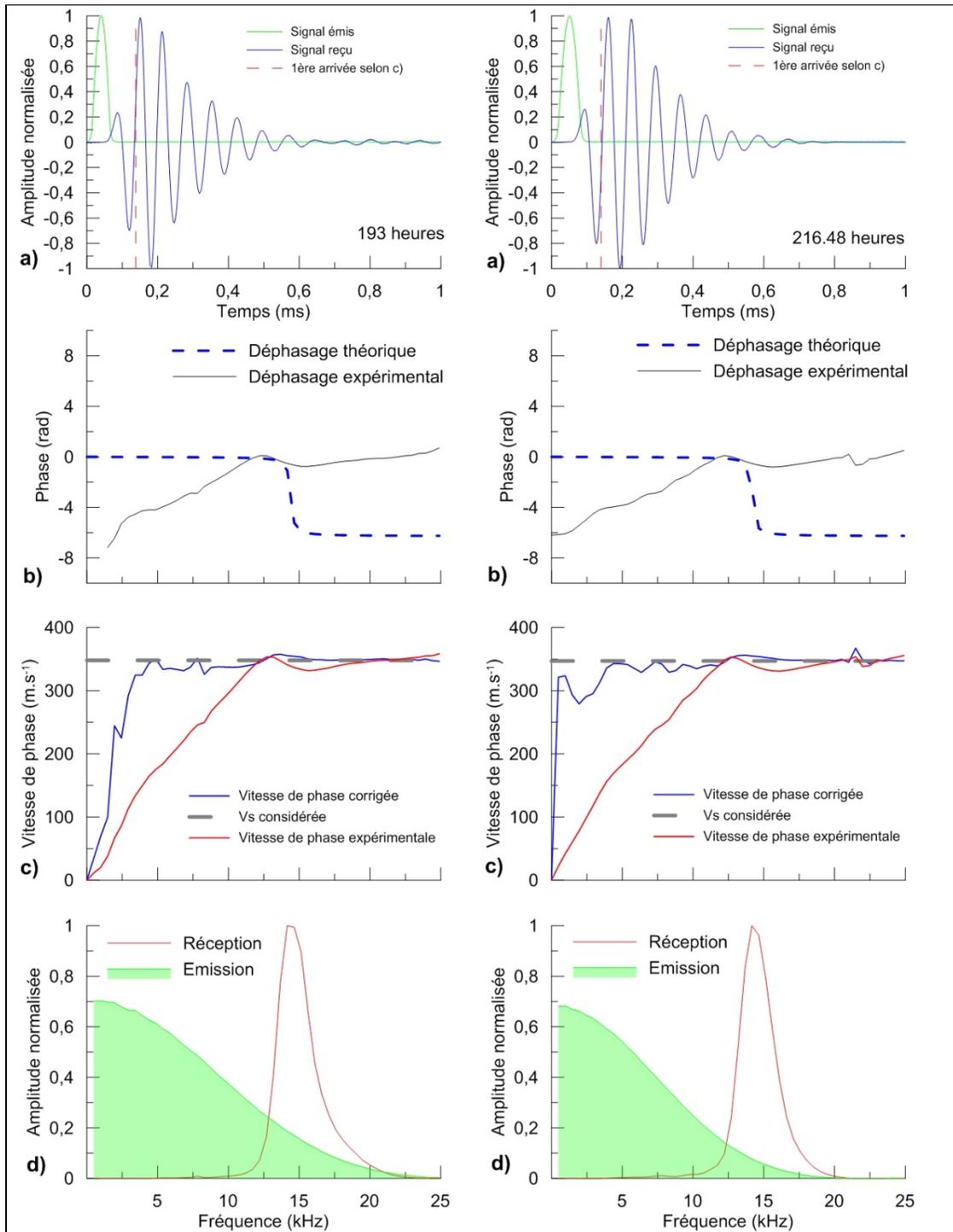


Figure-A V-14 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm



Test 27, plaque 2, transducteurs 38-34mm, Demi Sinus Arrondi 5kHz-12V-14dB, 193 heures; Test 28, Demi Sinus Arrondi 4kHz-12V-14dB, 216.48 heures.
 a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A V-15 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

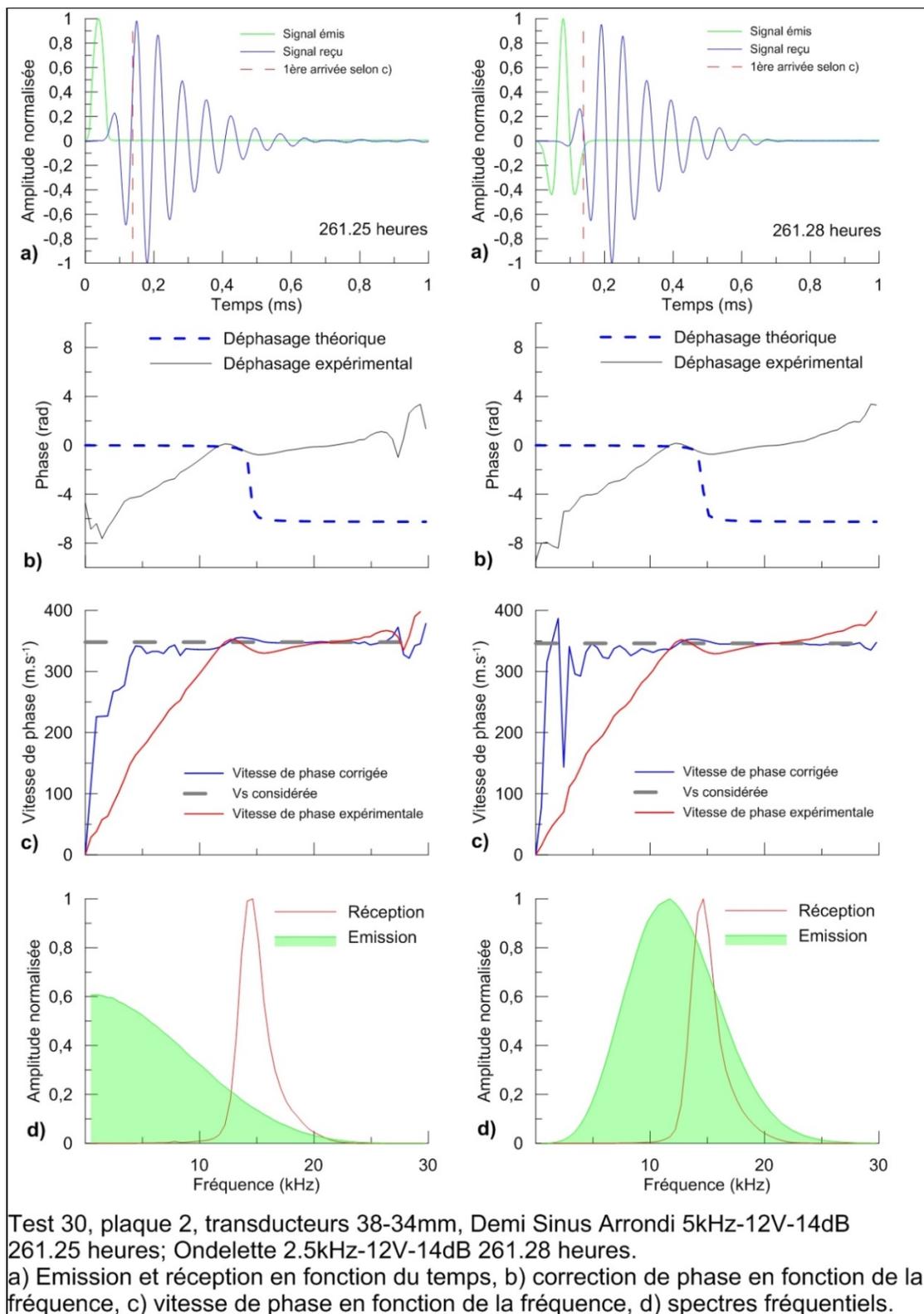


Figure-A V-16 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

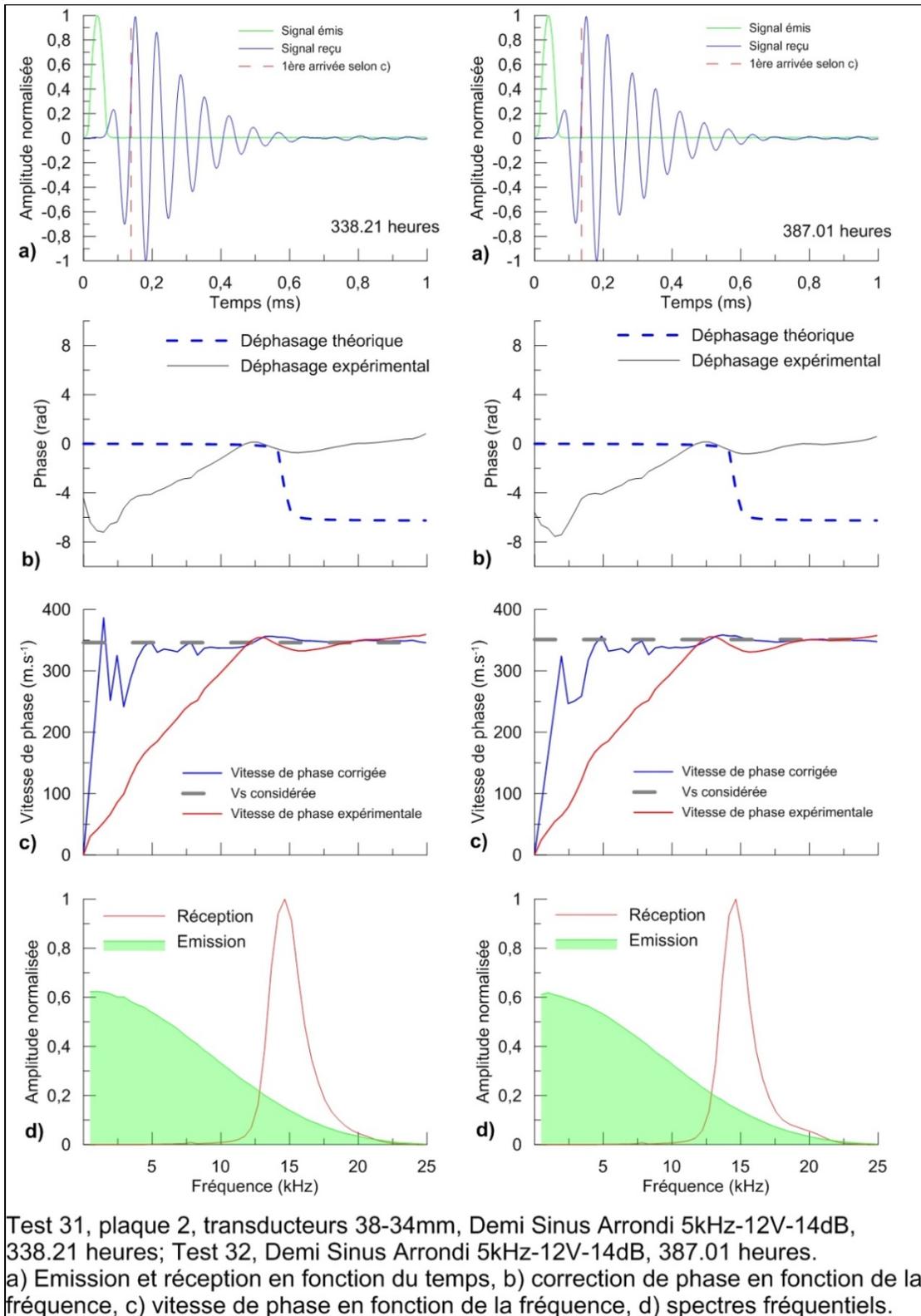


Figure-A V-17 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

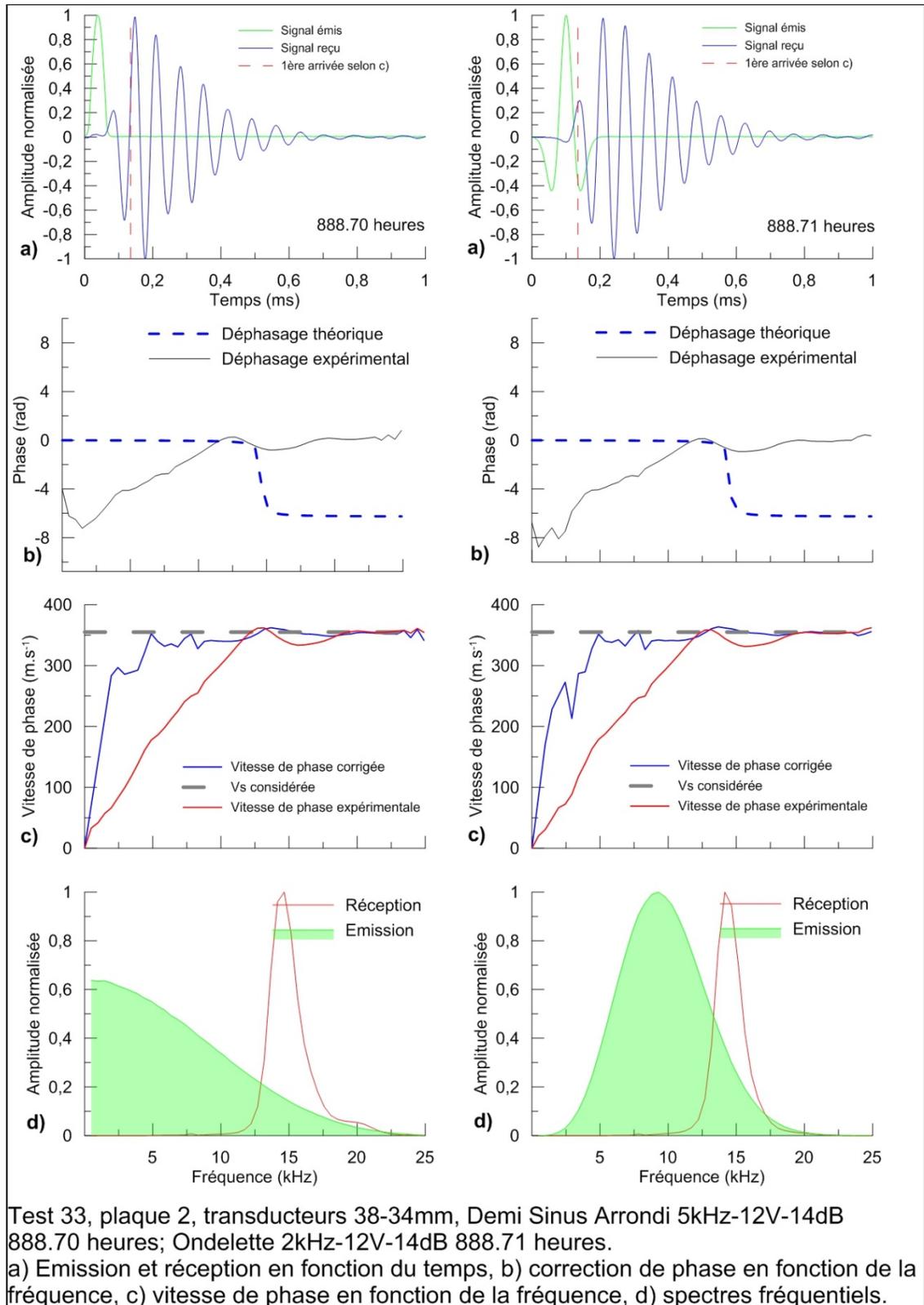


Figure-A V-18 Plaque 2, transducteurs 38-34 mm

ANNEXE VI

Analyse fréquentielle plaque 2, transducteurs 51-45 mm

Tableau-A VI-1 Tableau récapitulatif des valeurs obtenues pour le couple 51-45 mm, plaque 2

Test	Heure	Jour	Heure	Signal d'entrée	Vs mesurée	Vs réelle	Masse d'eau
1	15:24:00	0,017	0,400	DSA 3 12 14	244	268,29	602,67
1	15:24:00	0,017	0,400	DSA 5 12 14	241	264,99	602,67
2	16:48:00	0,075	1,800	DSA 3 12 14	255	280,38	569,91
2	16:55:00	0,080	1,917	SA 2 12 28	256	281,48	568,30
4	18:59:00	0,166	3,983	Ondelette 2 12 28	267	293,58	540,47
4	18:54:00	0,163	3,900	DSA 3 12 28	270	296,88	541,56
6	23:19:00	0,347	8,317	DSA 5 12 28	280	307,87	486,47
6	23:26:00	0,351	8,433	Ondelette 2 12 28	279	306,77	485,09
6	23:28:00	0,353	8,467	SA 2 12 8	284	312,27	484,70
8	08:04:00	0,711	17,067	Sinus 3 12 28	294	323,27	393,32
10	11:30:00	0,854	20,500	DSA 4 12 28	289	317,77	354,29
11	13:24:00	0,933	22,400	DSA 4 12 14	295	324,36	331,51
13	17:10:00	1,090	26,167	Ondelette 2 12 14	300	329,86	295,03
13	17:14:00	1,093	26,233	SA 2 12 14	302		294,47
13	17:09:00	1,090	26,150	DSA 4 12 14	299	328,76	295,17
18	12:07:00	1,880	45,117	DSA 4 12 14	306	336,46	195,62
18	12:10:00	1,882	45,167	SA 2 12 14	308	345,08	195,47
18	12:08:00	1,881	45,133	Ondelette 2 12 14	309	339,76	195,57
20	09:25:00	2,767	66,417	DSA 4 12 14	318	349,65	154,06
20	09:27:00	2,769	66,450	Ondelette 2 12 14	319	350,75	154,02
22	18:40:00	3,153	75,667	DSA 4 12 14	327	359,55	144,17
24	16:32:00	4,064	97,533	SA 2 12 14	324	356,25	124,46
24	16:30:00	4,063	97,500	DSA 4 12 14	323	355,15	124,49
25	12:44:00	4,906	117,733	DSA 4 12 14	325	357,35	108,37
28	15:22:00	9,015	216,367	DSA 4 12 14	329	361,75	65,01
28	15:24:00	9,017	216,400	Ondelette 2 12 14	330	362,85	65,00
30	12:09:00	10,881	261,150	DSA 4 12 14	330	362,85	51,43
30	12:11:00	10,883	261,183	Ondelette 2 12 14	330	362,85	51,43
31	17:10:00	14,090	338,167	Sinus 3 12 14	331	363,95	35,00
31	17:05	14,087	338,083	DSA 4 12 14	332	365,05	35,02
33	15:35	37,024	888,583	DSA 2,5 12 14	331	363,95	17,72
33	16:58	37,082	889,967	Ondelette 1,5 12 14	332	365,05	17,75
33	15:27	37,019	888,450	DSA 3 12 14	332	365,05	17,72

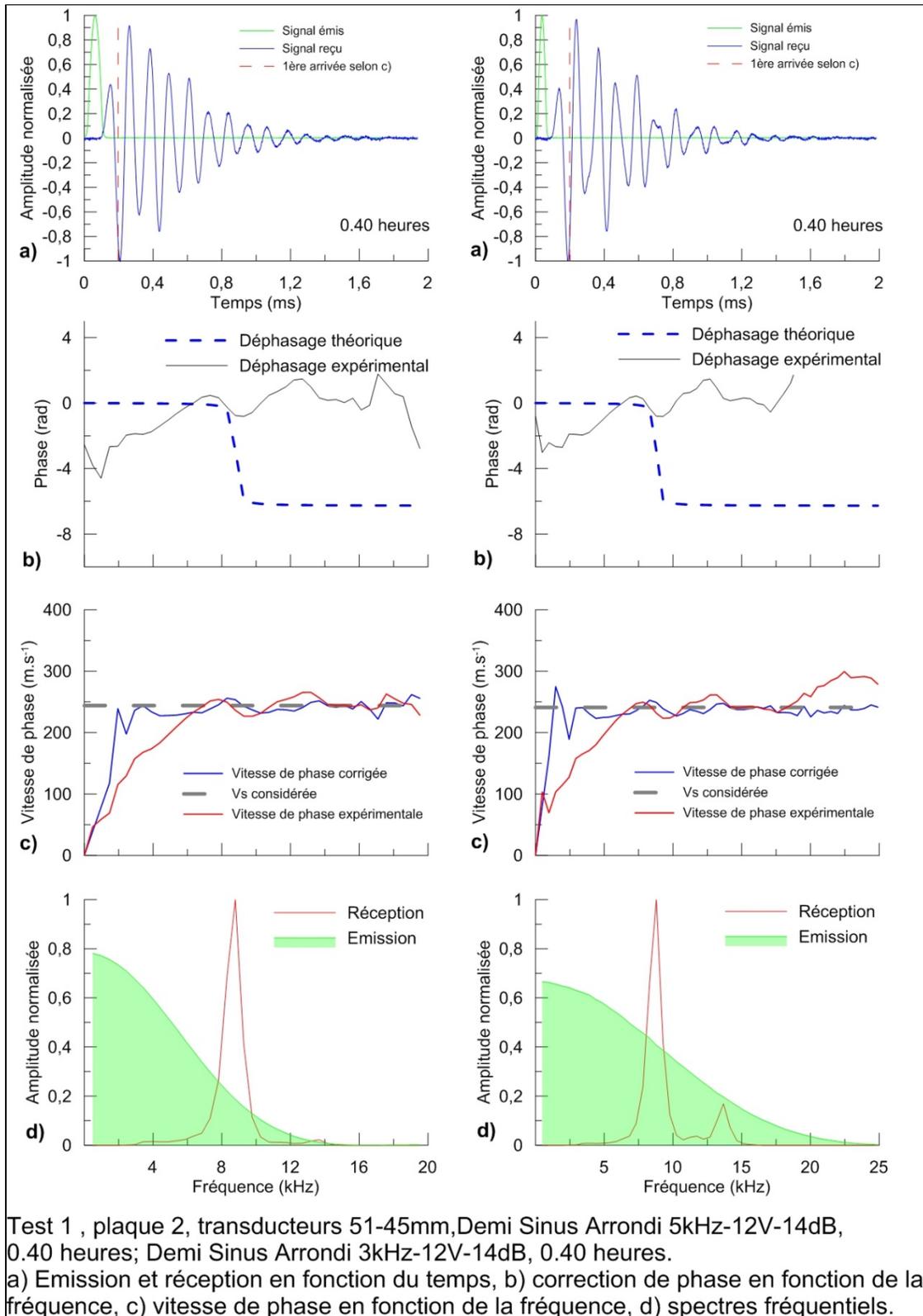


Figure-A VI-1 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

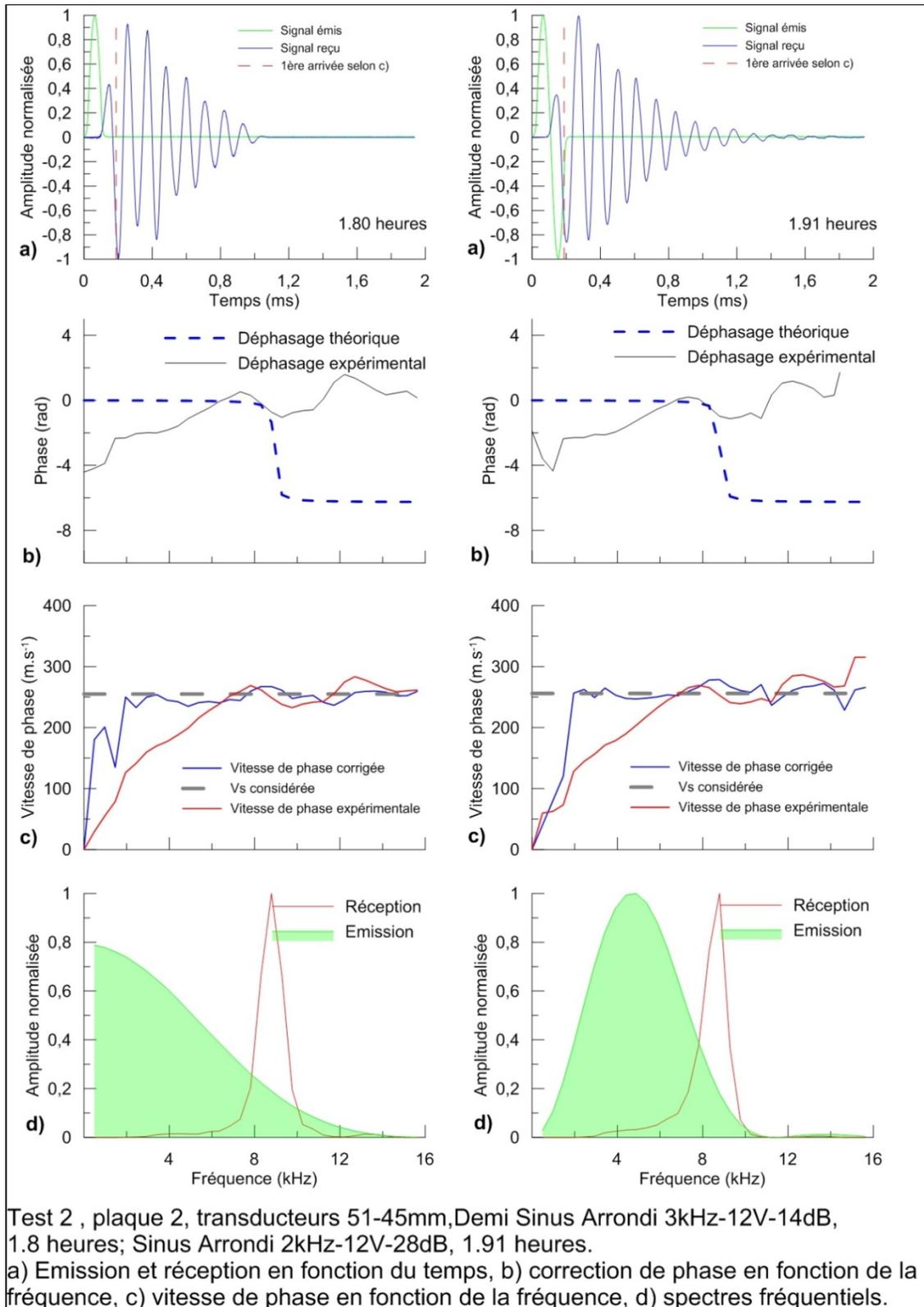
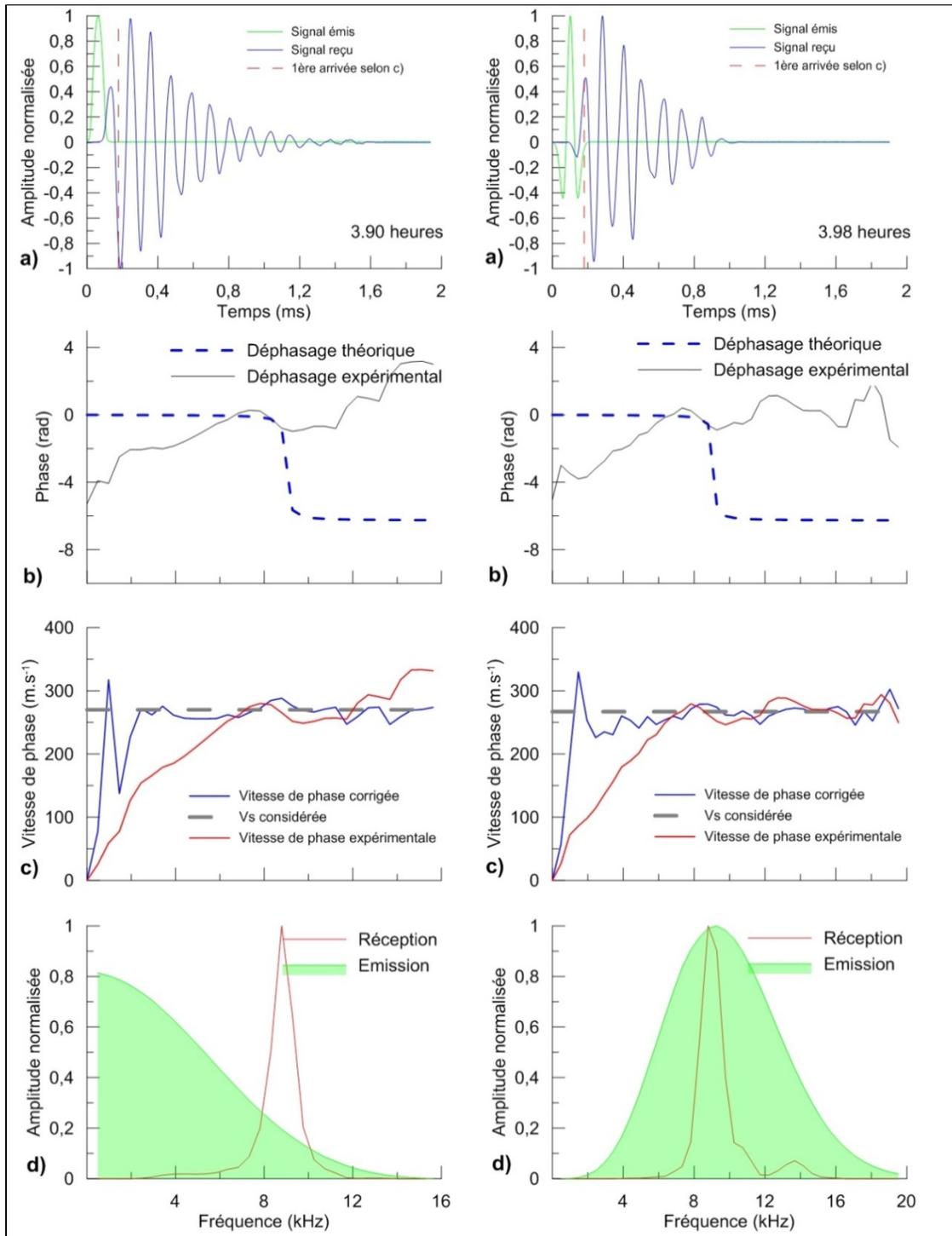


Figure-A VI-2 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm



Test 4 , plaque 2, transducteurs 51-45mm, Demi Sinus Arrondi 3kHz-12V-14dB, 3.90 heures; Ondelette 2kHz-12V-28dB, 3.98 heures.
 a) Emission et réception en fonction du temps, b) correction de phase en fonction de la fréquence, c) vitesse de phase en fonction de la fréquence, d) spectres fréquentiels.

Figure-A VI-3 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

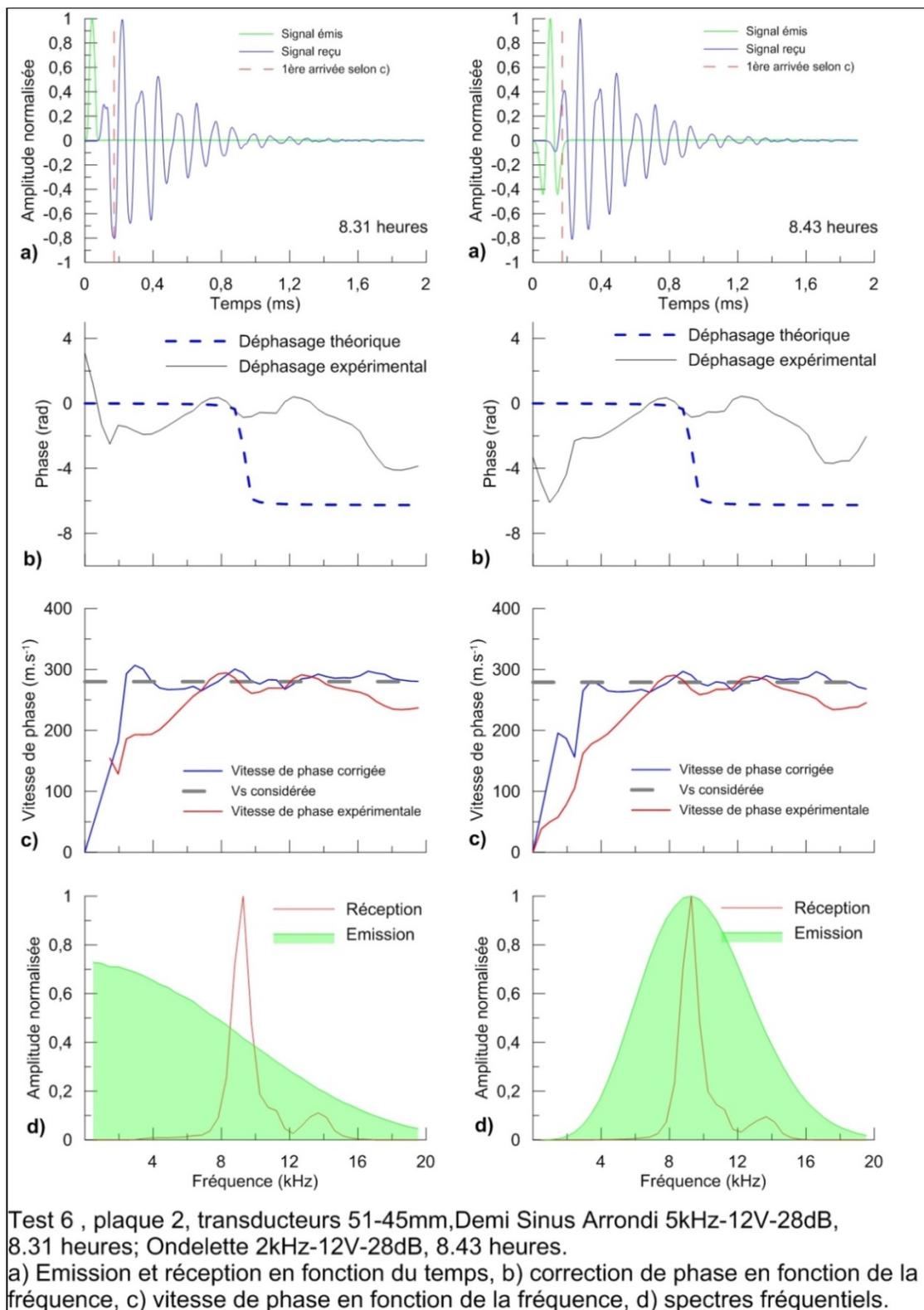


Figure-A VI-4 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

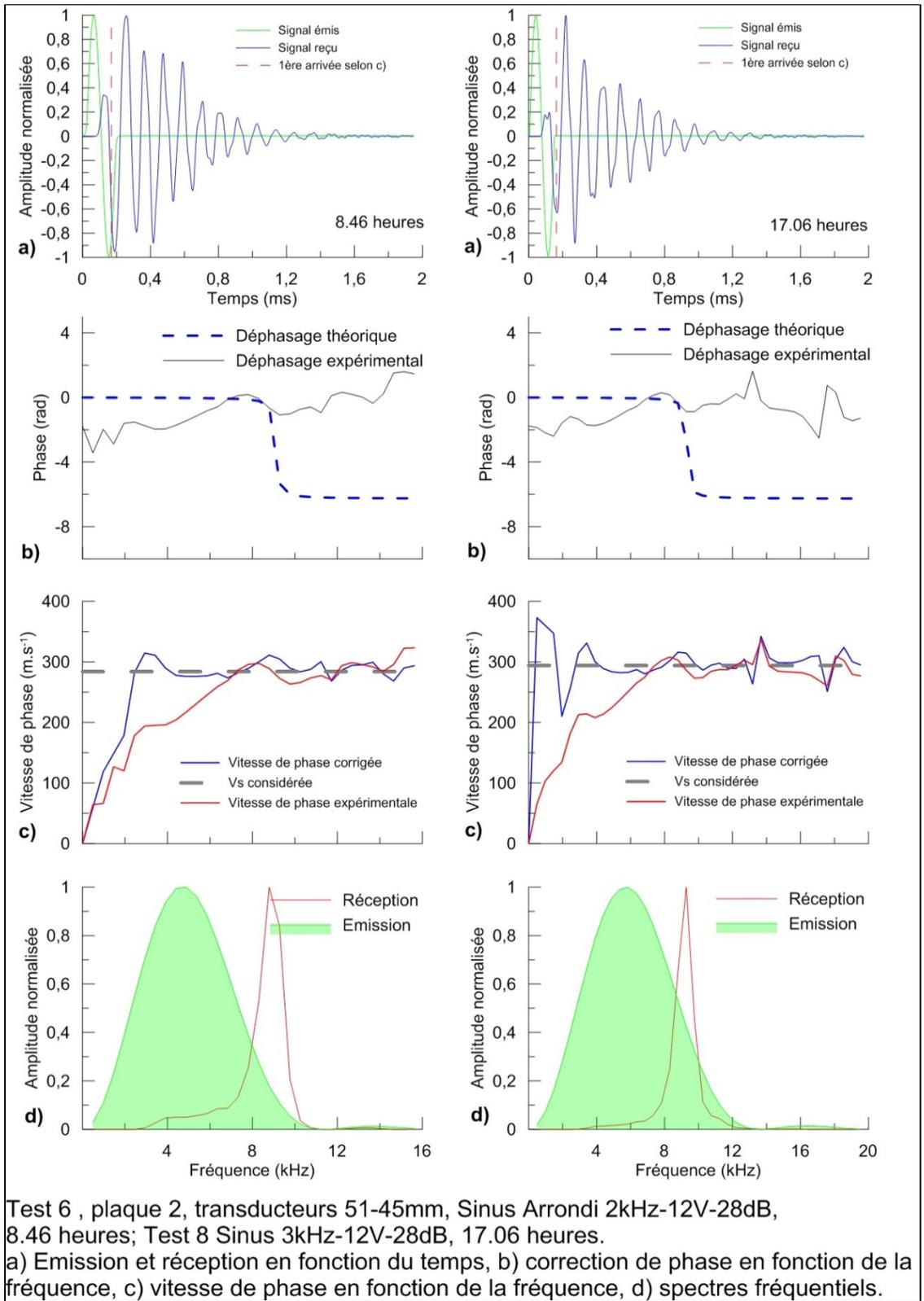


Figure-A VI-5 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

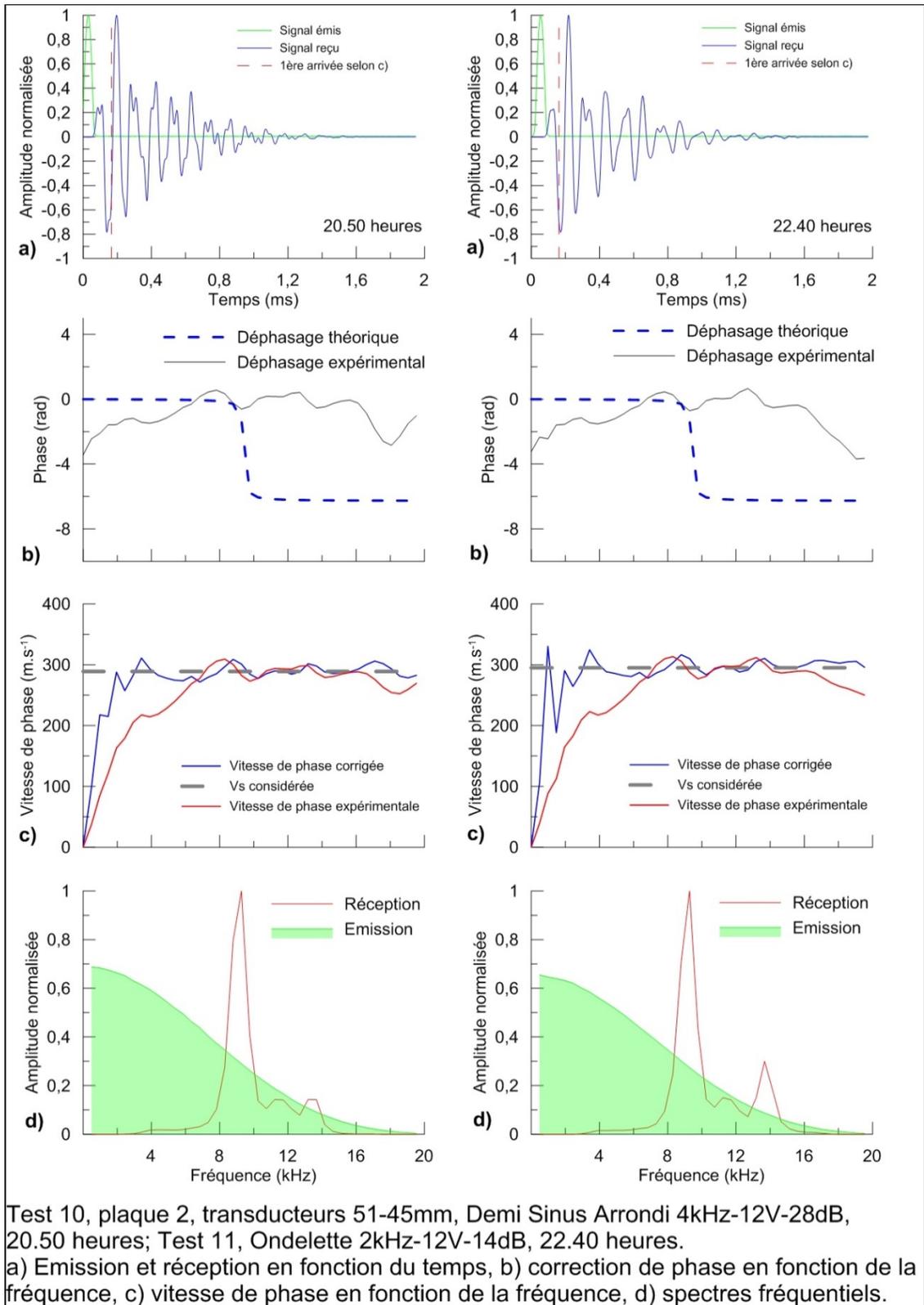


Figure-A VI-6 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

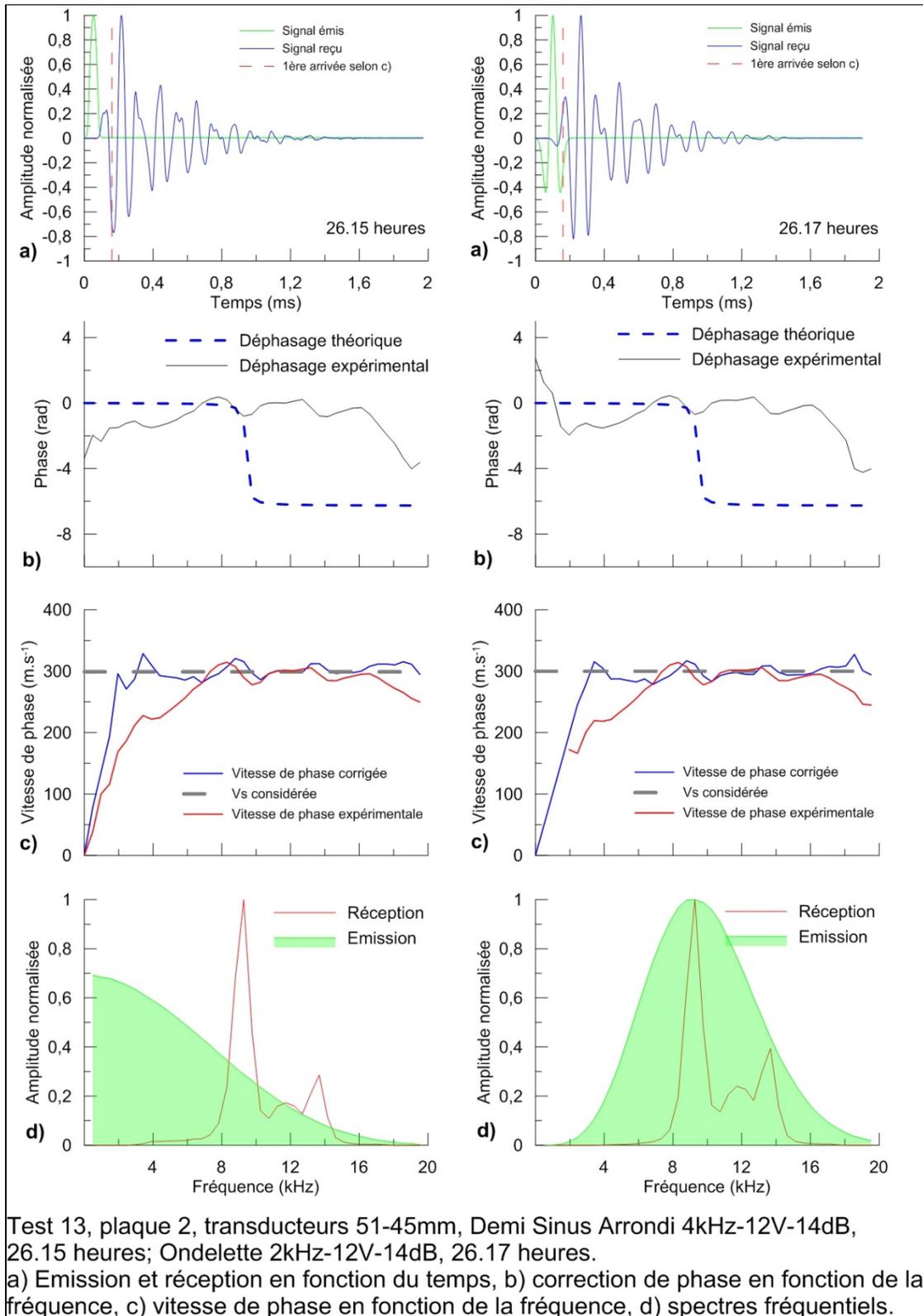


Figure-A VI-7 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

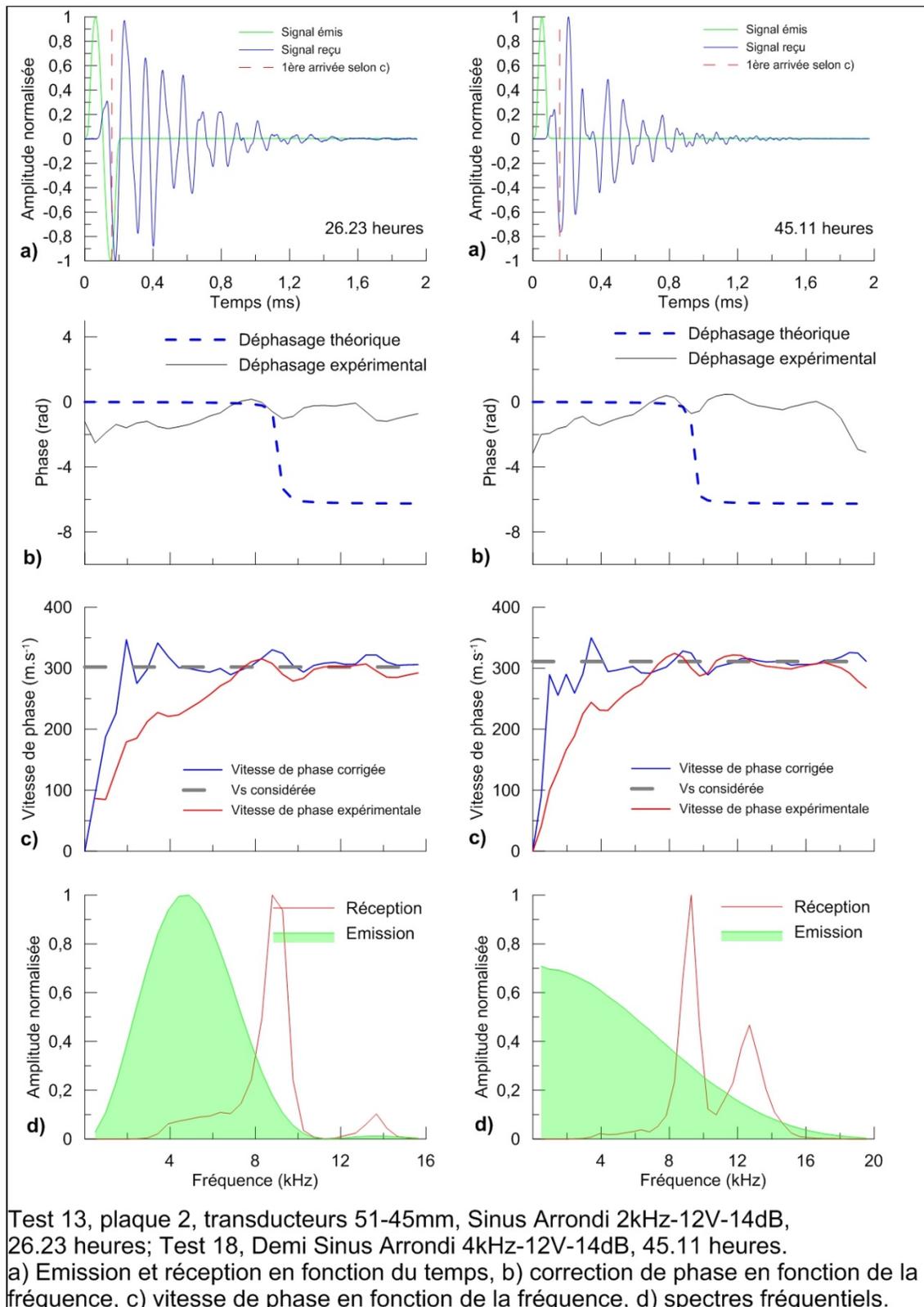


Figure-A VI-8 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

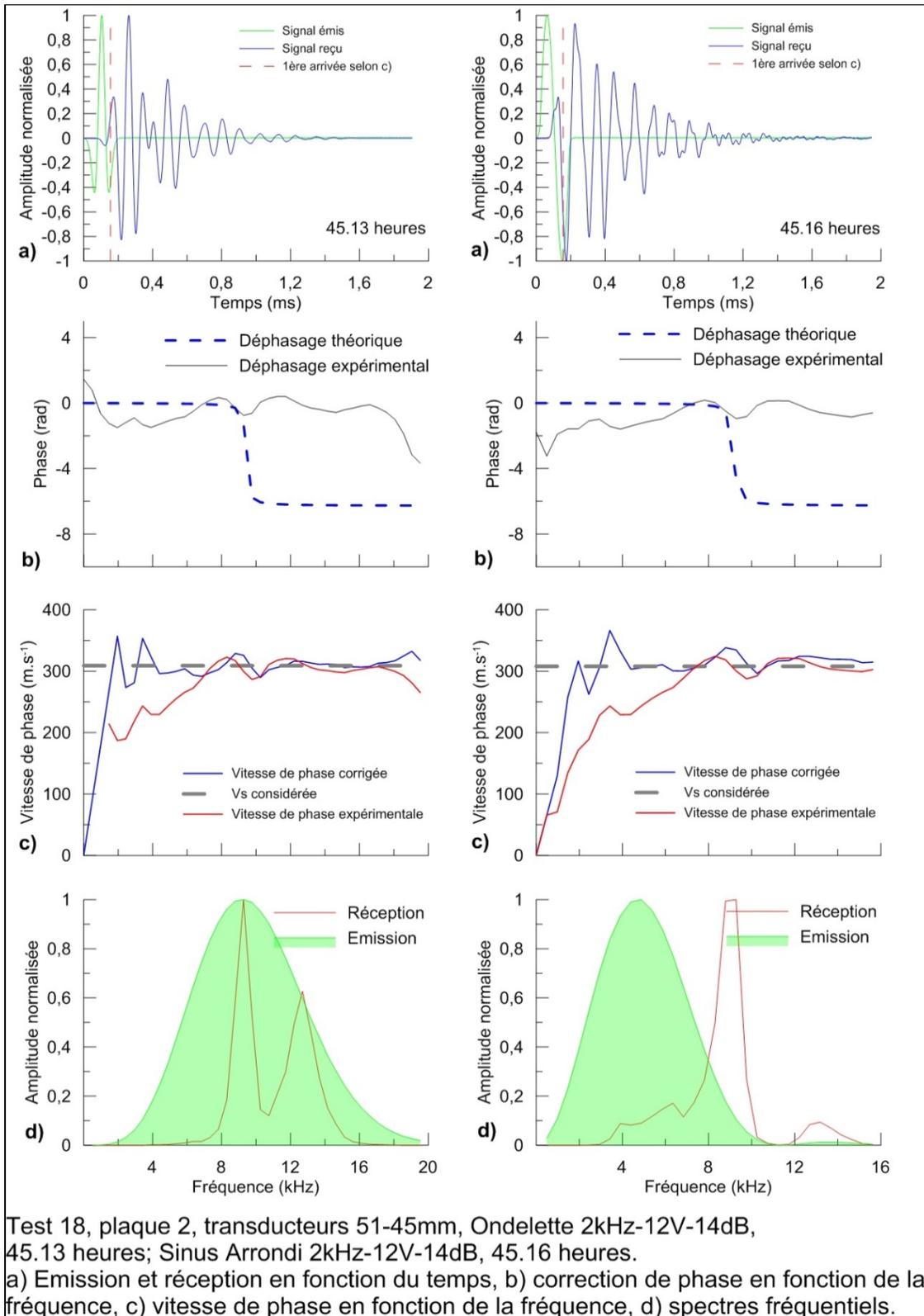


Figure-A VI-9 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

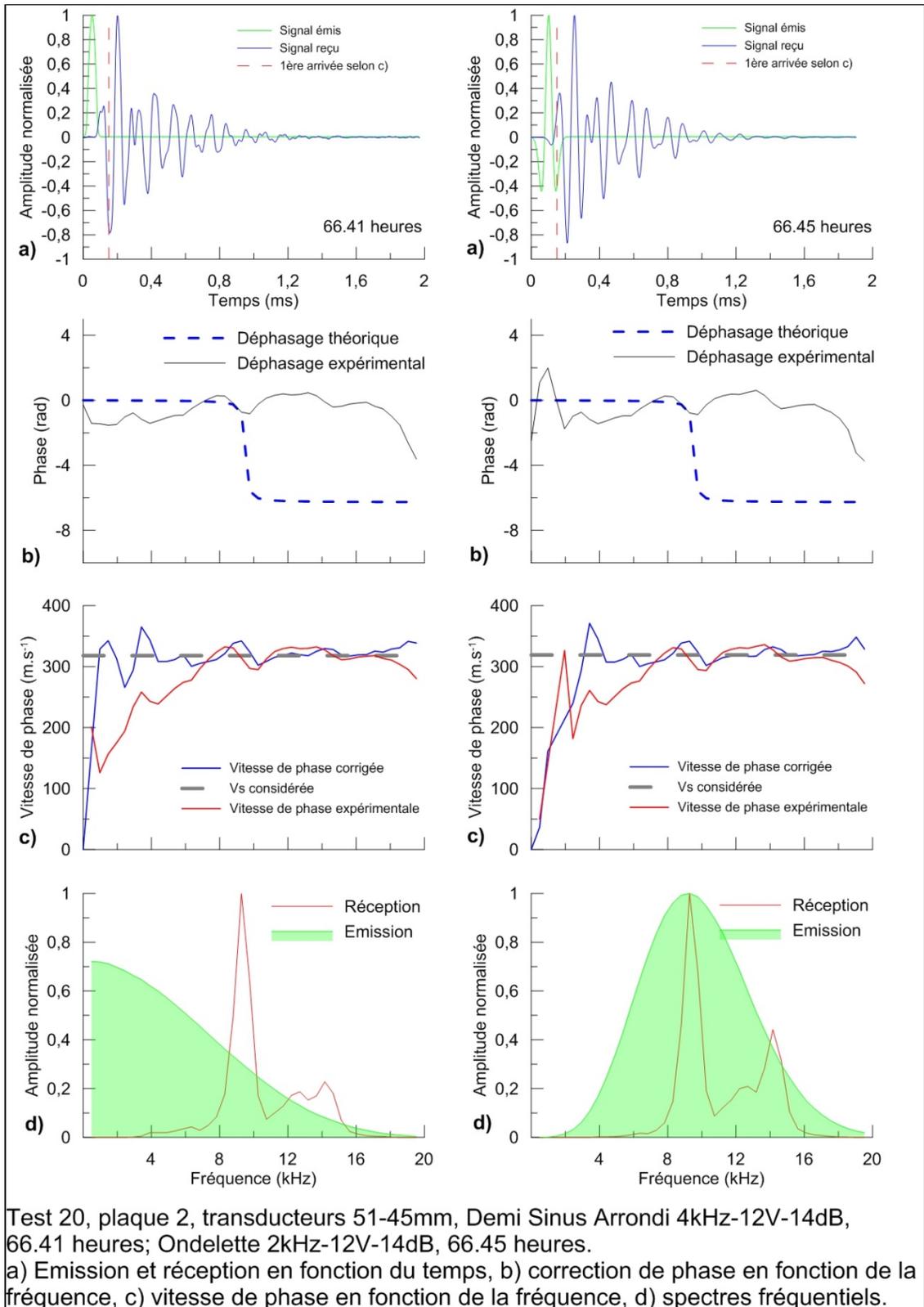


Figure-A VI-10 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

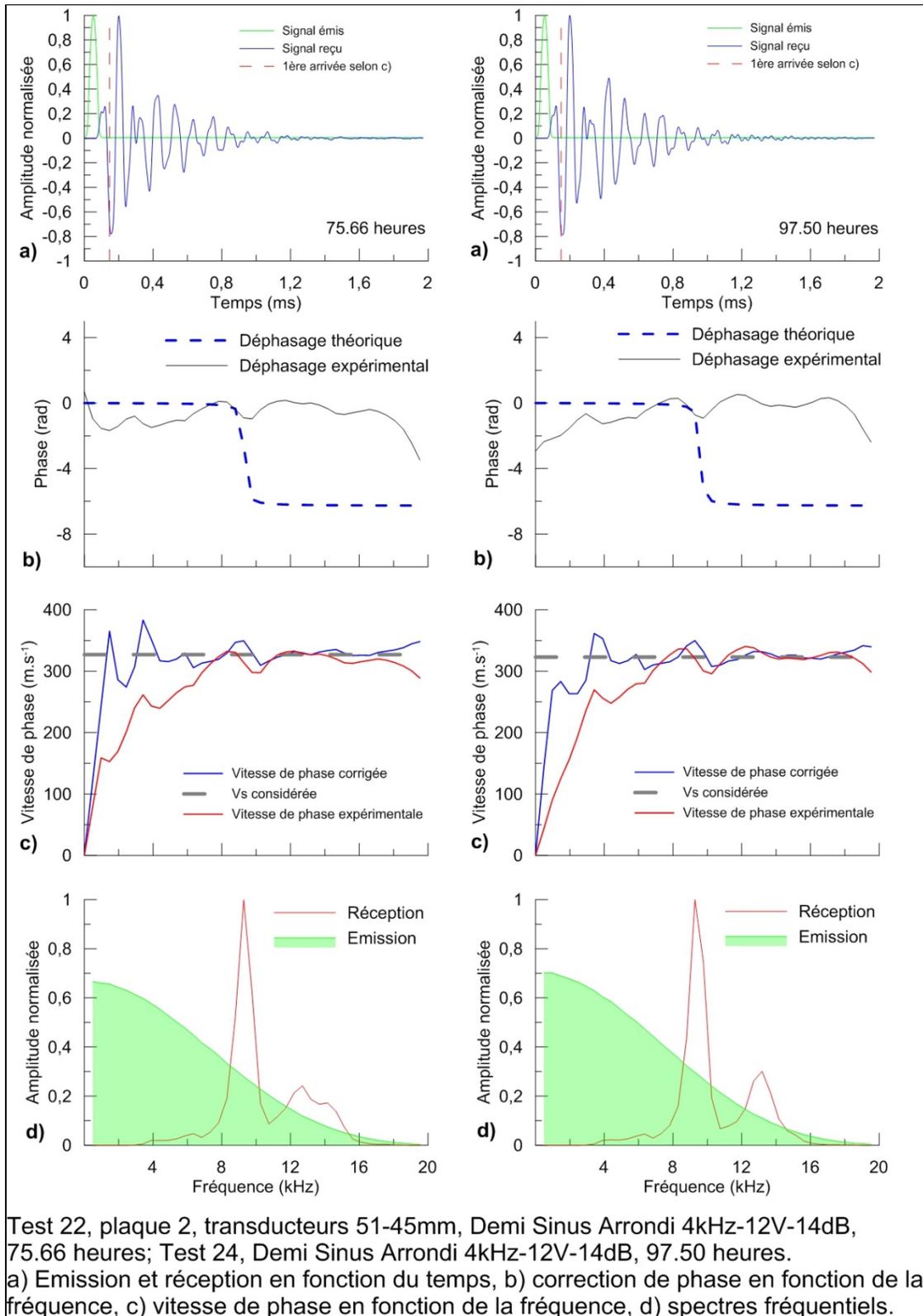


Figure-A VI-11 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

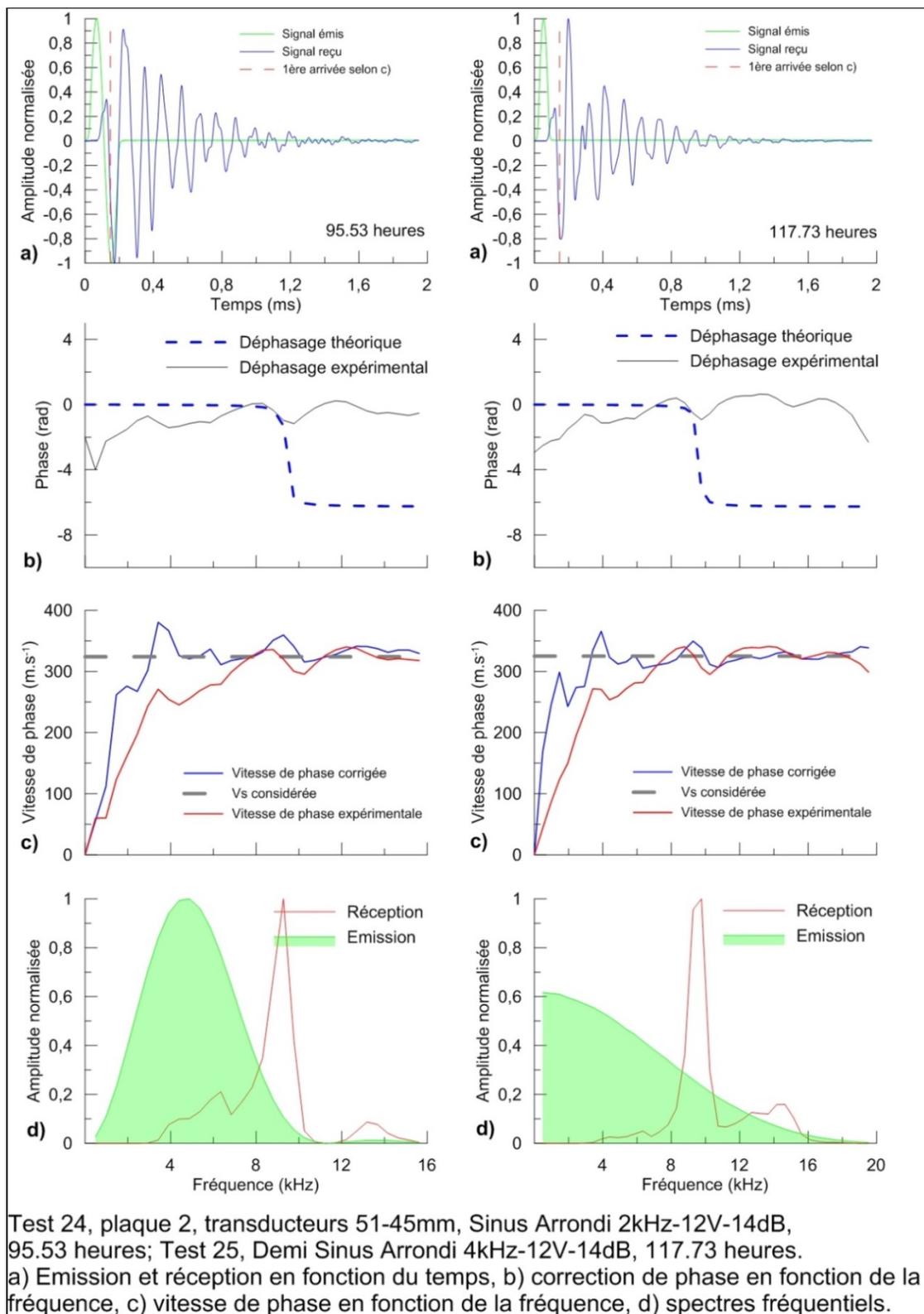


Figure-A VI-12 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

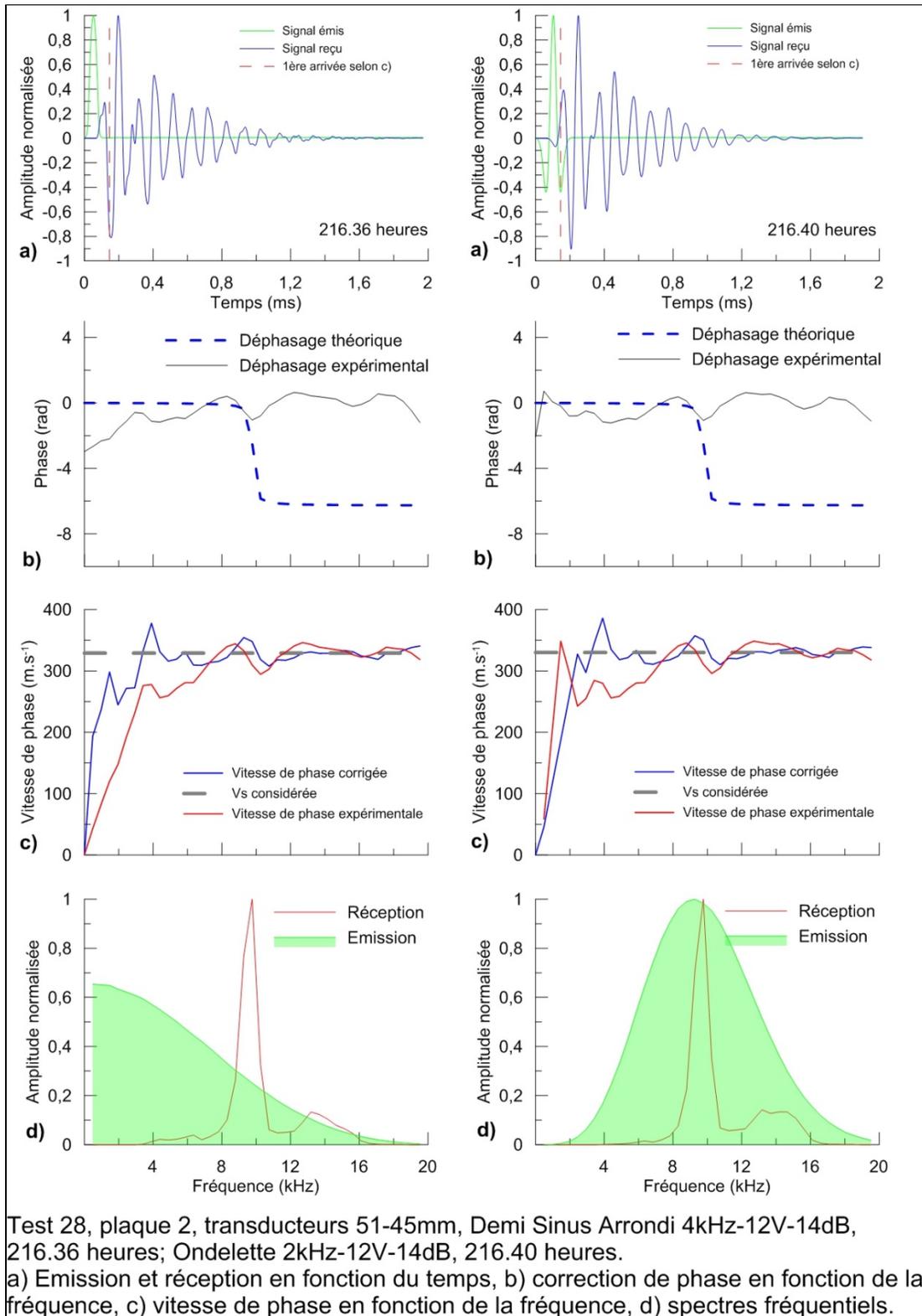


Figure-A VI-13 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

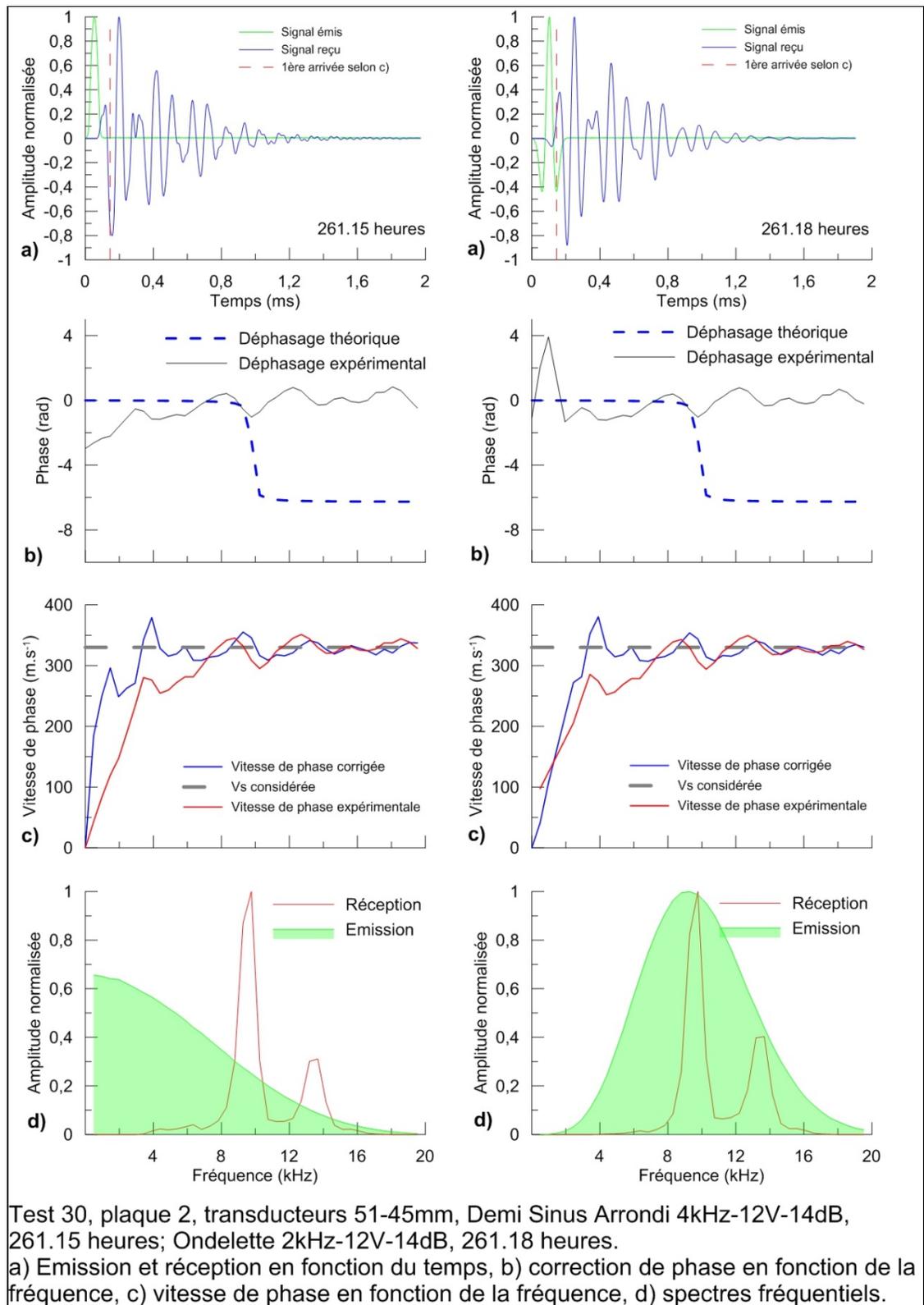


Figure-A VI-14 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

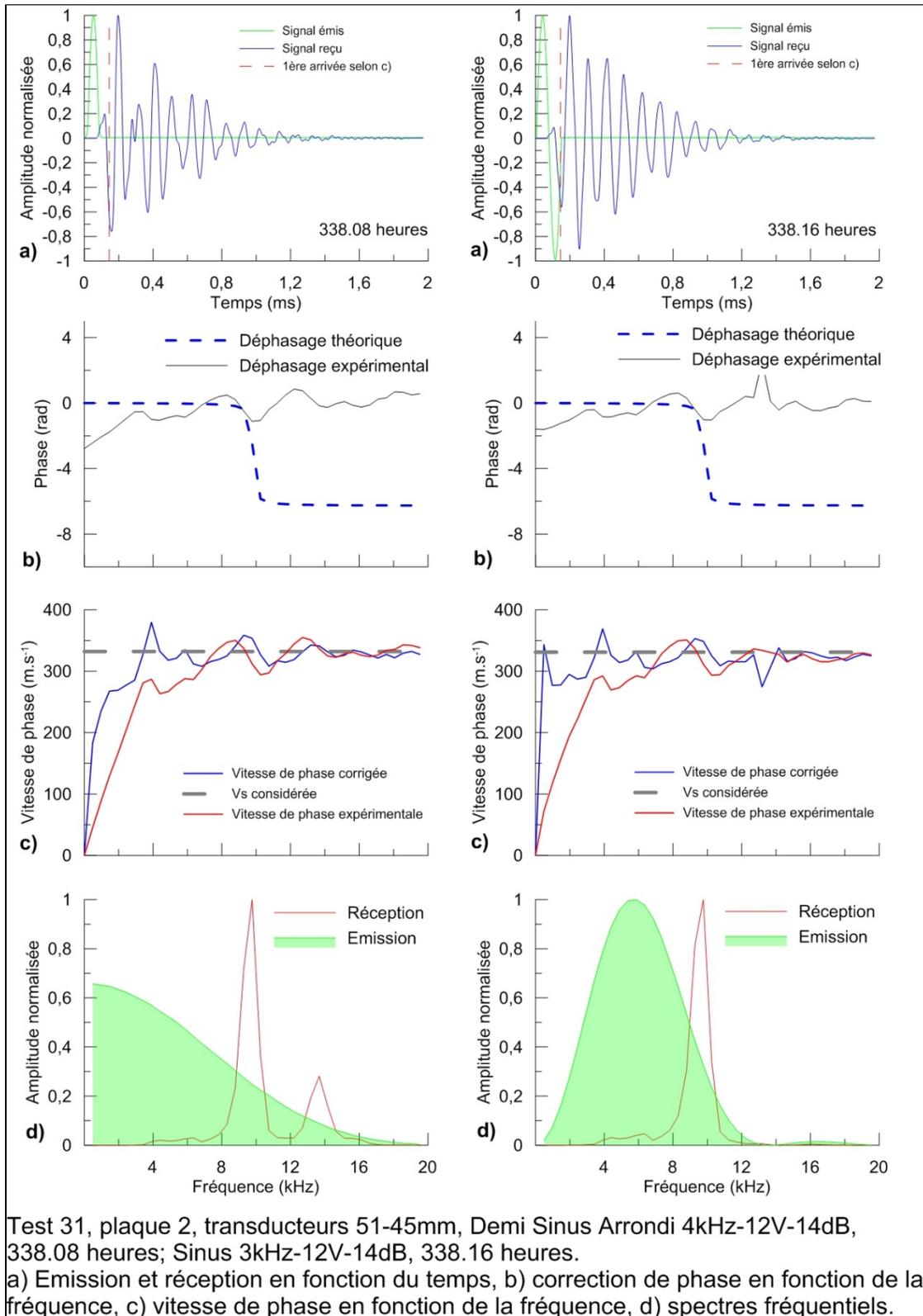


Figure-A VI-15 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

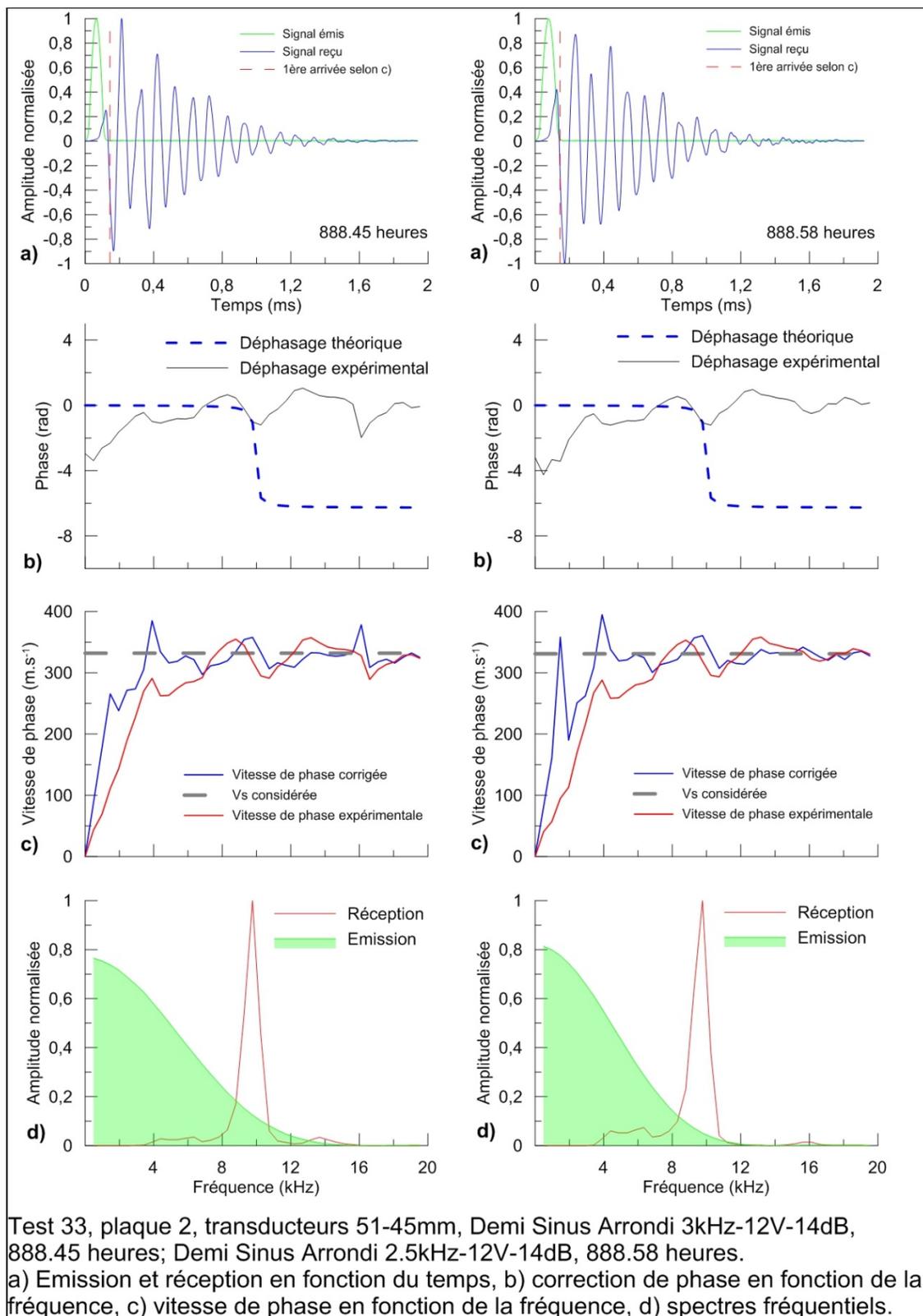


Figure-A VI-16 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

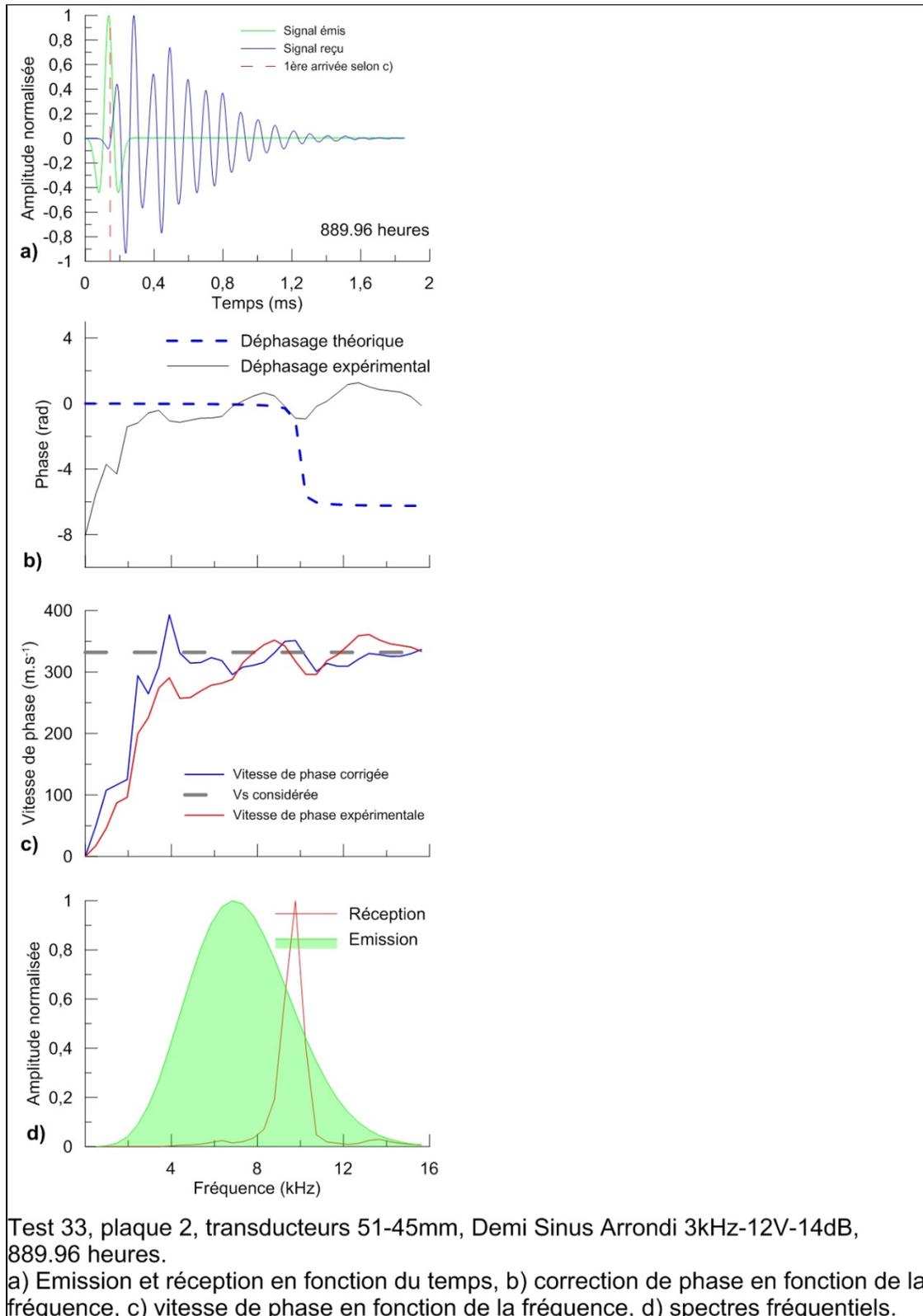


Figure-A VI-17 Plaque 2, transducteurs 51-45 mm

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM International. 2012. *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test*. ASTM International, ASTM D7369-11. 12 p.
- ASTM International. 2007. *Standard Test Methods for Modulus and Damping of soils by Resonant-Column Method*. ASTM International, ASTM D4015-07. 23p.
- Barnes Christopher L. et Jean-François Trottier. 2010. « Evaluating in-service asphalt concrete damage using surface waves ». *International Journal of Pavement Engineering*. vol.11 .n°6. p. 449-458.
- Bitume Québec. 2007. « Chartre 2 Processus décisionnel pour les options de retraitements à froid ». Dans *Le retraitement à froid des chaussées souples* LUCREB, Montréal, Canada, décembre 2007. 2 p.
- Bitume Québec. 2007. « Chartre 1 Définition de la structure d'une chaussée souple. Glossaire ». Dans *Le retraitement à froid des chaussées souples* LUCREB, Montréal, Canada, décembre 2007. 2 p.
- Bitume Québec. 2007. « Chartre 3 Dimensionnement de chaussée souple avec retraitement ». Dans *Le retraitement à froid des chaussées souples*. LUCREB, Montréal, Canada, décembre 2007. 2 p.
- Bitume Québec. 2007. « Chartre 4 Dosages types ». Dans *Le retraitement à froid des chaussées souples*. LUCREB, Montréal, Canada, décembre 2007. 1 p.
- Bitume Québec. 2010. « Le recyclage des enrobés bitumineux ». *Techno-Bitume – Bulletin Technique*, n°3, octobre 2010. 8 p.
- Bureau de Normalisation du Québec. 2002. *Granulats – Matériaux recyclés fabriqués à partir de résidus de béton, d'enrobés bitumineux et de briques – Classification et caractéristiques*. Norme du Québec, NQ 2560-600/2002. Québec (QC) : Bureau de Normalisation du Québec. 20 p.
- Calderon, Alvaro Ulloa. 2009. « Characteristics of Dynamic Triaxial Testing of Asphalt Mixtures ». Mémoire de master of science in civil engineering, Reno, University of Nevada. 203 p.

- Cardenas, Jose Alberto. 2013. « Évaluation de l'effet de la température de cure sur le comportement des matériaux bitumineux de type MR-5 traités à la mousse de bitume ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure. 136 p.
- Carter Alan, Nicolas Bueche et Daniel Perraton. 2013. «Laboratory Characterization of CIR and FDR materials». Dans *3rd Specialty conference on material Engineering and mechanics*, CSCE, Canadian Society of Civil Engineering. Montreal. Canada. mai 2013. 10 p.
- Carter Alan et Daniel Perraton. 2002. « La mesure du module complexe des enrobés bitumineux » Dans *2ème Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil, CSCE*. Montréal. Canada. Juin 2002. 10 p.
- Diffiné, Thomas. 2012. « Analyse des déformations d'une chaussée contenant des matériaux bitumineux recyclés à froid ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de Technologie Supérieurs. 219 p.
- Dos Reis, Henrique L. M., Amin K. Habboub et Samuel H. Carpenter. 1999 «Nondestructive Evaluation of Complex Moduli in Asphalt Concrete with an Energy Approach». *Transportation Research Record*. n°1681. p. 170-178.
- Ethier, Yannic. 2009. « La mesure en laboratoire de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement ». Thèse de doctorat en génie de civil, Sherbrooke, Université de Sherbrooke. 320 p.
- Feisthauer Bruno, David Lacroix, Alan Carter et Daniel Perraton. 2013. «Simulation and influence of early life traffic curing for cold in-place recycling and full depth reclamation materials ». Dans *3rd Specialty conference on material Engineering and mechanics*, CSCE, Canadian Society of Civil Engineering. Montreal. Canada. mai 2013. 10 p.
- Gaonach, Marion. 2012. « Mesure in-situ de la teneur en eau avec sondes dans les matériaux recyclés traités à froid avec une émulsion de bitume ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 193 p.
- Hochuli A.S., M.B. Sayir, L.D. Poulidakos et M.N Partl. 2001. «Measuring the complex modulus of asphalt mixtures by structural wave propagation». Dans *26th Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving technologists, AAPT*. Clear Water Beach, Floride, États Unis. 19-21 Mars 2001. 37 p.

- Houel Adrien et Laurent Arnaud. 2009. « Damage characterization of asphalt in laboratory by ultrasonic wave propagation » Dans *7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering*, . Nantes. France. 30 Juin- 3 Juillet, 2009. 6 p.
- Jiang, Zhiyong, Joseph Ponniah, Giovanni Cascante et Ralph Haas. 2011. « Nondestructive ultrasonic testing methodology for condition assessment of hot mix asphalt specimens ». *Canadian Journal of Civil Engineering*. vol. 38. p. 751-761.
- Karray, Mourrad, Guy Lefebvre, Yannic Ethier et Annick Bigras. 2010. « Assessment of deep compaction of the Péribonka dam foundation using « modal analysis of surface waves » (MASW) ». *Canadian Geotechnical journal*. Vol.47. p. 312-326.
- Karray, Mourrad, Mohamed Ben Romdhan, Mahmoud N. Hussien et Yannic Ethier. 2015. « Measuring shear wave velocity of granular material using the piezoelectric ring-actuator technique(P-RAT) ». *Canadian Geotechnical journal*. vol.52. p. 1-16.
- Karray, Mourad. 2015. Communications personnels.
- Kim, Yongoo, Hosin David. Lee et Michael Heitzman. 2009. « Dynamic modulus and repeated load tests of cold in-place recycling mixtures using foamed asphalt ». *Journal of materials in civil engineering*. vol. 21. n°6. p. 279-285.
- Kim, Yongjoo, Hosin David Lee. 2012. « Performance evaluation of cold in-place recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus, flow number, flow time and raveling loss ». *Journal of civil engineering*. vol. 16. n°4. p. 586-593.
- Kramer, Steven L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1^{ère} ed. Coll. « Prentice Hall ». Upper Saddle River, New Jersey. 653 p.
- Le Bec Sabine. 2012. « Les émulsions de bitume, formulation et fabrication selon leur usage » Dans *Formation technique 2012 Bitume Québec Utilisation des liant bitumineux en centrale et chantier*. Montréal. 4 et 5 décembre, 2012.
- Loizos, A. et V. Papavasiliou. 2006. « Evaluation of foamed asphalt cold in-place pavement recycling using nondestructive technique ». *Journal of Transportation Engineering*. vol. 132. n°12. p. 970-978.

- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2001. *Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion*. Méthode d'essai LC 26-002. Québec : Ministère des Transports du Québec. 29p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2009. *Détermination du module complexe des enrobés*. Méthode d'essai LC 26-700. Québec : Ministère des Transports du Québec. 15p.
- Mounier, Damien, Hervé Di Benedetto et Cédric Sauzéat. 2012. «Determination of bituminous mixtures linear properties using ultrasonic wave propagation». *Construction and Building Materials*. vol 36. p. 638-647.
- Murat, Karacasu et Volkan Okur et Arzu Er. 2014. « A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures ». *The Scientific World Journal*. Vol 2015. 9p.
- Pezhouhan, Tavassoti K., Mansour Solaimanian et Tong Qiu. 2014. « Nondestructive Evaluation of Warm Mix Asphalt through Resonant Column Testing » Rapport de Larson Transportation Institute. Université de Pennsylvanie. Etats-Unis. 36 p.
- Rojas, Jaime. 1999. « Quality management of asphalt-concrete layers using wave propagation techniques ». Mémoire de maîtrise en Ingénierie civile. El Paso. University of Texas. 146 p.
- Santagata, Ezio, Giuseppe Chiappinelli, Pier Paolo Riviera et Orazio Baglieri. 2010. «Triaxial testing for the short term evaluation of cold-recycled bituminous mixtures». *Road Materials and pavement design*. vol 11. n°1 . p. 123-147.
- St-Amand, André. 2008. *Physique des ondes*, 2e édition. Coll. « Les Presses de l'Université du Québec ». Québec : École de technologie supérieure. 428 p.
- Todd, Thomas. 2015. « Cold Recycling of RAP with Bituminous Emulsions – Characterization and Experiences » Dans *the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving technologists, AAPT*. Portland, Ontario, Canada. mars 2015. 34 p.
- Wen, Hafiang. 2001. « Fatigue performance evaluation of westrack asphalt mixtures based on viscoelastic analysis of indirect tensile test ». Thèse pour l'obtention d'un doctorat en Ingénierie civile, Raleigh, Caroline du Nord, Graduate Faculty of North Carolina State University. 146 p.

Whimoyer Steven L. et Y. Richard Kim. 1994. « Determinig Asphalt Concrete Properties via the Impact Resonant Method ». *Journal of Testing and Evaluation, JTEVA*. Vol. 22. N°2. p. 13

