

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE N° 602

Sciences Pour l'Ingénieur

Spécialité : Génie Civil

Par

Cheikh A. T. SARR

Vers une auscultation par acousto-ultrasons des renforcements par composites collés de structures du génie civil

Thèse présentée et soutenue à Université Gustave Eiffel - Campus de Nantes, le 26/01/2022

Unité de recherche : Département MATériaux et STructures (**MAST**), Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes

Rapporteurs avant soutenance:

Jean-François CARON
Zoubir Mehdi SBARTAÏ

Directeur de recherche, ENCP, Champs sur Marne
Professeur des universités, Université de Bordeaux

Composition du Jury :

Président :	Christophe BINETRUY	Professeur des universités, École Centrale de Nantes
Examineurs :	Marianne PERRIN	Maître de conférences, Université Toulouse III
	Aurélien DOITRAND	Maître de conférences, INSA Lyon
Dir. de thèse :	Sylvain CHATAIGNER	Ingénieur des TPE HDR, Université Gustave Eiffel
Co-dir. de thèse :	Laurent GAILLET	Directeur de recherche, Université Gustave Eiffel
Co-encadrante :	Nathalie GODIN	Maître de conférences HDR, INSA Lyon

*À Mère Fall
ak Gorgui Mbaye*

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à mon encadrement Sylvain CHATAIGNER, Laurent GAILLET et Nathalie GODIN. Vous avez su être patient avec moi, vous m'avez donné l'opportunité d'apprendre à mon rythme et j'ai beaucoup appris de vous sur le plan personnel et professionnel. Je remercie également les membres du jury, le président Christophe BINETRUY, les rapporteurs Jean-François CARON et Zoubir Mehdi SBARTAÏ et enfin les examinateurs Aurélien DOITRAND et Marianne PERRIN, ainsi que les membres de mon CSI Mourad BENTAHAR et Éric LE GAL LA SALLE. Je leur suis reconnaissant du temps qu'ils ont bien voulu consacrer à ma modeste personne et à mon travail.

Ce travail a été réalisé principalement au laboratoire Structures Métalliques et à Câbles (SMC) du département MAST (MATériaux et STructures) de l'Université Gustave Eiffel, et je profite de cette occasion pour adresser mes remerciements à toute l'équipe pour ces beaux moments passés ensemble et pour le dynamisme qui a sévi au sein du labo. Plus particulièrement, je remercie les techniciens de mon pôle Yannick FALAISE, Jean-François DAVID et Richard MICHEL qui m'ont beaucoup aidé sur les aspects techniques du projet. Une partie des travaux a été réalisée dans les laboratoires MATEIS et MIT, et donc je remercie leurs membres pour leur magnifique accueil. La partie sur la modélisation a été réalisée en collaboration avec Jialiang GUO dont je suis reconnaissant de même que les mesures DSC qui ont pu être faites grâce au concours de Cédric PETITEAU et de Vincent GAUDEFROY.

Je ne saurais finir sans adresser mes remerciements à mes parents, sans qui, je ne serais pas devenu ce que je suis. Ma mère Adama qui est une battante, une vraie lionne de la Térranga et mon père Mbaye qui a un cœur aussi pur que le Zamzam, je ne les remercierai jamais assez pour l'éducation qu'ils m'ont donnée. J'aimerais également remercier ma famille, mes frères et sœurs qui m'ont soutenu dans mon projet de continuer mes études jusqu'à ce stade et notamment celles qui m'ont tenu compagnie durant tout ce temps Marietou et Aminata. Une pensée va également à mes camarades de promotion du prytanée militaire ainsi qu'à mes plus qu'amis, mes frères et sœurs de l'ESP. Je remercie aussi ma seconde famille que je me suis forgée à Nantes, des personnes formidables qu'ALLAH a mises sur mon chemin, elles se reconnaîtront. Toutes ces personnes, chacune reliées par des fils invisibles, ont contribué à façonner la personne que je suis.

B.H.A.W.S.A.N

Table des matières

Table des matières	iii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xiv
Introduction générale	1
1 Bibliographie	5
1.1 Introduction	6
1.2 Les assemblages collés dans le génie civil	6
1.2.1 Domaine d'application	6
1.2.1.1 Bref historique du collage	6
1.2.1.2 Quelques définitions associées au collage	7
1.2.1.3 Contexte d'utilisation du collage dans le génie civil	9
1.2.2 Les défauts de collage	16
1.2.2.1 Les typologies de défauts	16
1.2.2.2 Criticité des défauts	17
1.2.2.3 Simulation des défauts	18
1.2.3 Les techniques CND appliquées pour la réception des assemblages collés du génie civil	19
1.2.3.1 L'inspection visuelle	19
1.2.3.2 Le sondage au maillet	20
1.3 État de l'art sur les techniques CND/END appliquées au assemblages collés	21
1.3.1 Les CND/END à base d'ondes électromagnétiques	21
1.3.1.1 Les thermographies passives et actives	22
1.3.1.2 Les techniques optiques	24
1.3.1.3 La radiographie	25
1.3.2 Les CND/END utilisant les ondes ultrasonores et acoustiques	26
1.3.2.1 Aspect physique de la propagation des ondes mécaniques	27
1.3.2.2 Les techniques à base d'ultrasons (US)	31
1.3.2.3 L'émission acoustique (EA)	33
1.3.2.4 La technique des acousto-ultrasons (AUS)	35
1.3.3 Modélisation de la méthode des acousto-ultrasons sur des assemblages collés	44
1.3.3.1 Modèles matériaux pour un assemblage collé	45
1.3.3.2 Modélisation de l'onde élastique	46
1.4 Les méthodes d'aide au diagnostic	50
1.4.1 Méthode de détection : analyse mono-paramétrique	50

1.4.2	Méthodes d'identification supervisée et non supervisée	51
1.4.2.1	Classifications non supervisées : K-moyennes	52
1.4.2.2	Analyse par composantes principales	53
1.4.2.3	Classification supervisée : forêt d'arbres décisionnels	57
1.5	Bilan et position du travail de thèse	61
2	Matériaux et Méthodes	62
2.1	Introduction	64
2.2	Assemblages étudiés	65
2.2.1	Choix du procédé de collage (adhérents et adhésif)	65
2.2.1.1	Assemblages collés acier-composite	65
2.2.1.2	Assemblages collés béton-composite	66
2.2.1.3	Protocole de mise en œuvre du collage	67
2.2.2	Simulation des défauts étudiés	68
2.2.2.1	Choix et simulations des défauts	68
2.2.2.2	Échantillon avec un seul défaut	69
2.2.2.3	Échantillons avec plusieurs défauts	70
2.3	Protocole de mesures pour les acousto-ultrasons	73
2.3.1	Système ultrasons	73
2.3.1.1	Choix du couplant	73
2.3.1.2	Configuration de l'émission des signaux	76
2.3.1.3	Configuration de la réception des signaux	78
2.3.1.4	Choix des capteurs Piézoélectriques	79
2.3.2	Protocole de mesure retenu	82
2.3.3	Évaluation de la distance maximale d'investigation sur les assemblages BC-Po	83
2.4	Évaluation de l'impact de différents facteurs pouvant influencer la répétabilité des mesures	84
2.4.1	Effet de la variation de la température ambiante sur les mesures	84
2.4.2	Effet de la variation du degré de polymérisation de l'adhésif sur les mesures d'AUS	85
2.5	Exploitation des mesures	87
2.5.1	Traitement du signal et détermination des descripteurs	87
2.5.1.1	Descripteurs calculés via AEWIn	88
2.5.1.2	Descripteurs calculés via COSMOS	88
2.5.2	Calculs des coefficients de corrélation dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel	90
2.5.3	Analyse mono-paramétrique : exploitation des diagrammes en boîte	92
2.5.4	Analyse multi-paramétrique : Analyse par composantes principales (ACP)	92
2.5.5	Classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels	93
2.5.6	Modélisation par élément finis de la technique des acousto-ultrasons	94
2.5.6.1	Modélisation des éprouvettes	94
2.5.6.2	Modélisation de la source et de la propagation de l'onde	96
2.5.6.3	Modélisation des capteurs	97
2.6	Conclusion	99
3	Application de la méthodologie de diagnostic aux éprouvettes "modèles"	100

3.1	Introduction	102
3.2	Méthodologie de diagnostic de l'état de santé d'un joint collé acier/composite (assemblages AC-1P)	103
3.2.1	Évaluation de la répétabilité des mesures sur substrat acier	103
3.2.1.1	Corrélation des signaux collectés sur un même échantillon : analyse dans le domaine temporel	103
3.2.1.2	Analyse de la corrélation dans le domaine fréquentiel	105
3.2.1.3	Comparaison de signaux reçus pour des échantillons différents	106
3.2.2	Proposition d'une méthodologie de détection simple	107
3.2.2.1	Analyse paramétrique pour le capteur n°1 (d = 230 mm)	108
3.2.2.2	Analyse paramétrique des données collectées par le capteur n°2 situé au droit du défaut	110
3.2.2.3	Bilan de l'analyse paramétrique pour la détection des défauts dans un assemblage AC-1P	110
3.2.3	Identification de la nature des défauts dans un assemblage de composite collé sur substrat acier	111
3.2.3.1	Analyse en composantes principales des données	112
3.2.3.2	Classification supervisée (RF) des signaux reçus sur des assemblage AC-1P	114
3.3	Méthodologie de diagnostic de l'état de santé du joint collé composite/béton (assemblages BC-Da)	116
3.3.1	Évaluation de la répétabilité des mesures sur substrat béton	117
3.3.1.1	Corrélation dans le domaine temporel et fréquentiel des signaux enregistrés sur le même échantillon	117
3.3.1.2	Comparaison de signaux enregistrés pour les différents échantillons	118
3.3.2	Détection des défauts par analyse paramétrique	120
3.3.2.1	Analyse paramétrique des données enregistrées par le capteur n°1	120
3.3.2.2	Analyse paramétrique pour la position du capteur n°2	121
3.3.2.3	Bilan de l'analyse paramétrique pour la détection des défauts dans un assemblage BC-Da	122
3.3.3	Identification des défauts dans un assemblage de composite collé sur substrat béton	122
3.3.3.1	Analyse en composantes principales des données collectées sur les assemblages BC-Da	123
3.3.3.2	Classification supervisée des signaux reçus sur les assemblages BC-Da	127
3.4	Conclusion	130
4	Évaluation des limites de la méthodologie de diagnostic proposée pour des assemblages d'échelle plus importante	133
4.1	Introduction	135
4.2	Évaluation de l'effet de la proximité d'un assemblage défectueux : Application de la méthodologie sur les assemblages AC-3P	135
4.2.1	Évaluation de la répétabilité des mesures	136
4.2.1.1	Évaluation de la corrélation entre les signaux reçus sur une même éprouvette : domaines temporel et fréquentiel	136

4.2.1.2	Comparaison entre deux signaux reçus sur des assemblages différents	137
4.2.2	Effets du changement d'échelle sur la détection des défauts	138
4.2.2.1	Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°1	138
4.2.2.2	Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°2	140
4.2.2.3	Synthèse sur la détection des défauts dans les assemblages AC-3P	141
4.2.3	Effets du changement d'échelle sur l'identification des défauts	142
4.2.3.1	Analyse en composantes principales	142
4.2.3.2	Évaluation de l'identification par classification supervisée par une forêt d'arbres décisionnels	145
4.2.3.3	Bilan de l'évaluation de l'effet du changement d'échelle sur l'identification des défauts	148
4.3	Évaluation de l'effet de la présence de plusieurs défauts sur un même linéaire de composite : Application sur les assemblages BC-Po	148
4.3.1	Évaluation de la répétabilité des mesures	149
4.3.1.1	Évaluation dans le domaine temporel et fréquentiel de la similitude des signaux reçus sur une même zone d'étude	149
4.3.1.2	Comparaison entre des signaux reçus sur des zones d'étude différentes	150
4.3.2	Évaluation des effets de la combinaison des défauts sur leur détection	151
4.3.2.1	Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°1	152
4.3.2.2	Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°2	153
4.3.2.3	Synthèse sur la détection des défauts dans les assemblages BC-Po	155
4.3.3	Évaluation de l'identification des défauts dans les assemblages BC-Po	156
4.3.3.1	Identification par ACP	156
4.3.3.2	Évaluation de l'identification par classification supervisée par une forêt d'arbres décisionnels	160
4.3.3.3	Bilan de l'évaluation de l'effet de la combinaison des défauts sur leur identification	162
4.4	Conclusion	162
5	Évaluation des apports de la modélisation du CND par acousto-ultrasons	165
5.1	Introduction	166
5.2	Étude de l'effet du capteur en réception	167
5.2.1	Comparaison des capteurs : formes d'ondes et transformées de Fourier	167
5.2.2	Évolution des descripteurs pour l'assemblage sain	170
5.3	Confrontation entre signaux simulés et signaux expérimentaux	171
5.3.1	Comparaison des signaux reçus par le capteur n°1 (d = 230 mm)	171
5.3.2	Comparaison des signaux reçus pour la position du capteur n°2 (d = 115 mm)	172
5.4	Évaluation de l'utilisation du modèle pour la détection des défauts	174
5.4.1	Évaluation dans le domaine temporel des effets de la présence du défaut sur le signal	174
5.4.2	Évaluation dans le domaine fréquentiel des effets de la présence du défaut sur le signal	174
5.5	Conclusion	177

Conclusion générale et Perspectives	179
Bibliographie	184
Annexes	197
6.6 Annexe A : Courbes de sensibilité des capteurs	198
6.7 Annexe B : Fiches techniques des matériaux	200
6.8 Annexe C : Mesures DSC	203

Liste des figures

1	Renforcement d'ouvrage par collage de matériaux composites [1]	1
1.1	Représentation de l'interphase substrat/adhésif [13]	8
1.2	Installation d'un renfort composite à fibres de carbone : plat pultrudé à gauche, tissu sec bidirectionnel à droite [21]	15
1.3	Les défauts dans un assemblage collé : défauts adhésifs à gauche, défauts cohésifs à droite	17
1.4	Défaut de colle et/ou défaut de marouflage à la périphérie d'une lamelle de carbone [32]	20
1.5	Technique d'inspection de renforts composite sur du béton : sondage au maillet [32]	21
1.6	Les différents types de thermographie [45]	22
1.7	Auscultation de défauts d'adhérence réalisés par interposition d'une feuille de 0,5 mm d'épaisseur de Téflon : Positions et dimensions à gauche, image infrarouge après sollicitation thermique à l'aide d'une rampe chauffante à droite. [50]	23
1.8	Motifs de franges réfléchies à partir d'une surface plane à gauche et d'une surface non plane à droite [54]	24
1.9	Résultats de CND par shearographie sur un assemblage collé béton/composite avec des insertions de feuilles de Téflon® circulaires de différents diamètres : à gauche dimensions des défauts, à droite visualisation des champs de déformation sur l'échantillon pour différentes tailles de défauts et différents niveaux de vide partiel. [57]	25
1.10	Propagation des différents types d'ondes de haut en bas : longitudinale, transversale, de Rayleigh, de Lamb (mode symétrique à gauche, mode antisymétrique à droite) [65]	28
1.11	Exemple de courbes de dispersion de la vitesse de phase des ondes de Lamb pour une plaque de mortier d'épaisseur $2h$ ($c_L = 4779$ m/s, $c_T = 2872$ m/s, $2h = 13$ mm). Les trois vitesses non dispersives (longitudinales (1), de cisaillement (2) et de Rayleigh (3) sont mises en évidence, ainsi que la première fréquence de coupure (4) (ligne discontinue). Les modes antisymétriques A_i sont représentés par des lignes pleines et les modes symétriques S_i sont représentés par des lignes pointillées. [66]	30
1.12	Réflexion et transmission des ondes longitudinales et transversales [67]	30
1.13	Disposition des capteurs pour les différents modes d'une auscultation par ultrasons : a) en réflexion et b) en transmission [65]	31
1.14	Échantillon d'assemblage adhésif/acier avec un vide circulaire de 10 mm de diamètre et profil d'adhérence approprié. Les surfaces d'échantillonnage ont été balayées tous les 5 mm et l'axe de symétrie du capteur a été déplacé le long de lignes verticales marquées sur les échantillons.[75]	32
1.15	Paramètres d'individualisation des salves acoustiques [91]	34

1.16	Variation de l'énergie acoustique cumulée en fonction du temps et les faciès de rupture correspondantes : a) rupture cohésive, b) rupture adhésive [94]	35
1.17	Descripteurs temporels d'un signal d'EA	37
1.18	Exemple de calcul de l'AUP [7]	38
1.19	Classification conventionnelle des fissures dans le béton selon le JCMS (<i>Japan Construction and Material Standard</i>) [100]	38
1.20	Schéma et courbe de sensibilité du capteur résonant R15 α [101]	39
1.21	Effet du couplant sur l'AUP mesuré dans un même échantillon de polychlorure de vinyle sans défaut non sollicité [102]	40
1.22	Variation du paramètre AUP en fonction de la distance entre capteurs pour un même échantillon de polychlorure de vinyle sans défaut non sollicité [102]	41
1.23	Paramètres EA avec différents ratios Eau/ciment d'échantillons de mortier à base de ciment Portland 42.5 cylindriques de 53 mm de diamètre et de 153 mm de longueur : a) Amplitude; b) Énergie moyenne [104]	42
1.24	Résultat d'une mesure acousto-ultrason de fréquence d'entrée 1 MHz sur un assemblage collé à simple recouvrement entre un composite à fibres de carbone (CFRP) et de l'aluminium (Al6061) : à gauche - Corrélation entre l'amplitude (V) et la taille du défaut, à droite - schéma de la zone de recouvrement avec simulation d'une insertion de Téflon sur 12.5% de la surface [8]	42
1.25	À gauche - changement dans le spectre fréquentiel (en MHz) des signaux d'AUS d'un joint collé en fonction de l'augmentation de la surface (en mm ²) du défaut , à droite - schéma de l'assemblage de deux composites collés par simple recouvrement avec des défauts d'adhésion simulés par l'insertion de graisse (dimensions en mm). [7]	44
1.26	Schématisation des modèles : (a) tri-couches, (b) 5 couches, (c) rhéologique pour l'étude de la cohésion sans masse, (d) rhéologique pour l'étude de l'adhésion sans masse.[14]	45
1.27	Chaîne d'acquisition d'une émission acoustique [112]	46
1.28	La réponse prévue des composites stratifiés de 2 mm d'épaisseur à une charge sinusoïdale appliquée aux emplacements indiqués par des lignes en gras sur chaque maille : (a) extrémité gauche de la plaque; (b) point B; (c) point C; (d) distribution linéaire le long de la frontière AB. [119]	47
1.29	Évaluation de la propagation des ondes de Lamb sur un winglet en composite à base de fibres de verre : comparaison des résultats de simulation et expérimentaux pour une consigne d'émission à une fréquence centrée de 100 kHz sur le capteur n°5 [126]	49
1.30	Modélisation par EF d'un capteur EA, gauche : courbes simulées (rouges) et mesurées (bleues) de la vitesse normale d'une particule à une distance de 50 mm du centre du capteur, droite : géométrie du capteur modélisé [135]	49
1.31	Représentation par diagramme en boîte	51
1.32	ACP : Construction de l'axe de projection	54
1.33	ACP : Critère de coude	55
1.34	Visualisation des premières composantes principales d'une ACP réalisée sur des images de collage en coin d'aluminium. [158]	56

1.35	Visualisation des premières composantes principales d'une ACP réalisée sur des signaux issus d'essais de fissurations par corrosion sous tension d'un câble en acier utilisé dans des structures en béton pré-contraint. [155]	57
1.36	Exemple d'arbre de décision	58
1.37	Fonctionnement de l'algorithme de classification par forêt d'arbres décisionnels [88]	60
2.1	Assemblage collé acier-composite mono-plaque (AC-1P) : dimensions en mm	65
2.2	Assemblage collé acier-composite multi-plaques (AC-3P) : dimensions en mm	66
2.3	Assemblage collé béton-composite dalle (BC-Da) : dimensions en mm	67
2.4	Assemblages collés béton-composite poutre : BC-Po	67
2.5	Positions et tailles des défauts dans les assemblages AC-1P et BC-Da : a) et c) défauts fermés, b) et d) défauts ouverts	70
2.6	Positions et tailles des défauts dans les assemblages AC-3P (dimensions en mm)	72
2.7	Positions et tailles des défauts dans les assemblages BC-Po (dimensions en mm)	73
2.8	Dispositif expérimental de mesures par acousto-ultrasons	74
2.9	Dispositions d'essais pour le choix du couplant	75
2.10	Résultats de l'étude pour le choix du couplant : comparaison dans le domaine temporel	75
2.11	Résultats de l'étude pour le choix du couplant : comparaison dans le domaine fréquentiel	76
2.12	Résultats de l'étude pour le choix de la consigne d'émission : (a et b) signal carré, (c et d) signal sinusoïdal	77
2.13	Consigne de l'émission lors des mesures réalisées sur les assemblages collés acier-composite	78
2.14	Dispositif d'essai pour le choix des capteurs	80
2.15	Résultats de l'analyse paramétrique pour le choix des capteurs : à gauche l'énergie absolue (aJ) et à droite la durée (μ s)	81
2.16	Représentation temps-fréquence du signal de réception : à gauche S9204 en émission et en réception ; à droite S9204 en émission et R15 en réception	81
2.17	Disposition des capteurs lors des mesures réalisées sur les assemblages collés AC-1P et BC-Da	82
2.18	Règle imprimée en 3D utilisée pour conserver une disposition des capteurs identique	82
2.19	Disposition des capteurs pour l'investigation de l'atténuation du signal sur une zone saine des assemblages BC-Po : distance en centimètres	83
2.20	Évolution des descripteurs en fonction des distances de propagation du signal sur la zone saine des poutres n°1 et n°2	84
2.21	Évolution de la température de la salle et de la valeur de la force du signal mesuré par le capteur n°1	85
2.22	Degré de polymérisation de la résine époxy en fonction du temps	86
2.23	Évolution des paramètres d'AUS en fonction du temps de polymérisation : a) Durée (μ s), b) Force du signal (pV.s), c) Fréquence pic (kHz), d) Amplitude (dB).	87
2.24	Étapes de pré-traitement via COSMOS de haut en bas : original, <i>pre-trigger</i> de 20 μ s retiré, traînée supprimée à 0.1% de E puis réajustement par ré-échantillonnage à 5 MSPS.	89

2.25	Superposition de deux signaux reçus sur un même échantillon : a) en haut avant alignement, b) en bas après alignement	91
2.26	Schéma de la modélisation des éprouvettes d'assemblage acier/composite mono-plaque (AC-1P)	94
2.27	Signaux reçus en un seul noeud pour différentes tailles de mailles	95
2.28	Simulation de l'évolution du déplacement U2 en fonction du temps : en haut - signal d'émission théorique et signal numérique, en bas - signal optimisé.	96
2.29	Schéma de la modélisation du capteur de surface	98
2.30	Sensibilité en réception du capteur R15 obtenue par calibration sur bloc d'acier à l'aide de la méthode de réciprocité. [125]	98
3.1	Histogrammes de dispersion des coefficients de corrélation temporels des signaux reçus dans l'échantillon de type- β 2 pour l'assemblage AC-1P : à gauche capteur n°1 (d = 230 mm) et à droite capteur n°2 (d = 115 mm, au droit du défaut)	104
3.2	Histogrammes de dispersion des coefficients de corrélation fréquentiels des signaux reçus dans l'échantillon de type- β 2 de l'assemblage AC-1P : à gauche capteur n°1 et à droite capteur n°2	105
3.3	Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°1 dans les assemblages AC-1P : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon vide centré type- β 1	106
3.4	Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°2 sur les assemblages AC-1P : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon vide centré type- β 1	107
3.5	Analyse des paramètres a2, a4, a5 et a6 des signaux reçus par le capteur n°1 sur les échantillons AC-1P	109
3.6	Analyse des paramètres a2, a4, a5 et a6 des signaux reçus par le capteur n°2 sur les échantillons AC-1P	110
3.7	Résultats de l'analyse en composantes principales pour les signaux reçus par le capteur n°1 sur les assemblages AC-1P : à gauche répartition des parts d'inerties par CP, à droite représentation des signaux dans le plan CP1/CP3	112
3.8	Résultats de l'analyse en composantes principales pour les signaux reçus par le capteur n°2 sur les assemblages AC-1P : à gauche répartition des parts d'inerties par CP, à droite représentation des signaux dans le plan CP1/CP2	113
3.9	Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°1 dans les assemblages BC-Da : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon avec de la graisse type- δ	118
3.10	Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°2 sur les assemblages BC-Da : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon avec de la graisse type- δ	119
3.11	Analyse des paramètres a4 et a5 des signaux reçus par le capteur n°1 sur les échantillons BC-Da	120
3.12	Analyse des paramètres a2, a4, a5 et a6 des signaux reçus par le capteur n°2 sur les échantillons BC-Da	121
3.13	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°1 sur les assemblages BC-Da : à gauche répartition des parts d'inerties par CP, à droite représentation des signaux suivant les CP1 et CP2	123

3.14	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°2 sur les assemblages BC-Da : à gauche répartition des parts d'inerties par CP, à droite représentation des signaux suivant les CP1 et CP2	124
3.15	Exemple de cercle de corrélation des paramètres du signal d'une ACP	126
3.16	Représentations dans un plan 2D [Temps de montée (μ s) , Force du signal (pV.s)] des signaux reçus pour les différents assemblages BC-Da : à gauche capteur n°1 et à droite capteur n°2	127
3.17	Représentation de la répartition suivant le plan formé des CP1 et CP2 des signaux reçus sur les assemblages BC-Da pour les deux positions de capteur	128
4.1	Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°1 dans les assemblages AC-3P : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon tiers vide type- β 1	137
4.2	Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°2 dans les assemblages AC-3P : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon tiers vide type- β 1	138
4.3	Analyse des énergies absolues et des nombres de coups au pic des signaux reçus par le capteur n°1 sur les assemblages AC-3P	140
4.4	Analyse des paramètres a2, a5 et a9 des signaux reçus par le capteur n°2 sur les échantillons AC-3P	141
4.5	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°1 sur les assemblages AC-3P par plaque d'acier (Pac) : à gauche Pac n°1 et à droite Pac n°2	143
4.6	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°2 sur les assemblages AC-3P par plaque d'acier (Pac) : à gauche Pac n°1 et à droite Pac n°2	143
4.7	Résultats ACP pour les signaux reçus sur tous les assemblages AC-3P : à gauche capteur n°1 , à droite capteur n°2	144
4.8	Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°1 dans deux zones de la poutre n°3 des assemblages BC-Po : à gauche zone d'étude de référence type- α et à droite zone contenant un vide en son centre type- β	150
4.9	Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°2 dans deux zones de la poutre n°3 des assemblages BC-Po : à gauche zone d'étude de référence type- α et à droite zone contenant un vide en son centre type- β	151
4.10	Analyse des paramètres a4 et a5 des signaux reçus par le capteur n°1 sur les différentes zones d'étude des assemblages BC-Po	153
4.11	Analyse des paramètres a4 et a5 des signaux reçus par le capteur n°2 sur les différentes zones d'étude des assemblages BC-Po	155
4.12	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°1 sur les zones d'étude de la poutre n°1 d'assemblage BC-Po : représentation des signaux suivant les CP1 et CP2	156
4.13	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°1 sur les zones d'étude de la poutre n°2 d'assemblage BC-Po : représentation des signaux suivant les CP1 et CP3	157
4.14	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°1 sur les zones d'étude de la poutre n°3 d'assemblage BC-Po : représentation des signaux suivant les CP1 et CP2	157
4.15	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°2 sur les zones d'étude de la poutre n°1 d'assemblage BC-Po : représentation des signaux suivant les CP1 et CP2	158
4.16	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°2 sur les zones d'étude de la poutre n°2 d'assemblage BC-Po : représentation des signaux suivant les CP1 et CP3	158

4.17	Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°2 sur les zones d'étude de la poutre n°3 d'assemblage BC-Po : représentation des signaux suivant les CP1 et CP2	159
4.18	Résultats ACP pour les signaux reçus sur tous les assemblages BC-Po : à gauche capteur n°1 , à droite capteur n°2	160
5.1	Disposition des points de calcul du déplacement (distance en millimètres)	167
5.2	Comparaison dans le domaine temporel des signaux simulés reçus sur la position du capteur n°1 de l'assemblage sain AC-1P	168
5.3	Comparaison dans le domaine fréquentiel des signaux simulés reçus sur la position du capteur n°1 de l'assemblage sain AC-1P	168
5.4	Comparaison dans le domaine fréquentiel des signaux simulés reçus sur la position du capteur n°2 : a) assemblage sain, b) assemblage vide centré (type- β_1), c) assemblage tiers vide (type- β_2), pour le capteur parfait (CP) et le capteur R15	169
5.5	Évolution des descripteurs en fonction de la position pour les capteurs CP et R15 : a) amplitude (dB), b) durée (μ s), c) fréquence d'ouverture (kHz), et d) barycentre fréquentiel (kHz)	170
5.6	Comparaison dans les trois domaines des signaux reçus sur l'échantillon sain de type-α pour la position du capteur n°1 : à gauche signal numérique, à droite signal expérimental	171
5.7	Comparaison dans les trois domaines des signaux reçus sur l'échantillon tiers vide de type-β_2 pour la position du capteur n°1 : à gauche signal numérique, à droite signal expérimental	172
5.8	Comparaison dans les trois domaines des signaux reçus sur l'échantillon sain de type-α pour la position du capteur n°2 : à gauche signal numérique, à droite signal expérimental	173
5.9	Comparaison dans les trois domaines des signaux reçus sur l'échantillon tiers vide de type-β_2 pour la position du capteur n°2 : à gauche signal numérique, à droite signal expérimental	173
5.10	Évolution des descripteurs en fonction de la position du capteur récepteur pour des assemblages saint et avec défaut et deux types de capteurs : a) amplitude (dB) et b) durée (μ s),	175
5.11	Évolution des descripteurs en fonction de la position du capteur récepteur pour des assemblages sain et avec défaut et deux types de capteurs : a) fréquence d'ouverture (kHz), et b) barycentre fréquentiel (kHz)	176
5.12	Évolution des PPI en fonction de la position du capteur pour un assemblage sain et avec défaut	177
6.13	Courbe de sensibilité du capteur R15 (Source Physical Acoustics Corporation)	198
6.14	Courbe de sensibilité du capteur S9204 (Source Physical Acoustics Corporation)	198
6.15	Courbe de sensibilité du capteur S9208 (Source Physical Acoustics Corporation)	199
6.16	Courbe de sensibilité du capteur WD (Source Physical Acoustics Corporation)	199
6.17	Courbe de sensibilité du capteur SH10 (Source Physical Acoustics Corporation)	199
6.18	Visualisation du pic exothermique correspondant à la réticulation de la résine époxy à t_0 : flux de chaleur (W/g) vs température ($^{\circ}$ C)	204
6.19	Visualisation du pic exothermique correspondant à la réticulation de la résine époxy après 24h : flux de chaleur (W/g) vs température ($^{\circ}$ C)	204

Liste des tableaux

1.1	Avantages et inconvénients de l'assemblage par collage [24]	10
1.2	Avantages et inconvénients de quelques adhésifs utilisés dans le collage structural [24]	14
2.1	Caractéristiques physiques et mécaniques des composants des assemblages collés	68
2.2	Caractéristiques des défauts pour les échantillons AC-1P et BC-Da	71
2.3	Caractéristiques des défauts pour les assemblages A-C multi-plaques	72
2.4	Dimensions des défauts pour les assemblages BC-Po	73
2.5	Paramètres d'individualisation des signaux acoustiques	78
2.6	Paramètres de numérisation des signaux acoustiques	79
2.7	Caractéristiques des capteurs utilisés	80
2.8	Liste des descripteurs calculés via AEWin	88
2.9	Liste des descripteurs calculés sur les signaux numérisés via Cosmos	90
2.10	Vitesse de l'onde de Rayleigh, longueur d'onde minimale des ondes se propageant dans le milieu et taille du maillage recommandées pour les différents matériaux constituant l'assemblage.	95
2.11	Coefficients de Rayleigh et facteurs de perte pour les différents matériaux constituant les assemblages AC-1P	97
3.1	Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélations dans le domaine temporel pour chaque échantillon AC-1P	104
3.2	Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélations dans le domaine fréquentiel pour chaque échantillon AC-1P	105
3.3	Valeurs des coefficients de corrélations temporels entre les signaux reçus par le capteur n°1 pour les différents échantillons AC-1P	107
3.4	Valeurs des coefficients de corrélations temporels entre les signaux reçus par le capteur n°2 pour les différents échantillons AC-1P	108
3.5	Valeurs moyennes des paramètres de l'échantillon sain, échantillon de référence et variation des paramètres des échantillons avec défauts des assemblages AC-1P pour la position du capteur n°1	108
3.6	Valeurs moyennes des paramètres de l'échantillon sain, échantillon de référence et variation des paramètres des échantillons avec défauts des assemblages AC-1P pour la position du capteur n°2	111
3.7	Résultats de classification par forêt d'arbres décisionnels des données Mistras pour les signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-1P	115

3.8	Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données Mistras des signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-1P	115
3.9	Résultats de classification par forêt d'arbres décisionnels des données recalculées sur les formes d'ondes pour les signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-1P	116
3.10	Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données recalculées sur les formes d'ondes pour les signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-1P	116
3.11	Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélations dans le domaine temporel pour chaque échantillon BC-Da	117
3.12	Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélations fréquentiels pour chaque échantillon BC-Da par position de capteur	118
3.13	Valeurs des coefficients de corrélations dans le domaine temporel entre signaux reçus pour différents échantillons BC-Da par le capteur n°1	119
3.14	Valeurs des coefficients de corrélations dans le domaine temporel entre signaux reçus pour différents échantillons BC-Da par le capteur n°2	120
3.15	Valeurs moyennes des paramètres de l'échantillon sain, échantillon de référence et variation des paramètres des échantillons avec défauts des assemblages BC-Da pour la position du capteur n°1	121
3.16	Valeurs moyennes des paramètres de l'échantillon sain, échantillon de référence et variation des paramètres des échantillons avec défauts des assemblages BC-Da pour la position du capteur n°2	122
3.17	Poids normalisés des descripteurs pour les composantes principales CP1 et CP2 pour les données reçues sur les échantillons BC-Da	126
3.18	Résultats de classification par forêt d'arbres décisionnels des données extraites d'AEWIN pour les signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages BC-Da	128
3.19	Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données extraite d'AEWIN pour les signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages BC-Da	129
3.20	Résultats de classification par forêt d'arbres décisionnels des données calculées à partir des formes d'ondes pour les signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages BC-Da	130
3.21	Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données calculées à partir des formes d'ondes pour les signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages BC-Da	130
4.1	Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélation dans le domaine temporel et fréquentiel pour chaque assemblage AC-3P par position de capteur . .	136
4.2	Valeurs des coefficients de corrélation temporels entre signaux reçus dans différents assemblages AC-3P pour la position de capteur n°1	138
4.3	Valeurs des coefficients de corrélation temporels entre signaux reçus dans différents assemblages AC-3P pour la position de capteur n°2	139
4.4	Différences des valeurs moyennes par paramètre observées entre zones saines et zones avec défauts des assemblages AC-3P pour la position du capteur n°1	139

4.5	Différences des valeurs moyennes par paramètre observées entre zones saines et zones avec défauts des assemblages AC-3P pour la position du capteur n°2	142
4.6	Résultats de la classification par forêt d'arbres décisionnels des données extraites d'AEWIN des signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-3P	145
4.7	Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données extraites d'AEWIN des signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-3P	146
4.8	Résultats de la classification par forêt d'arbres décisionnels des données Cosmos des signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-3P	147
4.9	Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données Cosmos des signaux reçus lors des 5 ^{ème} , 6 ^{ème} et 7 ^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-3P	147
4.10	Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélation dans les domaines temporel et fréquentiel des signaux reçus pour chaque zone des assemblages BC-Po	149
4.11	Valeurs des coefficients de corrélation temporels entre signaux reçus sur les différentes zones des assemblages BC-Po pour la position de capteur n°1	151
4.12	Valeurs des coefficients de corrélation temporels entre signaux reçus sur les différentes zones des assemblages BC-Po pour la position de capteur n°2	152
4.13	Différences des valeurs moyennes par paramètre observées entre zones saines et zones avec défauts des assemblages BC-Po pour la position du capteur n°1	154
4.14	Différences des valeurs moyennes par paramètre observées entre zones saines et zones avec défauts des assemblages BC-Po pour la position du capteur n°2	154
4.15	Résultats de la classification par forêt d'arbres décisionnels des données extraites d'AEWIN des signaux reçus lors des mesures effectuées sur les zones d'étude des assemblages BC-Po	161
4.16	Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données extraites d'AEWIN des signaux reçus lors des mesures effectuées sur les zones d'étude des assemblages BC-Po	161
6.1	Caractéristiques mécaniques du béton C25/30 (source fiche technique)	200
6.2	Caractéristiques mécaniques de l'acier S355 (source fiche technique)	200
6.3	Caractéristiques mécaniques du COMPODEX C12 (source fiche technique)	201
6.4	Caractéristiques mécaniques du FOREVA LFC (source fiche technique)	202

INTRODUCTION GÉNÉRALE

« L'intellect relie les gens par des nœuds et ne risque rien, mais l'amour dissout tous les enchevêtrements et risque tout. L'intellect est toujours précautionneux et conseille. »

Shams de Tabriz



FIGURE 1 – Renforcement d'ouvrage par collage de matériaux composites [1]

Les ouvrages du génie civil (bâtiment, barrages, ponts, etc.) sont quelquefois sujets à des vieillissements prématurés dus à une pathologie (corrosion, fissuration, alcali-réaction, etc.) ou à l'apparition de sollicitations non prises en compte lors de leur dimensionnement (sollicitations sismiques ou de vent, augmentation de trafic, etc.). Dans un rapport réalisé au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable et déposé le 26 juin 2019 au Sénat, le nombre d'ouvrages vieillissants en France est estimé à plus de 25 000 ponts routiers. Une des solutions techniques préconisées pour augmenter la durée de vie des ouvrages est leur renforcement par collage de matériaux composites. Cette solution permet en outre d'adapter de nombreuses structures existantes à de nouvelles contraintes (augmentation du trafic) ou de nouveaux risques (augmentation du risque sismique). Cette solution est plus économe que de construire une nouvelle structure à la place de la structure endommagée et limite l'interruption du fonctionnement de la structure en plus d'éviter les impacts environnementaux qu'un tel chantier pourrait occasionner.

Le renforcement par matériaux composite a connu une expansion rapide durant ces deux dernières décennies avec le développement des adhésifs structuraux, mais aussi grâce à ses nombreux avantages notamment son intéressant rapport poids/performance mécanique, sa résistance à la corrosion et sa facilité de mise en œuvre en comparaison du béton projeté ou de la précontrainte additionnelle [2][3]. De plus, dans ce système de renforcement, l'adhésif permet un transfert relativement homogène des sollicitations de l'ouvrage au matériau composite ce qui tend à diminuer les localisations de contraintes qui peuvent conduire à l'initiation d'endommagement de fatigue dans le cas des structures métalliques.

Toutefois, la présence de défauts au sein du joint de colle peut réduire de manière significative la performance du renfort composite [4]. Il est donc primordial de disposer de techniques de contrôle non destructif (CND) qui permettront de réaliser le diagnostic de ces assemblages sans altérer leurs propriétés physiques et mécaniques.

Les défauts généralement rencontrés au sein du joint de colle peuvent être classés en trois catégories : les défauts grossiers du type vide ou porosité, les défauts d'adhésion et les faibles forces de cohésion [5]. La technique CND doit donc être en mesure de détecter ces différents types de défauts, et si possible de les identifier afin d'évaluer leur criticité et éventuellement leur réparabilité.

La thermographie infrarouge est l'une des techniques CND les plus utilisées sur site pour le contrôle des renforts de composite sur les structures du génie civil. Cette méthode permet de détecter les défauts grossiers de type vide mais présente encore des limites concernant les autres types de défauts [6]. De nombreux travaux se sont intéressés à l'évaluation des niveaux d'adhésion d'assemblages collés par le biais de différentes méthodes CND. Les méthodes à base d'ondes ultrasonores montrent de bons résultats à cet effet [7] [8]. Cependant, les géométries rencontrées dans ces études sont différentes de celles des assemblages classiques du génie civil où les épaisseurs sont plus importantes et le plus souvent une seule face est auscultable.

L'objectif de ce travail de thèse est d'évaluer le potentiel de la technique CND des acousto-ultrasons pour cette application et de proposer une méthodologie de détection et d'identifica-

tion des principaux types de défauts rencontrés dans un assemblage collé du génie civil.

La méthode des acousto-ultrasons est une méthode CND basée sur la génération d'ondes acoustiques permettant de détecter la présence de défauts, d'endommagements ou de variations des propriétés mécaniques au sein d'une structure. Elle combine les méthodes de caractérisation de matériaux par ultrasons aux méthodes d'analyse de l'émission acoustique.

Dans ce travail, cette méthode a été appliquée expérimentalement à des assemblages constitués de deux types de substrat correspondant aux matériaux les plus utilisés en génie civil : l'acier et le béton. Des plaques de composite pultrudées à fibres de carbone sont collées sur ces substrats avec de la résine époxy bi-composant polymérisant à froid. Dans ces assemblages, nous avons généré des vides, des défauts d'adhésion par insertion d'une fine couche de graisse à l'interface composite/adhésif et des défauts de cohésion par substitution partielle de la résine par un adhésif plus souple. Ainsi, dans un premier temps, des essais ont été réalisés pour définir un protocole de mesure optimal (choix des capteurs, des consignes, des couplants) et répétable en vue de proposer un diagnostic des assemblages collés acier-composite et béton-composite. Plusieurs méthodologies de diagnostic ont été évaluées : l'utilisation de critères simples via une analyse paramétrique facilement déployable sur site, l'utilisation d'une méthode multi-critères reposant sur des Analyses par Composantes Principales (ACP) et l'utilisation d'un algorithme de classification supervisée. Les premières investigations ont été réalisées sur des éprouvettes de petite échelle. Ce protocole a ensuite fait l'objet d'une évaluation pour des éprouvettes de plus grande échelle. Nous nous sommes également penchés de manière non exhaustive sur des travaux de modélisation par éléments finis de l'application de la méthode AUS sur des assemblages collés afin de décliner les perspectives que peut offrir cette technique.

Ce manuscrit est articulé autour de cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, nous établirons une revue bibliographique sur les différentes notions liées au collage et l'utilisation de cette technique d'assemblage dans le génie civil. Nous réaliserons également un état de l'art sur les méthodes CND utilisées pour l'auscultation des joints collés ainsi que les méthodes d'aide au diagnostic les plus souvent employées.

Dans le chapitre suivant, nous décrirons les différents matériaux utilisés pour l'élaboration des éprouvettes, ainsi que les défauts maîtrisés qui y ont été incorporés. Nous décrirons les essais préliminaires qui ont servi à la mise en place du protocole de mesure acousto ultrasonique ainsi que le développement des outils d'exploitation des mesures.

Le chapitre trois sera dédié à la présentation des résultats de l'application de la méthodologie de diagnostic sur des éprouvettes simples pour les deux types de substrat. Nous présenterons dans ce chapitre les résultats de l'évaluation de la répétabilité des mesures, de la détection puis de l'identification des défauts simulés.

Les limites de la méthode seront évaluées dans un quatrième chapitre, via son application à des éprouvettes de plus grande échelle avec des combinaisons de défauts sur un même linéaire ou sur des linéaires de composite voisins.

Le cinquième et dernier chapitre présentera les résultats des travaux de modélisation par éléments finis et débutera par une comparaison entre les signaux expérimentaux et simulés pour

des défauts de type vide uniquement. Ensuite, bien que la modélisation ne soit pas complète, une étude sera exposée afin d'appréhender l'effet du capteur en réception et de la taille du défaut sur les caractéristiques du signal.

L'ensemble du document se termine par une conclusion reprenant les principaux résultats des développements réalisés et formulant des perspectives concernant l'utilisation des acousto-US pour le CND des renforts composites collés sur structure de génie civil.

CHAPITRE 1

BIBLIOGRAPHIE

*« Ce que l'on conçoit bien s'énonce
clairement, Et les mots pour le dire arrivent
aisément. »*

Nicolas Boileau

1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous allons dresser le bilan de l'utilisation des assemblages collés dans le génie civil et leurs moyens d'auscultation. Pour ce faire, nous allons revenir sur le collage, son domaine d'application et les différentes typologies de défauts qu'on peut rencontrer dans des assemblages collés.

Dans la deuxième partie, nous aborderons les méthodes de contrôle non destructif actuellement utilisées dans le domaine pour diagnostiquer ces assemblages. Nous passerons en revue les apports et les limites de ces méthodes, avant d'aborder le potentiel qu'offre la technique des acousto-ultrasons. Le principe de fonctionnement de cette dernière sera ensuite décrit, puis une revue de son application dans les domaines proches de notre objet d'étude sera présentée. Enfin, des méthodologies d'aide au diagnostic seront détaillées avec un volet spécifique concernant la modélisation par éléments finis de la technique des acousto-ultrasons. Nous finirons par une conclusion qui permettra de situer ce travail de thèse par rapport à la littérature.

1.2 Les assemblages collés dans le génie civil

1.2.1 Domaine d'application

1.2.1.1 Bref historique du collage

Les progrès réalisés dans la formulation des produits organiques de synthèse permettent de nos jours d'assembler par collage la quasi-totalité des matériaux [9]. Les avantages techniques et économiques permettent des applications dans des secteurs aussi divers que la mécanique, le textile, le bois, les transports, le bâtiment et les ouvrages d'art.

Le collage est défini par la norme *AFNOR NF EN 923* comme un assemblage d'objets ou produits semi-manufacturés appelés substrats au moyen d'un adhésif. Les premières utilisations des adhésifs remontent à 4500 ans av JC. Il s'agit d'adhésifs d'origine animale, végétale et minérale tels que la cire d'abeille (employée pour imperméabiliser les premières céramiques et pour les sceaux), la glue extraite de l'écorce tendre du houx, le goudron de charbon de bois, etc.

À la fin du 19^{ème} siècle, on produit les premières solutions de caoutchouc à partir du latex extrait de certaines espèces d'hévéas et aussi des solutions de résines à partir du benzène. Ces solutions ont servi à un collage semi-structural du bois, du papier, des tissus, du cuir et des cartons.

Ce n'est qu'au 20^{ème} siècle, en raison des progrès réalisés dans le domaine de la chimie macromoléculaire, qu'on assiste à l'utilisation des adhésifs comme colle structurale avec l'introduction des colles à base de néoprène. Les domaines précurseurs de l'utilisation du collage comme assemblage structural sont ceux du transport (l'aéronautique, l'automobile et l'aérospatial) [10]. L'engouement pour cette technique d'assemblage s'est accentué avec l'apparition des matériaux composites, qui a abouti à son expansion vers les autres domaines tels que le médical, le

sport et loisir, le ferroviaire et enfin le génie civil.

L'absence de méthodes de contrôle non destructif qui permettent de connaître la qualité des assemblages collés, après leur réalisation puis durant leur cycle de vie, freine le développement de l'utilisation de la technique. Des solutions temporaires permettent de contourner ce problème comme un contrôle accru de la phase de réalisation du collage et en particulier les étapes de traitement de surface ou de polymérisation [11] [12].

1.2.1.2 Quelques définitions associées au collage

1.2.1.2.1 La cohésion

La cohésion est définie par la norme *AFNOR NF EN 923* comme l'état dans lequel les particules d'une seule substance sont maintenues ensemble par des forces intermoléculaires. Cette définition est propre à tout matériau et est souvent considérée au niveau microscopique de celui-ci (au niveau moléculaire).

Cette cohésion est attribuée dans un assemblage collé au phénomène de prise de la colle. En effet, après l'assemblage des deux matériaux ou substrats, la colle doit durcir ou sécher, afin de donner une liaison solide, mécaniquement résistante entre les deux matériaux. Ainsi, une rupture cohésive de l'assemblage implique qu'elle se déroule au cœur de l'adhésif (ou au cœur d'un des substrats).

1.2.1.2.2 L'interface et l'interphase

L'interface est une frontière commune entre deux milieux dont les propriétés mécaniques ou physico-chimiques sont différentes et qui sont unis par des rapports d'échanges et d'interactions. Dans un assemblage collé, cette frontière est considérée comme étant surfacique de manière théorique et simplifiée. Cependant, elle est plutôt volumique en conséquence à la création d'une zone tampon entre l'adhésif et l'adhérent où subsistent des interactions entre les différents atomes ou molécules des deux composants ; on parle dans ce cas d'interphase.

L'interphase est cette frontière d'une épaisseur finie séparant les deux matériaux mis en contact. Ce volume fini constitue une zone de transition entre l'adhésif et le substrat, et a des propriétés physico-chimiques et mécaniques qui peuvent différer des leurs [13]. Notons toutefois que ces propriétés sont spécifiques à chaque couple substrat/adhésif, ainsi qu'à leur état de surface [14]. Le schéma des couches qui composent généralement cette interphase est représenté sur la figure 1.1.

1.2.1.2.3 L'adhésion et l'adhérence

L'adhésion est l'état dans lequel deux surfaces sont maintenues ensemble par des jonctions interfaciales (*NF EN 923*). En dépit des nombreuses études dans le domaine des adhésifs, les connaissances fondamentales sur les processus d'adhésion ne sont pas encore complètes, et aucune approche globale ou théorique ne décrit en détail tous les phénomènes d'adhésion.

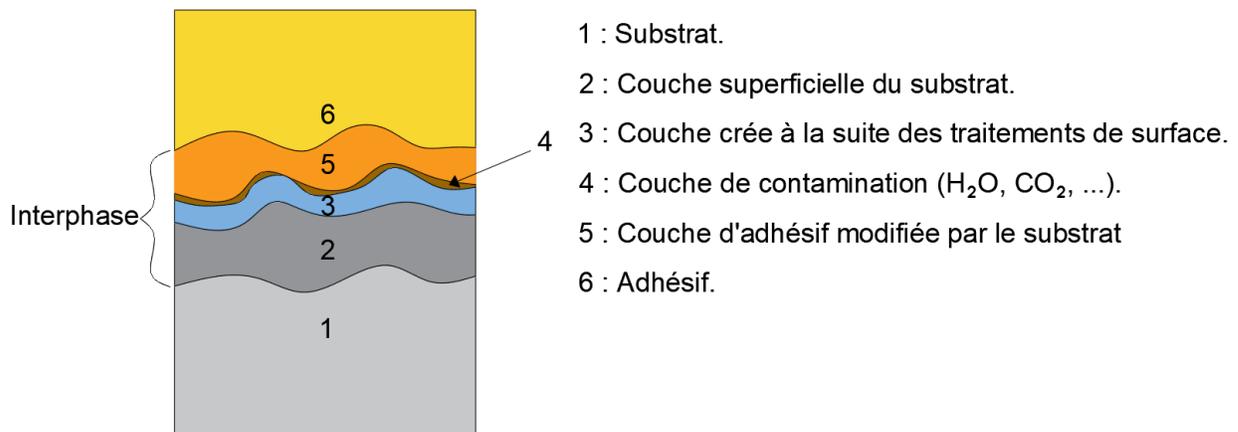


FIGURE 1.1 – Représentation de l'interphase substrat/adhésif [13]

L'absence d'une théorie fondamentale s'explique par le fait que plusieurs phénomènes physico-chimiques et mécaniques concourent à la création de l'interphase. En effet, ces phénomènes se chevauchent et s'influencent mutuellement pour la création d'une résistance mécanique à la séparation.

Les quatre modèles expliquant le phénomène de l'adhésion qui font le plus consensus [15] sont la théorie de l'accrochage, la théorie de la diffusion, la théorie électrostatique et la théorie de l'adsorption.

- Le **modèle d'ancrage mécanique** (ou accrochage) introduit par *MacBain* en 1925 [16] est l'une des plus anciennes théories d'adhésion. Le modèle implique le verrouillage mécanique entre les irrégularités de la surface du substrat et l'adhésif durci au niveau macroscopique. Ces irrégularités peuvent être engendrées via un traitement de surface tel que le sablage pour l'acier, le ponçage pour le béton ou l'abrasion pour les matériaux composites.
- La **théorie de la diffusion** a été proposée par *Voyutski* en 1963 [17]. Elle explique l'adhésion comme résultant de l'inter-diffusion des macromolécules des deux matériaux polymères au niveau de l'interphase. Selon la théorie de la diffusion, l'adhésif et le substrat doivent être des polymères, qui sont mutuellement miscibles et compatibles. La théorie stipule que la diffusion aura lieu selon les lois de Fick, lorsque deux échantillons de polymères sont placés en contact et soumis à des sollicitations de compression constantes à une température supérieure à leur température de transition vitreuse.
- Le socle de la **théorie électrostatique** de l'adhésion a été développé par *Derjaguin et Smilga* [18] et est basé sur la différence d'électronégativité des deux matériaux collés. Selon ce modèle, le système adhésif/substrat peut être considéré comme un condensateur, dont les plaques se composent de la double couche électrique, qui se produit lorsque deux matériaux de natures différentes entrent en contact.
- La **théorie de l'adsorption** est le modèle le plus généralement accepté. Elle a été intro-

duite en 1964 par *Sharpe et Schonhorn* [19] qui considèrent l'adhésion comme le résultat de forces intermoléculaires ou inter-atomiques à l'interphase entre l'adhésif et le substrat après leur mise en contact. Les forces entre l'adhésif et le substrat peuvent être primaires (ioniques, covalentes ou métalliques) ou secondaires (van der Waals ou liaison hydrogène). La théorie comprend plusieurs modèles qui sont parfois considérés comme des théories distinctes : modèles de mouillage, rhéologique et d'adhésion chimique.

L'énergie nécessaire pour arriver à la séparation des deux matériaux est appelée adhérence. L'adhérence qui est une grandeur physique est donc créée par l'adhésion qui est un phénomène physico-chimique et mécanique. Une rupture adhésive, se produit donc au niveau d'une des interphases, et témoignerait de la faiblesse de l'adhérence face aux résistances mécaniques des matériaux de l'assemblage (substrats et colle).

1.2.1.3 Contexte d'utilisation du collage dans le génie civil

Le collage structural est une technique considérée comme faisant partie de la famille des assemblages physico-chimiques [20]. En génie civil, le collage structural est utilisé pour renforcer des structures en béton, en acier ou en bois, mais aussi pour fabriquer des lamellés-collés en bois ou pour assurer la connexion dans les structures mixtes (entre acier et béton ou entre bois et béton) [21]. La dernière application est plus récente et encore à l'étape de prototype. Depuis les années 80-90, on utilise le collage structural dans ce secteur essentiellement pour la réparation ou le renforcement par matériaux composites d'ouvrages nécessitant une restauration ou une augmentation de leurs capacités mécaniques [22].

1.2.1.3.1 Avantages et inconvénients du collage structural

Le choix de la technologie du collage structural comme méthode d'assemblage entre le matériau composite et la structure existante provient de ses nombreux avantages vis-à-vis des autres méthodes telles que le boulonnage ou le rivetage [23]. Cette technologie comporte toutefois quelques inconvénients qui constituent encore des verrous scientifiques à lever pour sa diffusion dans le domaine du génie civil. Dans le tableau 1.1, nous regroupons quelques avantages/inconvénients de cette technologie comparés aux assemblages mécaniques (rivetage, boulonnage et vissage).

L'expansion de l'utilisation des renforcements par composites collés est donc bien souvent limitée par l'un de ces inconvénients majeurs qui est l'absence de méthode non destructive fiable qui permettrait de diagnostiquer la présence de défauts de collage au sein du joint. Cela est d'autant plus important que ceux-ci affectent fortement les caractéristiques mécaniques de l'assemblage [4] [7] [25] [26].

Avantages	Inconvénients
<p>— Le collage est l'une des meilleures méthodes d'assemblage possible :</p> <ul style="list-style-type: none"> • pour les petites pièces (montage des puces et composants électroniques, bijouterie) ; • pour les pièces, tôles ou feuilles minces, très fragiles ; • c'est la seule méthode possible pour certaines pièces (panneaux-sandwichs, revêtements en feuilles minces décoratifs ou protecteurs, stratifiés). <p>— Permet d'assembler des matériaux différents, par exemple : plastique sur métal, sur bois, métaux différents (ce que ne permet pas la soudure autogène), plastiques différents, matériaux ayant des coefficients de dilatation différents... ;</p> <p>— Assure une meilleure répartition des contraintes ;</p> <p>— Permet d'obtenir un allègement de la structure assemblée (par la suppression des rivets, vis et boulons) ;</p> <p>— Évite tout affaiblissement des pièces assemblées (pas de trous à percer) ;</p> <p>— Offre un meilleur aspect visuel : donne des surfaces lisses (pas de rivets ou de boulons), améliore l'aérodynamisme en aéronautique, permet de réaliser un joint non visible ;</p> <p>— Les joints collés permettent d'amortir les vibrations dans certains cas (plasticols dans l'automobile par exemple) ou de tolérer des variations dimensionnelles, sans déformations ;</p> <p>— Les joints collés peuvent être isolants ou conducteurs électriques ;</p> <p>— Les joints collés peuvent être étanches ;</p> <p>— Les assemblages collés présentent un bon rapport résistance mécanique/poids ;</p> <p>— La dépose des colles peut être rapide et automatisée, ce qui peut abaisser le coût d'assemblage ;</p> <p>— Méthode la mieux appropriée à l'assemblage des pièces de révolution, avec une excellente résistance aux couples.</p>	<p>— Le collage est mal connu par les industriels, les mécaniciens : on ne sait pas « comment ça colle » ;</p> <p>— La durabilité des collages est limitée elle varie de 5 à 40 ans, selon les types d'adhésifs, les contraintes et l'environnement ;</p> <p>— La mise en œuvre de cette technique d'assemblage nécessite formation, adaptation et connaissance de la technique du collage : une conception adaptée de la part des bureaux d'études, du soin de la part des ouvriers, un contrôle de la part de la maîtrise d'œuvre ;</p> <p>— Un bon collage nécessite une bonne préparation des surfaces planes, propres... ;</p> <p>— La durée de durcissement peut être parfois longue : 10 à 20 h à température ambiante ;</p> <p>— Le joint de colle doit travailler en cisaillement, jamais en traction pure ni en clivage, sa résistance au pelage est faible ;</p> <p>— La résistance à la chaleur est limitée : les colles classiques pour métaux ne résistent qu'à environ 70 à 150 °C avec cependant des adhésifs thermostables très spéciaux qui résistent à 200 voire 300 °C ;</p> <p>— Collages sensibles à l'humidité et risques de corrosion si la préparation des surfaces n'est pas parfaite ;</p> <p>— Un manque de méthodes de contrôle non destructif permettant de quantifier la qualité d'un assemblage collé.</p>

TABLEAU 1.1 – Avantages et inconvénients de l'assemblage par collage [24]

1.2.1.3.2 Procédé de collage utilisé dans le génie civil

En France, le renforcement par collage structural se fait par le biais d'un "procédé" qui est constitué d'un couple renfort/adhésif et d'une procédure de mise en place à respecter scrupuleusement.

Les composites appliqués en renforcement d'ouvrage dans le génie civil sont en général à base de fibres de verre ou de carbone.

En ce qui concerne les adhésifs utilisés, ils sont généralement à durcissement chimique et peuvent être de nature variée :

- les adhésifs époxy : résines synthétiques les plus employées de nos jours contenant des groupes époxydiques, se présentant sous forme de mono ou bi-composant et pouvant ainsi être réticulées au moyen de coréactants stœchiométriques tels que les polyamides primaires ou secondaires ou les anhydrides ou par l'emploi de catalyseurs tels que les amines tertiaires ou trifluore de bore,
- les résines polyuréthanes : résines thermodurcissables qui allient grande souplesse et résistance mécanique ultime relativement faible. Ce sont des polymères généralement obtenus lors de la réaction d'un polyisocyanate avec un polyol, dans lequel la liaison répétée dans la chaîne est l'uréthane -NH - CO - O- ,
- les adhésifs phénoliques : résines qui ont un comportement relativement fragile obtenues par la polycondensation de phénol, ses homologues et/ou ses dérivés, avec des aldéhydes ou des cétones,
- les adhésifs acryliques : famille composée des cyanoacrylates, des adhésifs anaérobies et des acryliques modifiés, qui sont des polymères et copolymères dans lesquels au moins un motif constitutionnel est dérivé de l'acide acrylique $\text{CH}_2 = \text{CH - COOH}$ ou de ses esters $\text{CH}_2 = \text{CH - COOR}$
- les adhésifs polyamides : polymères résistant à de hautes températures dans lesquels la liaison répétée dans la chaîne est -NH - CO- . Ils sont essentiellement utilisés dans le domaine de l'aéronautique,

Dans le tableau 1.2 nous regroupons les avantages et inconvénients, ainsi que les performances techniques dont sont dotés ces adhésifs utilisés dans le collage structural.

Type d'adhésif	Performances techniques	Avantages	Inconvénients
Adhésifs époxydes	<p>— Une adhérence élevée sur métaux, verre, divers plastiques et composites, bétons, bois;</p> <p>— Des contraintes d'arrachement élevées en traction et en cisaillement (10 à 35 MPa) qui les rendent aptes à réaliser des assemblages structuraux et à remplacer des assemblages mécaniques;</p> <p>— Une excellente résistance à la chaleur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100 °C en continu avec des formulations classiques, • 150 °C en continu avec durcisseurs à chaud sélectionnés, • 250 °C avec des adhésifs époxy-phénoliques; <p>— Une résistance à l'eau, aux solvants, aux acides et bases, en raison de leur réticulation tridimensionnelle d'où leur utilisation pour la fabrication de pinceaux;</p> <p>— Une bonne tenue à la fatigue : 104 cycles à 50% de la charge maximale statique, 105 à 106 cycles à 30%, ce qui permet de les utiliser en construction aéronautique et automobile.</p>	<p>— Performances techniques élevées;</p> <p>— Très faible retrait lors du durcissement, ces adhésifs peuvent coller deux matériaux différents comme le métal sur les composites, le bois, le verre;</p> <p>— Absence de sous-produits volatils dégagés lors de la polymérisation;</p> <p>— Ces adhésifs remplissent l'intervalle du joint (jusqu'à quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur) ce qui permet donc d'assembler des pièces qui ne sont pas parfaitement planes.</p>	<p>— Résistance au pelage faible sauf avec des formules spéciales;</p> <p>— Risque de dermatose allergique (chez les sujets sensibles);</p> <p>— Prix relativement élevé : 5 à 20 €/kg selon les performances.</p>

<p>Adhésifs polyuréthanes réactifs</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Bonne résistance au cisaillement (de 6 à 20 MPa). Ils peuvent donc être utilisés dans des assemblages semi-structuraux voire structuraux; — Résistance à la chaleur : 75 °C à 100 °C après réticulation complète; — Film de colle souple ou rigide à volonté, selon les formulations. Ils sont souvent sélectionnés pour leur bonne résistance au pelage; — Bonne résistance à l'eau, aux solvants. 	<ul style="list-style-type: none"> — Formulation adaptable; — Excellente adhérence sur la plupart des matériaux : métaux, nombreux plastiques (y compris le PVC plastifié et les plastiques renforcés), bois, matériaux fibreux, verre, etc; — Bonnes performances techniques et mécaniques; — Bon rapport performances/prix (3 à 6 €/kg); — Résistance aux huiles, graisses et plastifiants; — Possibilités variées de mise en œuvre (un ou deux composants, durée de prise ajustable). 	<ul style="list-style-type: none"> — Conservation des isocyanates limitée (9 mois); — Nocivité des isocyanates (leur utilisation exige certaines précautions : ventilation par exemple).
<p>Colles thermodurcissables (UF, PF, ME, RF) urée-formol (UF), phénoliques-formol (PF), résorcine-formol</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Collages puissants, structuraux présentant des résistances au cisaillement de 6 à 12 MPa (pour des collages bois/bois la rupture s'effectue dans le bois); — Bonne résistance à la chaleur (90 °C à 120 °C); — Joints de colle durs et relativement cassants. 	<ul style="list-style-type: none"> — Un faible prix de revient (de 0,5 €/kg pour les UF ordinaires à 3 €/kg par les RF); — La possibilité de durcissement à froid ou à chaud, par haute fréquence; — De faibles exigences quant à la siccité du bois; — Une résistance mécanique élevée. 	<ul style="list-style-type: none"> — Dégagement de formol libre au moment du pressage, mais on peut y remédier grâce à des formules spéciales; — Tenue à l'eau médiocre dans le cas des UF, mais excellente pour les RF et MF; — Retrait et tensions internes si elles sont employées en couches épaisses (sauf avec les urée-formol joints épais); — Ne conviennent que pour les matériaux rigides et poreux (bois).

<p>Adhésifs acryliques structuraux ou acryliques modifiés</p>	<p>— Résistances au cisaillement de 10 à 30 MPa; — Résistance au pelage moyenne; — Bonne résistance aux chocs; — Tenue à la chaleur bonne jusqu'à 120 °C.</p>	<p>— Adhérence sur de nombreux matériaux (plastiques, métaux, verre), parfois même sur des surfaces grasses; — Prise très rapide (en quelques minutes à température ambiante), ce qui octroie une facilité d'emploi; — Bonne résistance aux intempéries, à l'humidité.</p>	<p>— Ces adhésifs deviennent cassants à basse température (– 40 °C).</p>
<p>Adhésifs hot melts ou thermofusibles (polyamides)</p>	<p>— Résistance au cisaillement de 5 à 10 MPa; — Résistance au pelage de 3 à 10 kJ/m de large; — Tenue à la chaleur limitée par leur température de ramollissement car ce sont des thermoplastiques (sauf les hot melts PU et les époxydes) les hot melts polyamides à 120 °C; — Ils peuvent être plastiques (EVA, polyamides) ou élastomères (styrène isoprène styrène - SIS, styrène butadiène styrène - SBS); — Adhérence sur les divers matériaux : elle dépend des formules et types d'adhésifs.</p>	<p>— Prise quasi immédiate d'où :</p> <ul style="list-style-type: none"> • gain de place (convoyeurs courts), • cadences élevées, • opérations facilement automatisables, sur chaînes; <p>— Ils sont livrés sous forme solide, à 100% d'extrait sec, d'où :</p> <ul style="list-style-type: none"> • facilité de stockage et de manutention, • pas de solvants (sécurité), insensibilité à l'humidité et au gel; <p>— Ils sont réactivables à la chaleur à volonté (thermocollants, démontage);</p> <p>— Ils font leur prise sans aucun dégagement, ils peuvent donc coller des substrats imperméables (plastiques).</p>	<p>— Tenue à la chaleur et au fluage médiocres; — Nécessitent des cadences très rapides car temps ouvert très court.</p>

TABEAU 1.2 – Avantages et inconvénients de quelques adhésifs utilisés dans le collage structural [24]

1.2.1.3.3 Mise en œuvre du procédé de renforcement à base d'adhésifs époxydes

Le procédé le plus usuel et qui offre de meilleures performances en renforcement de structure par collage structural est la combinaison de matériaux composite à fibres de carbone collés avec de la résine époxy [27]. Les résines époxy sont des adhésifs structuraux à hautes performances dont la prise et le durcissement sont réalisés :

- soit à chaud pour les époxydes monocomposant ;
- soit à température ambiante pour les bicomposants.

L'utilisation de ce procédé fait partie de la panoplie des techniques de réparation classiques à disposition des maîtres d'ouvrage pour la gestion de leur patrimoine au même titre que le béton projeté, le béton fibré projeté, le collage de plats métalliques, la précontrainte additionnelle [11]. Dans le cadre de cette thèse, nous l'avons appliqué pour la réalisation des éprouvettes détaillée dans le chapitre 2.

Les renforts composites à fibres de carbone sont majoritairement de deux types :

- **Les plats stratifiés composites unidirectionnels** (figure 1.2- gauche) : à base de fibres de carbone, fabriqués en usine généralement par pultrusion et le plus souvent utilisés pour le renforcement des poutres à la flexion. L'alignement spécifique des fibres suivant une unique direction obtenu par pultrusion dans les stratifiés permet à la plaque d'avoir des propriétés mécaniques optimisées vis à vis d'autres procédés de fabrication. Selon l'application finale, ces profilés pultrudés sont généralement fabriqués avec une résine époxy ou vinylester thermodurcissable.
- **Les tissus secs unidirectionnels ou bidirectionnels** (Figure 1.2- droite) : souples à bases de fibres de carbone, ils sont imprégnés directement sur site lors de l'application sur la structure au moyen d'une résine bi-composant polymérisant à froid. Cette résine est à la fois la matrice du composite et la colle structurale assurant la liaison entre le matériau composite et le support.

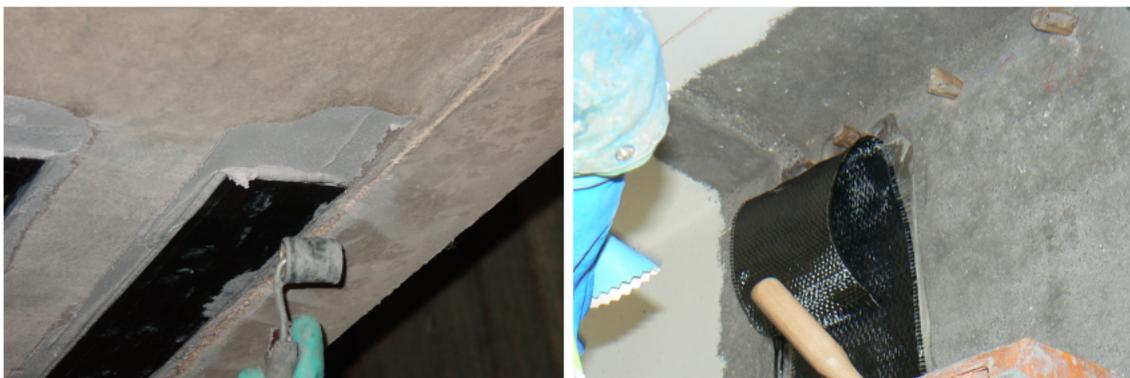


FIGURE 1.2 – Installation d'un renfort composite à fibres de carbone : plat pultrudé à gauche, tissu sec bidirectionnel à droite [21]

Afin de mettre en œuvre le collage par l'adhésif époxyde, la procédure suivante est adoptée :

- traitement des surfaces, afin d’obtenir des collages structuraux surtout dans le cas des surfaces métalliques pour enlever une éventuelle couche de corrosion;
- mélange manuel ou automatique des deux éventuels composants, avec le respect des proportions de durcisseur et de résine recommandée par le fabricant;
- application de l’adhésif sur les substrats.
- assemblage, une légère pression appliquée à l’aide d’un maroufleur;
- durcissement de la colle, appelé aussi prise de la colle, il correspond au processus au cours duquel l’adhésif développe sa force de cohésion et donc les propriétés physiques et chimiques de sa jonction. Dans le cas des adhésifs époxydes, il est obtenu par une réaction chimique appelée réticulation qui est une formation de liaisons covalentes ou ioniques intermoléculaires multiples entre des chaînes de polymères, engendrant un réseau moléculaire tridimensionnel. La prise peut se faire :
 - à froid (entre 20 min et 16 h selon les formules) pour les adhésifs époxydes bicomposants,
 - à chaud (10 à 30 min pour des températures comprises entre 120 °C et 175 °C) pour les adhésifs époxydes monocomposants. Éventuellement, une prégélification peut être obtenue au bout de quelques secondes à 150 °C pour assurer un certain maintien des pièces ou pour permettre le passage en bain de primaire ou de peinture. L’apport de chaleur peut être réalisé par presse à plateaux chauffants, par passage en étuve ou en autoclave, par haute fréquence, par induction, etc.

1.2.2 Les défauts de collage

1.2.2.1 Les typologies de défauts

Selon le mode de rupture qu’ils sont susceptibles d’occasionner ou leur position dans le joint, nous distinguons dans la littérature deux familles de défauts de collage : les défauts adhésifs et les défauts cohésifs [12] [14] [7] [28] [29]. Les ruptures adhésives sont celles produites au niveau des interphases de l’assemblage et les ruptures cohésives sont celles produites au cœur du joint. Les différents défauts qu’on peut rencontrer dans un assemblage collé, représentés sur la figure 1.3 ont été classés suivant quatre typologies par *Adams et Drinkwater* [30] :

- les défauts grossiers incluant des vides complets, des décollements, de la porosité ou des fissures,
- une mauvaise adhérence, c’est-à-dire une liaison faible entre l’adhésif et l’adhérent,
- une faible force de cohésion, c’est-à-dire une couche adhésive faible,
- les kissing bonds, qui sont des contacts intimes entre adhésif et substrat avec une absence partielle ou totale d’adhésion.

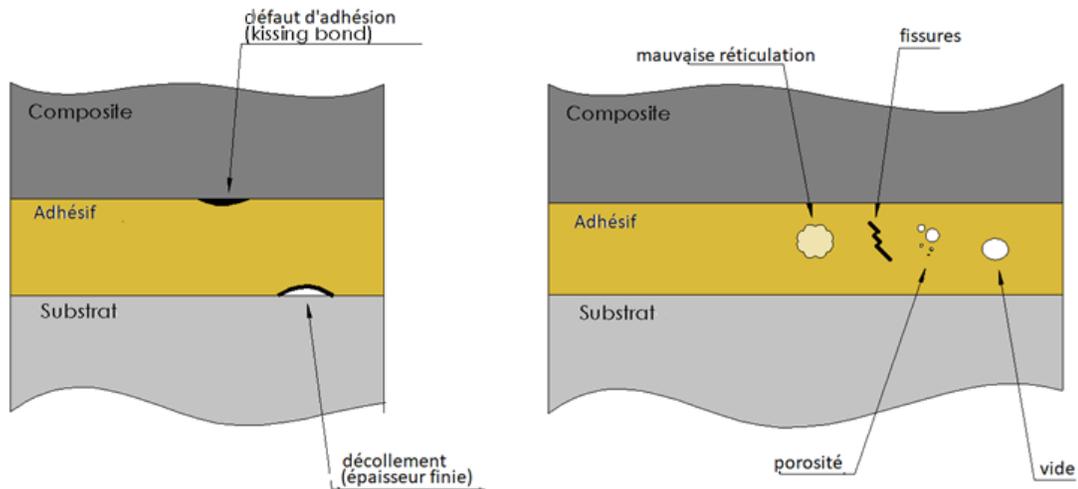


FIGURE 1.3 – Les défauts dans un assemblage collé : défauts adhésifs à gauche, défauts cohésifs à droite

Les **vides** surviennent lorsque l'adhésif est appliqué en quantité insuffisante, lorsque la mise en œuvre n'a pas été adéquate, ou qu'un corps étranger est présent dans la région de collage. Lorsque ce phénomène s'opère au niveau de l'interphase, on parle de **décollement**. La **porosité** correspond à la présence d'un grand nombre de microscopiques bulles d'air d'un diamètre d'environ 10 μm . Elle peut être causée par la présence d'air ou de vapeur d'eau, au niveau du joint collé durant la phase de réticulation. Les **fissures** dans l'adhésif sont souvent causées par une sollicitation externe ou un durcissement incorrect sous un retrait thermique.

Une **mauvaise adhérence** est souvent induite par une mauvaise préparation de la surface ou une contamination des surfaces adhérentes [12]. Ce défaut apparaît aussi dans les zones proches de l'interphase où la polymérisation de l'adhésif aura été incomplète.

Une **faible force de cohésion** peut être la contribution combinée de nombreux facteurs tels qu'un durcissement inadéquat, un mélange inadéquat dans le cas d'une résine bi-composants, la présence d'humidité ou le vieillissement dû à la température de l'adhésif. Elle peut se traduire par l'apparition de fissures au niveau de l'adhésif.

Enfin, les **kissing bonds** sont des défauts d'adhésion accrus, qui peuvent se former en raison de la présence d'une fine couche de graisse ou d'eau entre l'adhésif et le substrat, mais qui peuvent aussi résulter de sollicitations de compression des assemblages [31].

1.2.2.2 Criticité des défauts

Pour la réception des renforcements par collage de matériaux composites en France, une taille maximale des défauts de l'ordre de 15 à 20 cm^2 est acceptée en prenant en compte des notions de surface cumulée (surface de défauts dans un même linéaire de renfort élémentaire), mais aussi la position du défaut qui doit être différente des zones jugées critiques dans un assemblage (ancrages et recouvrements) selon les recommandations du RLPC (Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées) [32].

Le guide américain du ACI (*American Concrete Institute*) [33] quant à lui, préconise :

- d'admettre de petits délaminages inférieurs à 13 cm² lorsque leur surface cumulée est inférieure à 5% de la surface totale et que leur nombre n'excède pas 10 dans 1 m² de renfort,
- de réparer des délaminages inférieurs à 16 cm² par injection de résine ou remplacement de plis; jugement délégué au maître d'œuvre qui décidera en fonction de la taille, du nombre et de la position des défauts,
- de couper les parties contenant des délaminages supérieurs à 16 cm² qui peuvent avoir une incidence sur le rendement du renfort, et de les remplacer par une plaque en recouvrement ou des couches équivalentes.

Leur homologue canadien, le CSA (*Canadian Standards Association*) [34] recommande que tous les renforts soit inspectés afin de détecter les défauts grossiers (vides, bulles et délaminages). Toutes les zones défectueuses dont le bord d'attaque est supérieur à 25 mm ou dont la surface est supérieure à 600 mm² doivent être réparées. Les zones délaminées peuvent être réparées par injection de résine dans la zone endommagée ou par enlèvement sélectif et colmatage. Les méthodes de réparation doivent être exécutées conformément aux recommandations du fabricant.

1.2.2.3 Simulation des défauts

Les défauts rencontrés dans un joint de colle peuvent facilement se produire durant l'élaboration de la colle ou durant son application. Sur le site de préparation, un mauvais stockage, c'est-à-dire dans des conditions extrêmes de froid, de chaleur ou d'humidité, de la résine ou du durcisseur peut entraîner l'absorption d'une quantité importante d'humidité, ce qui a pour effet de modifier de manière considérable les propriétés de la colle.

Afin d'éviter le risque d'apparition de ces défauts, des protocoles comportant un ensemble de recommandations sont mis en place pour la réalisation des assemblages collés acier-composite et béton-composite. Parmi eux, on pourra retenir que le contrôle de la préparation de surface des substrats (acier béton et composite) est primordial pour éviter les défauts d'adhésion [35].

Cette préparation de surface a pour objectif dans le cas de l'acier ou du composite, de dégraisser les supports, d'éliminer les couches indésirables, d'augmenter la rugosité et de modifier la composition chimique de la surface.

Pour ce qui est du béton, il est plutôt préconisé de réaliser un décapage de la laitance suivi d'une aspiration des poussières en surface [11].

Ces défauts peuvent être simulés et contrôlés de différentes manières.

Les vides sont les plus simples à réaliser car il suffit d'incorporer une substance volatile lors de la phase de réticulation de la colle ou bien de prévoir un volume sans colle lors de la réalisation de l'assemblage.

Pour simuler la porosité, certains auteurs se sont basés sur la vitesse à laquelle le mélange des composants de la colle est effectué [36] [37]. En effet, si la vitesse est trop grande, on constate l'apparition de bulles d'air pouvant induire une porosité au sein de l'assemblage.

Lorsque la vitesse du mélange est trop faible, des incohérences chimiques peuvent survenir dans la composition de la colle dues à l'hétérogénéité du mélange. Cette dernière se manifeste par la présence de certaines régions contenant un plus haut pourcentage de réactif. Ce dernier aspect est utilisé pour simuler des défauts de faible cohésion. Dans notre étude, pour simuler ce défaut, nous substituons une partie de la résine époxy par une colle polyuréthane plus souple.

Les défauts de type kissing bonds sont définis et réalisés selon diverses stratégies [38] [39] [40] [41] [42]. Dans leur étude, *Jiao et al.* [38] définissent les kissing bonds comme étant des contacts parfaits entre adhésif et substrat qui ne transmettent pas les sollicitations de cisaillement. *Brotherhood et al.* [39] l'ont simulé par un apport de sollicitation de compression sur l'assemblage ce qui aura tendance à générer des fissurations sur le plan de l'interface. D'autres auteurs [40] [42] ont utilisé du polytetrafluoroéthylène (PTFE -Téflon®) pour le générer. Cette dernière méthode a fait l'objet de beaucoup d'études et de comparaisons avec une contamination par une matière visqueuse. Dans leur étude, *Tighe et al.* [41] concluent que la création du kissing bond avec une incorporation de substance visqueuse telle que la graisse ou les agents démoulant est plus proche de la réalité que l'utilisation de Téflon®.

Certains de ces défauts tels que le décollement, les vides grossiers etc, sont détectables avec les méthodes actuelles utilisées lors de la réception des ouvrages in situ qui font l'objet de la section suivante.

1.2.3 Les techniques CND appliquées pour la réception des assemblages collés du génie civil

Le contrôle non destructif (CND) fait référence à des processus d'estimation, d'évaluation ou d'inspection des matériaux ou composants pouvant permettre de détecter ou de caractériser les défauts et endommagements sans altération des propriétés physiques et mécaniques. Ces méthodes peuvent être utilisées pour évaluer les capacités mécaniques résiduelles de ces matériaux auquel cas on parle d'évaluation non-destructive (END).

En France, le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées propose depuis 2009 un guide pour la réception des travaux de renforcement de matériaux composites sur du béton. L'essentiel des techniques CND proposées sont l'inspection visuelle, le sondage au maillet, et l'évaluation par thermographie infrarouge active [32].

1.2.3.1 L'inspection visuelle

La méthodologie adoptée pour l'inspection visuelle est différente selon le type de renfort concerné.

S'il s'agit des lamelles pultrudées, les défauts recherchés sont d'éventuels manques de colle sur la périphérie des renforts, ainsi que le décollement postérieur à la mise en œuvre pouvant être du à la pré-courbure du matériau (lamelles livrées sous forme de rouleau). Ces défauts se manifestent par la présence de vides entre le support béton et le renfort composite, ou le biseautage

non effectif de la couche de colle à la périphérie des lamelles. Ils sont détectables par observation du champ des lamelles collées comme illustré sur la figure 1.4.

Dans le cas d'un tissu sec stratifié *in situ*, la vérification se focalise sur le bon enrobage des fibres ainsi que les défauts flagrants de collage qui sont plus redondants au niveau des angles concaves et sur les pourtours des angles saillants.

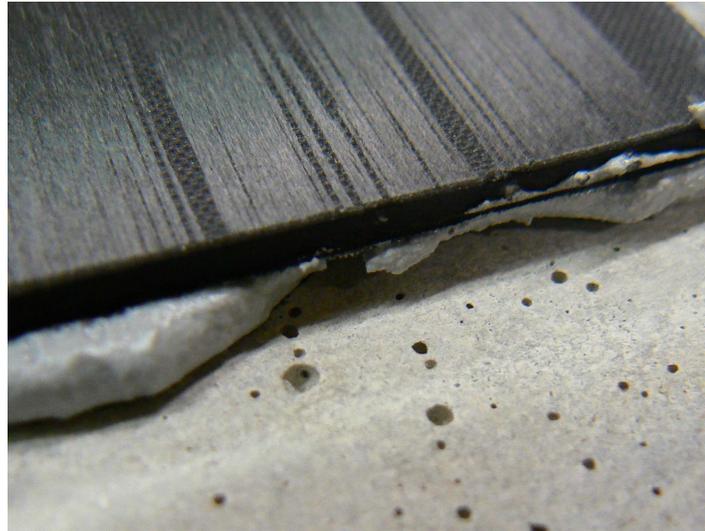


FIGURE 1.4 – Défaut de colle et/ou défaut de marouflage à la périphérie d'une lamelle de carbone [32]

1.2.3.2 Le sondage au maillet

Cette technique consiste à frapper avec un maillet en bois la surface du renfort composite à contrôler. En présence d'un vide, le son émis par le coup de maillet sur cette zone sera différent de ce qui peut être entendu dans une zone saine, ce qui permet de statuer sur la présence d'un défaut. Cette technique permet de détecter les vides lorsqu'ils ont une surface supérieure à 25 cm² [32]. L'aspect ponctuel de la technique rend sa réalisation longue et fastidieuse surtout si de grandes surfaces de renforts doivent être examinées.

Le sondage au marteau et l'inspection visuelle montrent des limites quant à la détection des différents types de défaut rencontrés dans un assemblage collé. Cette problématique a motivé de nombreuses études à se pencher sur l'utilisation de techniques de contrôle non destructif pour l'auscultation des assemblages collés. Nous étayerons dans la section suivante les principes de fonctionnement de ces techniques CND en donnant quelques exemples d'applications dans les domaines proches de notre thématique.



FIGURE 1.5 – Technique d’inspection de renforts composite sur du béton : sondage au maillet [32]

1.3 État de l’art sur les techniques CND/END appliquées au assemblages collés

Nous retrouvons dans la littérature de nombreuses études évoquant l’utilisation de techniques de contrôle non destructif (CND) pour le diagnostic (détection, localisation et identification de défaut) de structures. Les études de CND/END appliquées aux assemblages collés sont essentiellement dans les secteurs du transport / industrie.

Le choix de l’utilisation d’une technique CND dépend fortement du coût de la technologie utilisée, de l’échantillon étudié et des défauts recherchés. Ainsi, l’approche pour diagnostiquer une structure peut parfois nécessiter l’utilisation de plusieurs méthodes [43].

Une meilleure compréhension du contexte, des avantages et des limites de chaque méthode de CND/END est essentielle pour assurer le succès du diagnostic ou de l’évaluation.

Quelle que soit son type, une méthode CND/END suit généralement le même principe de fonctionnement comprenant l’émission d’un signal, son interaction avec le matériau, sa réception, son analyse et son interprétation.

Dans cette partie, nous mettons en évidence deux groupes de techniques CND/END en fonction de la nature des signaux qu’elles émettent : les techniques à base d’ondes électromagnétiques et celles à base d’ondes mécaniques.

1.3.1 Les CND/END à base d’ondes électromagnétiques

1.3.1.1 Les thermographies passives et actives

La thermographie infrarouge (TIR) est une technique CND qui se base sur la conductivité thermique des matériaux. Il existe plusieurs types de déclinaisons de la thermographie dépendant de la présence ou non d'une excitation calorifique externe et selon la nature de cette excitation. Ces différentes sous-branches sont représentées sur la figure 1.6. Selon les conditions de l'environnement d'essai, la durée d'investigation souhaitée ou l'épaisseur diagnostiquée, certaines méthodes de TIR peuvent être plus efficaces que d'autres [44].

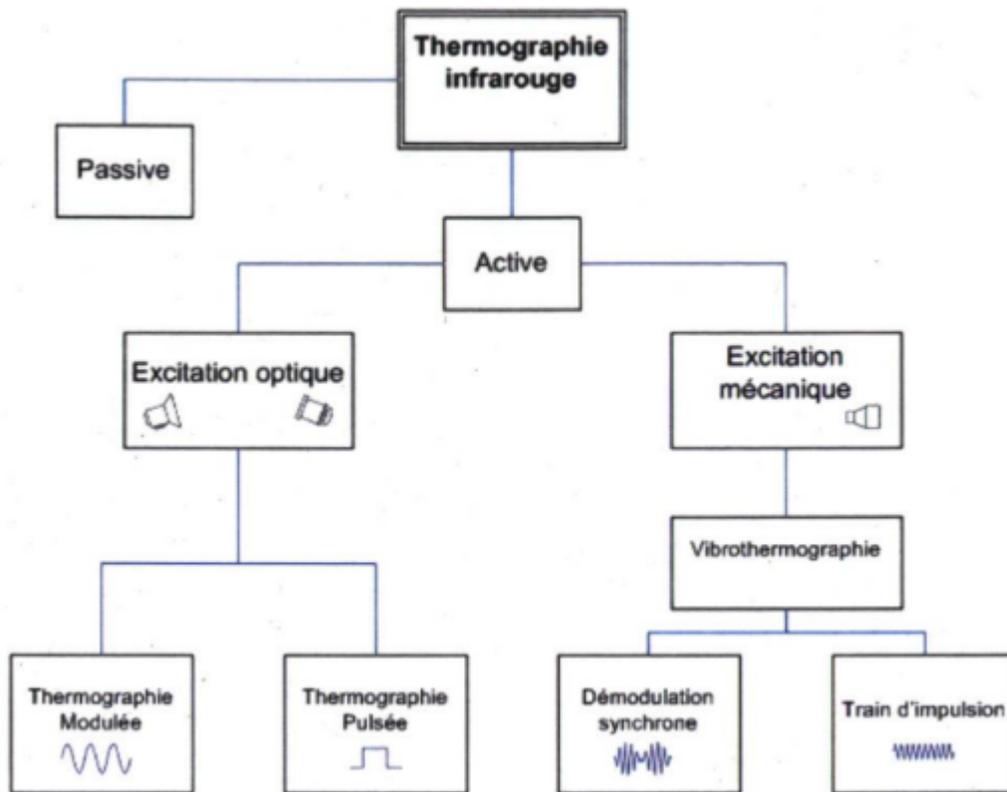


FIGURE 1.6 – Les différents types de thermographie [45]

La TIR dite passive consiste à enregistrer les températures à la surface d'une pièce pour déterminer la présence de défauts ou d'endommagements par observation d'une altération ponctuelle de la conductivité thermique. L'inspection thermographique est utilisée pour des collages d'éléments minces car lorsque les défauts sont plus profonds, ils tendent à produire moins de gradients de température en surface.

Cette technique a un rendement supérieur à l'inspection par sondage au maillet grâce à sa capacité à inspecter une grande surface. Elle a également d'autres avantages telles que la possibilité d'inspecter la pièce à partir d'une seule face ce qui s'avère pratique *in situ*.

Parmi les inconvénients de ce type d'inspection, nous pouvons souligner une instrumentation sensible et coûteuse, le besoin d'inspecteurs hautement qualifiés, et le manque de clarté des défauts s'ils sont en profondeur sous la surface de la pièce.

Les méthodes de thermographies dites actives consistent à provoquer un dégagement de chaleur sur la pièce en la stimulant. Cette stimulation peut être optique (thermographie pulsée, modulée) ou mécanique (vibrothermographie).

Shin et al. [46] ont appliqué la thermographie optique pulsée sur un assemblage collé de deux plaques de composites soumis à des cycles de fatigue. Cette investigation leur a permis de détecter des défauts de fabrication et de repérer l'amorçage de la rupture de l'adhésif.

Par thermographie optique modulée, une nouvelle approche d'inspection a permis à *Montinero et al.* [6] de détecter la position, la taille et, dans une certaine mesure, la forme des défauts inter-laminaires d'un GLARE (*Glass Reinforced Aluminum*).

Une étude menée par *Mabrouki et al.* [47] a également confirmé le potentiel de la vibrothermographie en tant que méthode rapide capable de détecter des fissures jusqu'à 0,1 mm de longueur dans le cas où la pièce peut être mise en vibration à sa fréquence de résonance. La détection des défauts se fait par différentiation entre zones actives où un phénomène de friction est mis en jeu et zones saines de la structure à température ambiante du matériau.

Comme la technique ne tient pas compte de l'orientation des défauts dans l'échantillon étudié, elle est avantageuse pour la détermination des fissures et délaminations par rapport à certaines techniques CND telles que la radiographie [48].

La thermographie infrarouge est de plus en plus utilisée dans le cadre du CND des composites collés pour la détection des défauts grossiers. Cependant, les autres types de défauts semblent difficiles à détecter. Des travaux sur la détection des défauts d'adhérence par la TIR ont été menés [32][49][50], et une détection des défauts est possible jusqu'à 2 cm de diamètre (figure 1.7). Cependant, les auteurs utilisent du Téflon pour générer le défaut, ce qui n'est pas assez représentatif pour simuler un défaut d'adhésion [41].

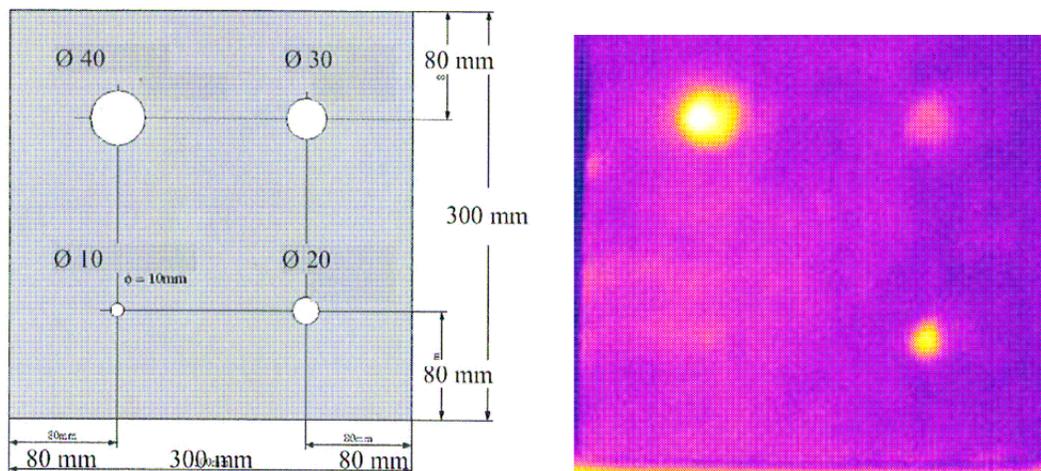


FIGURE 1.7 – Auscultation de défauts d'adhérence réalisés par interposition d'une feuille de 0,5 mm d'épaisseur de Téflon : Positions et dimensions à gauche, image infrarouge après sollicitation thermique à l'aide d'une rampe chauffante à droite. [50]

1.3.1.2 Les techniques optiques

Ces techniques consistent à observer, par voie optique, la structure après y avoir généré des déformations par chargement statique ou dynamique, sachant que les défauts modifieront les champs de déformation de surface [51]. Nous retenons deux principales familles de méthode optique : l'holographie et la shearographie.

L'holographie consiste à illuminer la surface du matériau à l'aide d'une source lumineuse cohérente telle que celle d'un laser, capable de créer des franges d'interférences lumineuses. Puis, les franges obtenues en combinant l'onde émise par la source laser et l'onde diffusée ou diffractée par la structure sont enregistrées pour donner un hologramme. Deux hologrammes seront ainsi constitués avant et après chargement, puis une comparaison des deux est faite afin de révéler la présence du défaut (figure 1.8).

Cette méthode a été utilisée pour l'évaluation de matériaux en nid d'abeille et aida à identifier avec succès le défaut de type décollement [52][53].



FIGURE 1.8 – Motifs de franges réfléchies à partir d'une surface plane à gauche et d'une surface non plane à droite [54]

La shearographie ou interférométrie de cisaillement est également une méthode optique qui utilise les mêmes principes que l'holographie. Lorsqu'une surface est éclairée par une lumière laser hautement cohérente, un motif d'interférence stochastique appelé Speckle (ou figure de Moiré) est créé. Cette figure est projetée sur la puce CCD (*charge-coupled device* en anglais) d'une caméra rigide. Puis, l'application de la faible charge déforme le matériau et génère un mouvement non uniforme de sa surface. Une nouvelle image de cisaillement est enregistrée à l'état chargé et est comparée à l'image avant chargement, ce qui peut permettre d'identifier la présence d'un défaut [55]. Lors de l'interprétation, les zones défectueuses sur la structure testée apparaissent comme des régions de franges anormales sur l'interférogramme.

Plusieurs méthodes de sollicitation ont été testées par *Holownia* [56] pour conclure que la dépression sous vide était la plus adaptée pour détecter les décollements dans un assemblage collé en utilisant cette technique.

Taillade et al. [57] se sont servis de la shearographie en appliquant une dépression sous vide partielle sur un assemblage collé béton-composite afin de détecter des vides de diamètres allant

de 10 à 40 mm (figure 1.9).

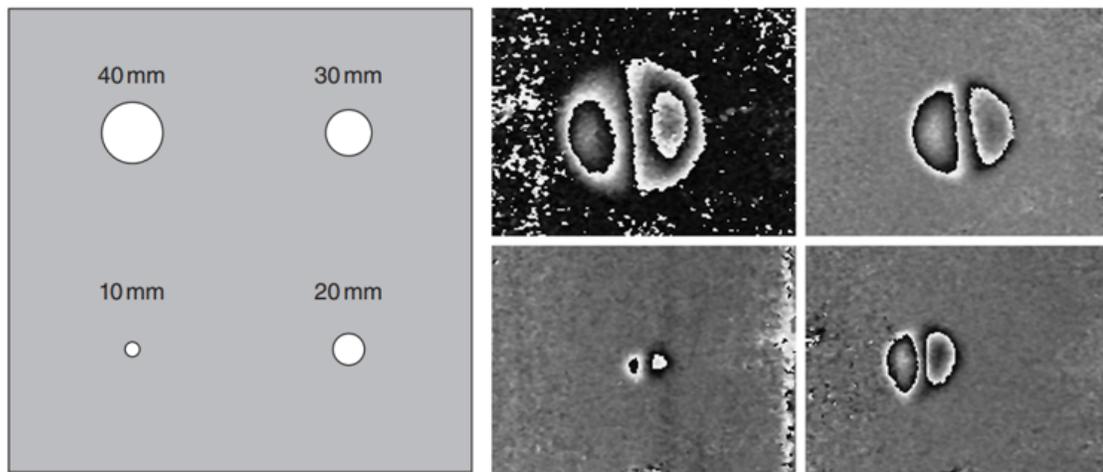


FIGURE 1.9 – Résultats de CND par shearographie sur un assemblage collé béton/composite avec des insertions de feuilles de Téflon® circulaires de différents diamètres : à gauche dimensions des défauts, à droite visualisation des champs de déformation sur l'échantillon pour différentes tailles de défauts et différents niveaux de vide partiel. [57]

Les désavantages liés à ces méthodes résident dans le fait qu'elles n'offrent pas un grand rendement car la détection des défauts se fait de manière ponctuelle comme lors du sondage au marteau. En outre, elles ne permettent pas de détecter des défauts situés en profondeur ou dans une géométrie complexe.

1.3.1.3 La radiographie

La radiographie consiste en l'émission de rayons X ou gamma qui pénètrent les matériaux en fonction de la fréquence d'émission. Les défauts ou irrégularités tels que les vides présents dans un matériau constituent une zone de plus faible densité atténuant moins les rayons la traversant. Ainsi, la différence d'atténuation par rapport aux zones sans défaut rend cette zone détectable sous le film qui reçoit les rayons après qu'ils aient traversé l'objet testé.

Il existe plusieurs types de radiographies selon la nature des rayons émis et chacun a une application spécifique. L'essentiel de ces typologies de radiographie appliquées aux CND des matériaux sont la radiographie neutronique, la radiographie par rayons X (RX) et la gammagraphie. L'utilisation de ces méthodes ne fait apparaître les défauts que lorsque ces derniers s'étendent dans un plan parallèle aux rayons.

Ce désavantage a été par la suite pallié par l'utilisation de la tomodensitométrie ou *CT-scan* qui est une radiographie à rayons X suivi d'un traitement numérique par ordinateur afin de construire une représentation 2D ou 3D de la structure testée par superposition de ses plans mesurés sous différents axes. Cette méthode n'est toutefois pas applicable sur site.

Dans une revue des techniques de CND/END éditée par *Gholizadeh* [58], nous notons que la radiographie conventionnelle RX est la plus utile lorsque les pièces ne sont ni trop épaisses

ni trop minces (1 à 5 mm), tandis que celle utilisant les rayons γ (gamma) est efficace pour les pièces épaisses grâce à une longueur d'onde inférieure.

D'autre part, *Dwivedi et al.* [43] affirment que, comparée aux autres méthodes CND, la radiographie peut être plus avantageuse du fait qu'elle donne une référence permanente de la rigidité de l'objet testé.

Il semble toutefois y avoir des constatations contradictoires sur les types de défauts pouvant être détectés par radiographie. *Harris* [59] affirme que la radiographie permettrait d'identifier les vides, mais que les déchaussements de fibres, les fissures résultant de la contraction thermique aussi bien que les fissures interlaminaires ne peuvent pas être distingués là où *Prakash* [60] suggère lui que les fissures thermiques sont facilement détectées, tout comme les corps étrangers et les inclusions, mais que les déchaussement interlaminaires et les déchaussements de fibres sont généralement difficiles à détecter. *Salkind* [61] n'a pas été en mesure de détecter des indications de vides ou de fissures dans ses investigations, tandis que *Nevadunsky et al.* [62] ont pu détecter de grands vides, fissures et porosités dans les adhésifs.

La combinaison des méthodes de radiographie pourrait être nécessaire pour répondre à cette problématique. Dans l'optique d'évaluer la qualité d'un assemblage collé de plaques d'aluminium, *Zheng et al.* [63] ont utilisé une combinaison de mesures de radiographie neutronique et de CT-scan. La même combinaison de méthodes a été utilisée par *Vavrik et al.* [64] pour l'évaluation d'un assemblage collé aluminium/composite. Ces techniques se sont avérées efficaces pour la détection des vides ainsi que la détermination de leurs tailles. Toutefois, cette étude se limitait à l'inspection de petits échantillons et nécessitait un temps d'analyse conséquent lié au traitement informatique pour l'acquisition d'images et la reconstruction tomographique ce qui ne constitue pas un bon rendement pour son application sur chantier.

D'autres désavantages de la technique sont à noter comme sa limitation en profondeur d'inspection à 500 mm [65]. De plus, la technique nécessite des équipements coûteux, des mesures de radioprotection drastiques et des personnels formés en sécurité avec délivrance de permis (CAMARI) au vu de la dangerosité de la technique ce qui limite son application dans le domaine du génie civil.

1.3.2 Les CND/END utilisant les ondes ultrasonores et acoustiques

À la différence des techniques de CND/END évoquées ci-dessus (TIR, RX, R γ et méthodes optiques) qui utilisent des ondes électromagnétiques, dans cette partie nous nous concentrons sur les méthodes non destructives qui utilisent des ondes ultrasonores (ondes mécaniques dont la gamme de fréquence varie entre 16 kHz et 1 GHz).

Dans un premier temps, nous décrirons la physique de propagation de ces types d'ondes, puis nous évoquerons les généralités et quelques applications des méthodes ultrasons (US) et d'émission acoustique (EA).

Enfin, nous décrirons la méthode des acousto-ultrasons (AUS) qui est une combinaison de ces deux dernières (US et EA). Nous évoquerons dans cette dernière partie les caractéristiques

propres aux trois méthodes. Ainsi, nous traiterons des capteurs utilisés pour l'émission et/ou la réception des ondes mécaniques, des couplants qui servent de milieu de transition entre le capteur et le matériau à étudier et de quelques paramètres qui décrivent les signaux reçus à travers ces capteurs.

1.3.2.1 Aspect physique de la propagation des ondes mécaniques

Les ultrasons sont des ondes mécaniques progressives, leur propagation n'induit donc que des déplacements d'énergie et non de matière. La progressivité signifie également que la perturbation se retrouve identique à elle-même après une durée T (période temporelle de propagation).

Cette perturbation peut être décrite comme une vibration du milieu régi par l'équation 1.1 d'onde sinusoïdale de faible amplitude :

$$\frac{\partial^2 a}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} \quad (1.1)$$

Avec :

- a : déflexion instantanée en m,
- t : temps en s,
- c : vitesse de propagation des ondes en m/s,
- x : coordonnées de position en m.

Les vibrations du milieu sont caractérisées par les paramètres suivants :

- la vitesse de propagation v** : vitesse de vibration des particules autour de la position d'équilibre :

$$v = \frac{\partial a}{\partial t} = \omega A \cos(\omega t - \phi) \quad (1.2)$$

Avec :

- $\omega = 2\pi f$, la fréquence angulaire en rad/s,
- A = amplitude de la déviation de la position d'équilibre en m,
- ϕ = phase angulaire ou déviation, à laquelle la particule vibrante atteint la valeur momentanée de la déviation de la position d'équilibre, en rad.

Selon la nature du matériau, les ondes ultrasonores sont capables de se propager à des vitesses importantes. Par exemple, leur vitesse de propagation dans l'acier est de 5900 m/s et de 1400 m/s dans l'eau avec des impédances respectives de $45 \cdot 10^6$ et de $1.5 \cdot 10^6$ Kg/s/m² [43].

- la période d'onde, T** = temps après lequel les valeurs instantanées sont répétées,

- **la fréquence d'onde**, f = inverse de la période d'onde : $f = 1/T$ en Hz,
- **la longueur d'onde**, γ = longueur minimale entre deux particules vibrantes consécutives de la même phase :

$$\gamma = c.T = \frac{c}{f} \quad (1.3)$$

On distingue différents types d'ondes ultrasonores en fonction de leur mode de propagation dans le milieu (figure 1.10) :

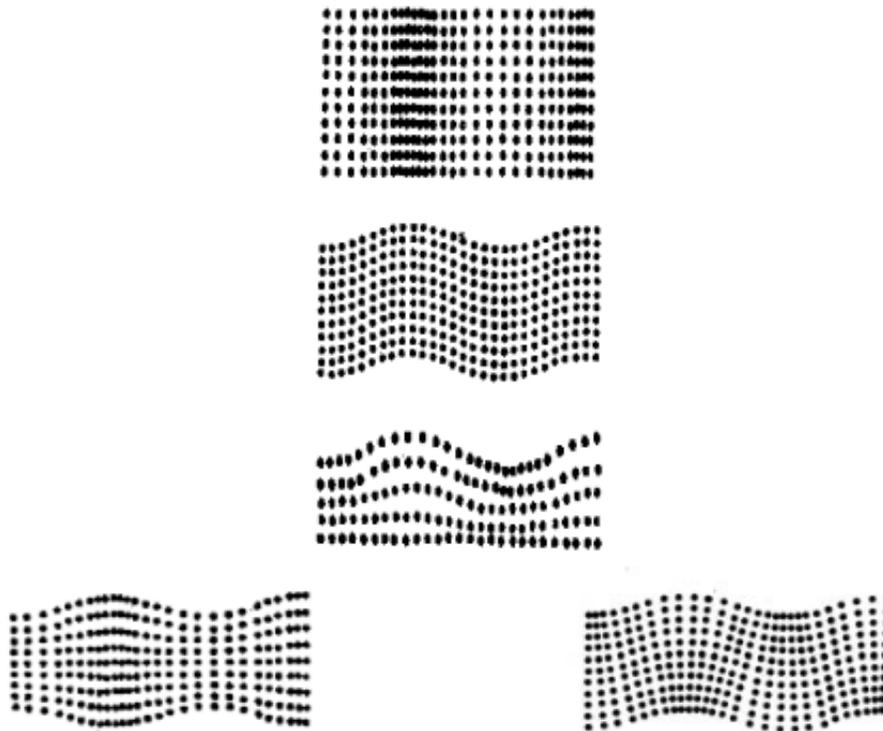


FIGURE 1.10 – Propagation des différents types d'ondes de haut en bas : longitudinale, transversale, de Rayleigh, de Lamb (mode symétrique à gauche, mode antisymétrique à droite) [65]

- Ondes longitudinales : lorsque le milieu vibre de façon rectiligne, dans le sens de la propagation des ondes ultrasonores,

Ces types d'ondes sont couramment utilisés dans la pratique. Elles se propagent en milieu solide, liquide et gazeux. La propagation d'onde longitudinale pure est uniquement limitée par les dimensions du milieu qui sont en général suffisamment grandes par rapport à la longueur d'onde. La célérité de ces type d'onde dans un milieu infini s'écrit :

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

Avec : E - module élastique en Pa, ν – rapport de Poisson et ρ – densité en kg/m^3 .

- Ondes transversales : lorsque les particules vibrent dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation des ondes,

Ces types d'ondes se propagent seulement dans un milieu solide dont les dimensions sont nettement supérieures à la longueur d'onde. Leur vitesse est toujours inférieure à celle des ondes longitudinale. Elle est égale à :

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1}{2 * (1 + \nu)}} \quad (1.5)$$

Avec : G - module de cisaillement en Pa, E, ν et ρ comme ci-dessus.

- Ondes de Rayleigh : lorsque les ondes se propagent dans une couche d'interface avec deux directions des vibrations des particules : perpendiculaire et parallèle à la direction de la propagation des ondes,

Ces types d'ondes pénètrent dans le milieu jusqu'à une profondeur proche de la longueur d'onde (dans un espace semi-infini). Les vibrations dans la direction perpendiculaire ont une amplitude beaucoup plus élevée que dans le sens parallèle. La célérité de ces ondes en fonction de la célérité des ondes transversales peut être exprimée à travers l'équation 1.6.

$$c_R \approx \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} * c_T \approx \frac{0.9}{0.95} * c_T \quad (1.6)$$

- Ondes de Lamb : lorsque les ondes sont guidées et se propagent parallèlement à la surface étudiée avec un mouvement particulière elliptique par une superposition de modes symétrique S_i (à gauche de figure 1.10) et de modes antisymétrique A_i (à droite de figure 1.10).

Les ondes de Lamb sont dispersives, c'est-à-dire que les vitesses des différents modes dépendent de l'épaisseur de la plaque et de la fréquence d'émission (figure 1.11).

L'énergie d'une onde ultrasonore traversant un milieu est atténuée en fonction des propriétés du milieu. Les raisons sont les suivantes :

- l'absorption d'énergie, qui se produit dans tous les états de la matière et causée par le frottement intrinsèque du milieu conduisant à la conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique,
- la réflexion, la réfraction, la diffraction et la dispersion de l'onde ; ce type d'atténuation de l'onde est caractéristique des milieux hétérogènes comme les polycristaux métalliques et le béton ; et a lieu lorsque l'onde passe d'un milieu à un autre.

Une onde incidente donne naissance à deux ondes réfléchies et deux ondes transmises lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre, comme illustré sur la figure 1.12.

On définit par l'impédance acoustique d'un milieu sa capacité à résister à la propagation d'une onde mécanique. Les zones défectueuses au sein du matériau auront des impédances

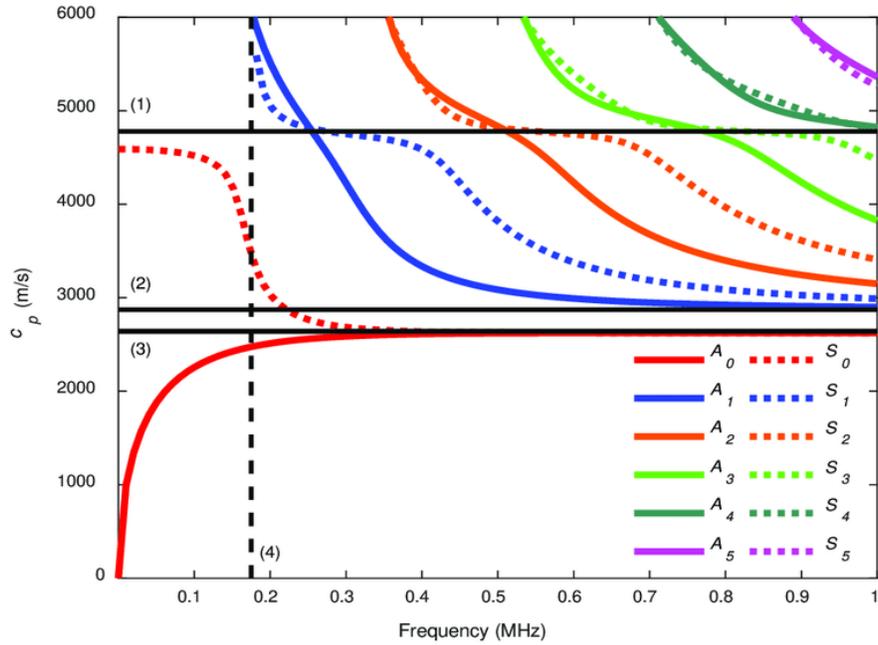


FIGURE 1.11 – Exemple de courbes de dispersion de la vitesse de phase des ondes de Lamb pour une plaque de mortier d'épaisseur $2h$ ($c_L = 4779$ m/s, $c_T = 2872$ m/s, $2h = 13$ mm). Les trois vitesses non dispersives (longitudinales (1), de cisaillement (2) et de Rayleigh (3)) sont mises en évidence, ainsi que la première fréquence de coupure (4) (ligne discontinue). Les modes antisymétriques A_i sont représentés par des lignes pleines et les modes symétriques S_i sont représentés par des lignes pointillées. [66]

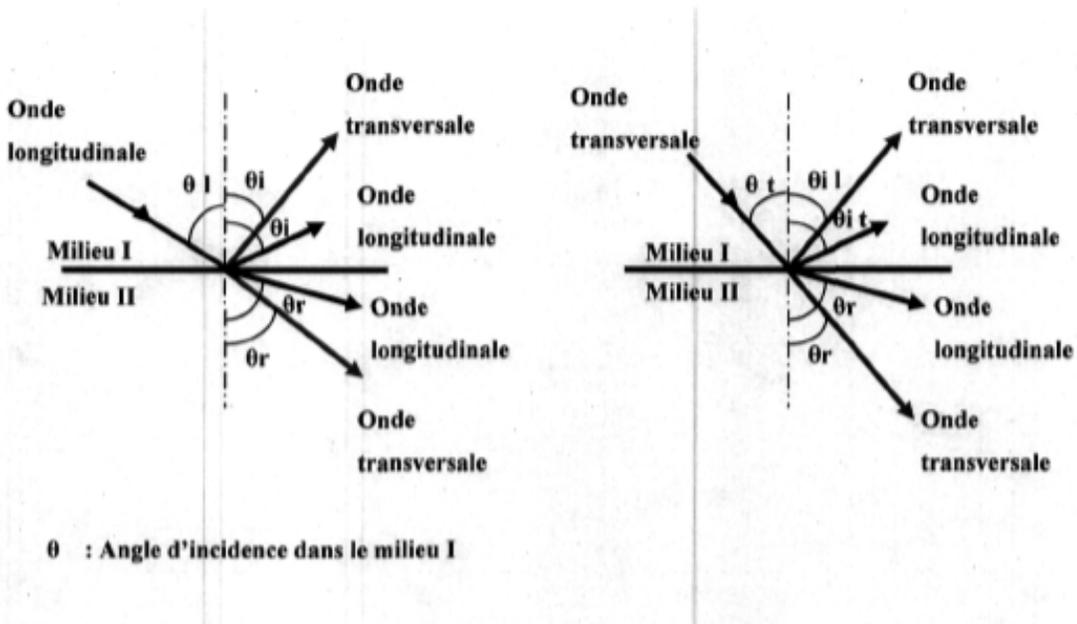


FIGURE 1.12 – Réflexion et transmission des ondes longitudinales et transversales [67]

acoustiques différentes de ce dernier qui vont impacter l'onde les traversant en modifiant les vitesses de propagation et/ou les amplitudes, ce qui a pour effet de les mettre en évidence [68].

Cette propriété physique relative aux ondes ultrasonores fait l'objet d'études de contrôles et d'évaluations non destructives que nous détaillons dans les sections suivantes.

1.3.2.2 Les techniques à base d'ultrasons (US)

Ces techniques consistent à émettre des ondes ultrasonores (entre 1 et 50 MHz) à travers la structure à diagnostiquer puis, après sa propagation, à en étudier la réponse en analysant le temps de vol et l'énergie de l'onde au sein du matériau dans le cas de l'utilisation des ondes volumiques (Longitudinales et Transversales)[69] [70] [71] [72] et en évaluant les fréquences (modes) de vibration et vitesses de phase dans le cas des ondes guidées type SH (*Shear-Horizontally*) et Lamb [31] [73] [74].

Lors d'une END ou d'un CND par ultrasons, l'onde est périodique et peut être générée par l'application d'une charge électrique sur un cristal piézoélectrique ou avec une impulsion laser.

Selon le mode de génération et de détection des ultrasons et selon le matériel utilisé, il existe différentes méthodologies : la méthode de réflexion (dit *pulse-écho* en anglais) et la méthode en transmission (*pitch-catch* en anglais) (figure 1.13).

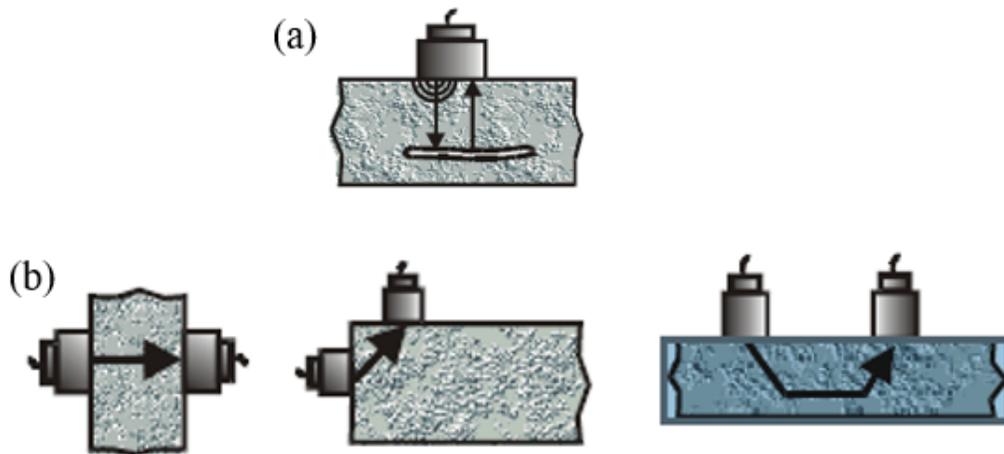


FIGURE 1.13 – Disposition des capteurs pour les différents modes d'auscultation par ultrasons : a) en réflexion et b) en transmission [65]

Dans la méthode en réflexion, un unique capteur piézo-électrique peut faire office d'émetteur et de récepteur. Ce mode d'émission est approprié lorsque la face opposée de l'objet à tester est inaccessible. Elle se base essentiellement sur l'analyse des échos reçus qui peuvent être affectés par la présence d'un défaut.

Goglio et Rossetto [71] ont utilisé cette méthode afin de détecter l'absence d'adhésion et le manque d'adhésif entre deux plaques métalliques d'épaisseur 0,8 mm collées avec une colle époxy. Ils ont pour cela établi une méthode d'analyse définissant un index i comme étant le degré d'adhésion dépendant des coefficients d'atténuation et de réflexion des matériaux. Cependant, leur méthode d'analyse n'est efficace que si les conditions d'essai (émission et épaisseurs matériaux)

sont semblables aux leurs. De plus, l'applicabilité de la méthode se limite aux substrats d'épaisseur maximale de 2 mm.

Challis et al. [70] ont, grâce à cette technique, contrôlé un joint de colle à recouvrement simple entre deux métaux avec des épaisseurs de substrats et d'adhésif différentes. Dans la plupart des cas, il était possible de détecter le vide dû à un décollement au niveau de l'interphase, alors que la détection du vide à l'intérieur de la colle n'était possible qu'après un traitement significatif du signal et seulement pour des combinaisons restreintes d'épaisseur de substrat et d'adhésif.

Korzeniowski et al. [75] ont évalué dans une étude l'aptitude de la technique pulse-echo à détecter des vides de différentes formes et tailles présents dans des assemblages composés d'adhésif structural à base de résine méthacrylique entre des tôles d'acier de 60 mm par 60 mm et d'épaisseur de 1 mm. Comme illustré sur la figure 1.14, les auteurs ont pu détecter les vides jusqu'à un diamètre de 10 mm ainsi que leur forme.

Le mode en réflexion des US permet en outre de représenter les signaux mesurés en chaque

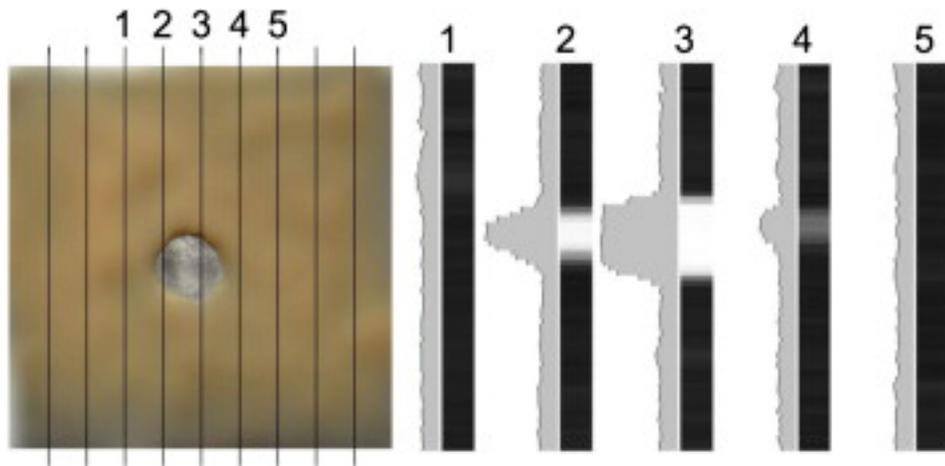


FIGURE 1.14 – Échantillon d'assemblage adhésif/acier avec un vide circulaire de 10 mm de diamètre et profil d'adhérence approprié. Les surfaces d'échantillonnage ont été balayées tous les 5 mm et l'axe de symétrie du capteur a été déplacé le long de lignes verticales marquées sur les échantillons.[75]

position de la structure inspectée sous la forme d'une image telle qu'un Bscan (représentation spatio-temporelle suivant une ligne, à droite de la figure 1.14), ou un Cscan (représentation bi-dimensionnelle de l'amplitude) .

Ces représentations permettent de mesurer avec une assez bonne précision les dimensions des défauts de types "vide". La principale limite de cette technique est sa durée de mise en œuvre car le transducteur doit balayer chaque point de la structure à tester.

Il existe également un second mode, mode en transmission (*pitch-catch* en anglais) qui consiste à analyser l'onde après sa propagation dans le milieu étudié entre l'émetteur et le récepteur placés en différentes positions.

Les deux capteurs peuvent être placés suivant l'axe perpendiculaire de la pièce à tester ou du même côté (figure 1.13).

L'utilisation des ondes guidées (SH ou Lamb) se fait à travers ce mode de transmission et offre

de bonnes perspectives dans le contrôle [42] [76] [77] et l'évaluation [73] [78] des assemblages collés.

Castainings [73] a utilisé des ondes ultrasons guidées SH pour évaluer les propriétés mécaniques d'un joint de colle entre deux plaques d'aluminium avec différents degrés d'adhésion soumis à des sollicitations de cisaillement. Il a matérialisé les différents degrés d'adhésion en négligeant le traitement de surface sur une éprouvette et en enduisant un contaminant huileux à l'interface adhésif/adhérent sur une autre éprouvette. L'étude conclut que la technique offre un bon potentiel pour évaluer le niveau de dégradation de l'interphase par estimation du module élastique et de la résistance au cisaillement de l'adhésif pour les structures de composites collés.

Li et al. [42] ont pu détecter un défaut d'adhésion par une estimation des temps de vol (ToF *Time-of-flight* en anglais) des modes antisymétriques des ondes de Lamb. Ce type de défaut a été simulé dans leur éprouvette d'assemblage collé acier/composite avec une insertion de Téflon. Ils ont pu établir une corrélation entre la diminution du ToF et l'augmentation de la taille du défaut.

Les ultrasons générés par impulsion laser peuvent être classés dans ce type de méthodologie d'utilisation. Ils sont plus souvent utilisés lorsqu'il s'agit d'évaluer ou de contrôler des assemblages de couches très minces qui requièrent des longueurs d'ondes d'ordre nanométrique [79] [80].

Les techniques à base d'US comportent plusieurs avantages dont une grande vitesse d'acquisition et leur facilité d'utilisation sur le terrain. De plus, la technique permet de détecter des défauts plus en profondeur relativement à d'autres techniques CND qui ne sont efficaces qu'en surface (exemple TIR).

La limite de la technique réside dans la difficulté d'installation et de reproductibilité (utilisation d'un couplant), les compétences nécessaires pour inspecter une pièce avec précision et le besoin d'un échantillon de référence (calibrage préalable) pour assurer des interprétations précises. De plus, les défauts de type "*kissing-bond*" sont toujours difficile à détecter car le substrat étant en contact intime avec l'adhésif, on n'observe pas forcément de différence d'impédance acoustique notable ce qui rend le défaut moins différentiable du milieu de propagation environnant [40].

1.3.2.3 L'émission acoustique (EA)

Selon la norme *AFNOR NF EN 13554*, l'émission acoustique correspond à «un phénomène de libération d'énergie sous formes d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau ayant des processus dynamiques de déformation». Ce phénomène peut être dû à des mécanismes de rupture, de fissure ou de déformation plastique [81] [82] [83] [84] [85] des frottements [86], de la corrosion [87] [88], de la cavitation [89], des impacts mécaniques [90], etc.

Cette énergie élastique appelée événement d'EA peut être captée après sa propagation dans le matériau et transformée en signaux électriques par plusieurs technologies dont, entre autres, les capteurs piézoélectriques qui sont les plus utilisés, les capteurs capacitifs, les interféromètres

laser, les réseaux de Bragg sur fibre optique, etc. Le traitement que l'on peut réaliser sur ces signaux a pour objectif de déterminer le type d'endommagement à la source de l'événement d'EA. Seuls les défauts évolutifs sont détectables avec cette méthode CND.

On distingue deux types de signaux d'émission acoustique : une émission continue (ou pseudo-continue) et une émission discrète. L'émission continue se traduit par une augmentation apparente du bruit de fond due à des événements d'EA trop fréquents pour être discernables. L'émission discrète ou salve est quant à elle constituée d'événements transitoires d'énergie importante et constitue la forme d'émission la plus exploitée dans les contrôles industriels.

L'individualisation de chaque salve EA est réalisée à l'aide de trois paramètres d'acquisition : PDT, HDT et HLT (figure 1.15).

Le premier temps nommé *Peak Definition Time* (PDT) permet de déterminer l'amplitude maxi-

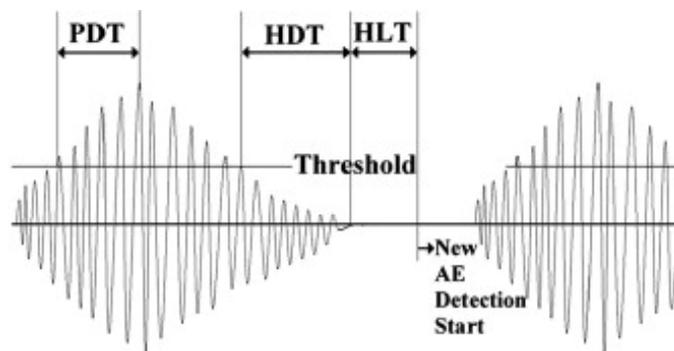


FIGURE 1.15 – Paramètres d'individualisation des salves acoustiques [91]

male du signal. La fin du signal est déterminée par le non dépassement du seuil pendant un temps correspondant au *Hit Definition Time* (HDT) prédéfini. À la suite de l'enregistrement, le *Hit Lockout Time* (HLT) définit un temps d'aveuglement afin de supprimer d'éventuels échos. Le but de ces 3 paramètres est d'isoler la salve du bruit environnant et d'éliminer les échos. Ils sont propres à chaque milieu de propagation et seront donc définis pour les différents types d'assemblage à l'aide d'essais de cassé de mines (*Hsu-Nielsen test*) [92].

L'émission acoustique est particulièrement efficace pour la surveillance continue des structures porteuses car elle permet de suivre, en temps réel, l'apparition des endommagements et permet de définir leur sévérité [43]. Par exemple, dans une étude de *Ramadan et al.* [87] l'EA a été utilisée pour suivre l'endommagement d'un toron en acier de haute résistance utilisé pour les ouvrages précontraints, qui subit des essais de fissurations par corrosion sous tension. Les auteurs ont pu définir une corrélation entre l'évolution de l'activité acoustique au cours des essais et la présence de plusieurs états d'endommagements correspondants respectivement à l'amorçage des fissures, à leur propagation et à la rupture du toron. Cette étude montre un bon potentiel pour l'utilisation in situ de l'EA pour la surveillance en temps réel de l'état de santé des câbles en acier utilisés dans les structures en béton précontraint.

Dans le domaine plus spécifique des assemblages collés, une étude de *Santulli et Lucia* [93] met en avant l'utilisation de l'EA dans une étude END de la qualité d'un joint de colle. Les auteurs

enregistrent l'activité acoustique provenant de la cuisson d'un joint entre deux plaques d'aluminium de 1.6mm d'épaisseur collé par recouvrement sur une surface de 25.4mm par 12.7mm . Certaines éprouvettes ont été réalisées en respectant les normes et les lignes directrices établies (*ASTM D1002*) concernant entre autres le traitement de surface, la pression, la durée de cuisson, les températures. D'autres éprouvettes ont été réalisées en modifiant un ou plusieurs de ces facteurs afin de dégrader l'état des joints. Des essais en traction ont été réalisés sur ces assemblages pour vérifier la qualité des joints et l'analyse des événements EA émis lors de leur cuisson a permis de prédire 3 des 5 joints présentant les caractéristiques les plus critiques.

L'émission acoustique a été utilisée également par *Magalhães et De Moura* [94] pour prédire le mode de rupture de joints collés de deux plaques de composite (à fibres de verre et à fibres de carbone) soumises à des efforts de cisaillement. Pour une rupture cohésive (interphase plus forte que le cœur de la colle), les auteurs ont observé une augmentation constante de l'énergie cumulée des événements acoustiques (figure 1.16-a). Quant à la rupture adhésive, elle était caractérisée par un nombre de coups plus important avec une densité plus importante que dans le premier cas (figure 1.16-b).

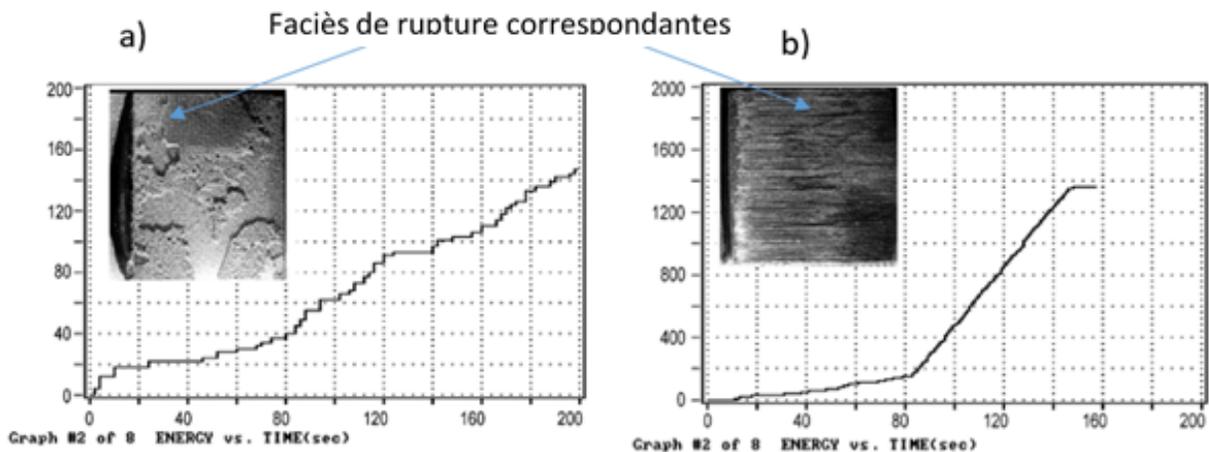


FIGURE 1.16 – Variation de l'énergie acoustique cumulée en fonction du temps et les faciès de rupture correspondantes : a) rupture cohésive, b) rupture adhésive [94]

Le désavantage de cette technique réside dans le fait que les salves acoustiques n'apparaissent dans la plupart des applications que lorsque l'échantillon a entamé son endommagement. De plus, contrairement aux méthodes ultrasonores, l'émission acoustique ne permet pas de déterminer tous les défauts mais seulement les défauts évolutifs, sans nous renseigner sur leur taille et leur géométrie [58].

1.3.2.4 La technique des acousto-ultrasons (AUS)

1.3.2.4.1 Principe de fonctionnement de la technique

La technique des acousto-ultrasons est une combinaison des techniques de l'émission acoustique et des ultrasons. Elle consiste à générer une onde ultrasonore au sein d'un matériau et à la

réceptionner après sa propagation grâce à des transducteurs piézoélectriques en vue d'un traitement avec les outils de l'émission acoustique. Cette technique est peu explorée et pourrait être efficace pour l'auscultation des assemblages collés car elle offre une alternative aux techniques d'émission acoustique (EA) et ultrasons (US) seules. Elle permet de s'affranchir d'une sollicitation généralement nécessaire pour la technique EA et offre une possibilité de sondage sur des distances plus importantes que la technique US car utilisant de plus basses fréquences.

1.3.2.4.1.1 Paramètres décrivant le signal

La définition du signal d'acquisition lors de l'application de la technique des acousto-ultrasons est la même que celle de la salve de l'émission acoustique. De ce signal (figure 1.17), on peut définir quelques paramètres exploitables dans les domaines temporel et fréquentiel :

- la durée du signal : temps écoulé entre le premier dépassement et le dernier dépassement du seuil d'un signal, le seuil étant l'amplitude en dB à partir de laquelle on considère qu'un signal est significatif,
- l'amplitude : amplitude maximale en dB atteinte par le signal,
- le temps de montée : intervalle de temps entre le premier dépassement du seuil et l'amplitude maximale,
- le nombre de coups : nombre de franchissements du seuil sur la durée du signal,
- le nombre de coups au pic : nombre de coups entre le premier dépassement du seuil et l'amplitude maximale,
- la fréquence moyenne : rapport du nombre de coup sur la durée du signal exprimé en kHz,
- l'énergie absolue : exprimée en atto-Joules, est l'intégrale du carré de l'amplitude du signal sur sa durée, $E = \int V^2(t) dt$ où $V(t)$ est la tension de sortie du capteur en fonction du temps,
- la force du signal : aire sous l'enveloppe du signal en picovolt-s,
- la fréquence d'initiation en kHz : rapport entre le nombre de coups au pic et le temps de montée,
- la fréquence de réverbération : fréquence de la décroissance de la salve en kHz, rapport entre le nombre de coups à la décroissance et le temps de descente,
- le barycentre fréquentiel : exprimé en kHz, est le barycentre du spectre fréquentiel obtenu par transformée de Fourier,
- la fréquence pic : fréquence au maximum du pic de la transformée de Fourier de la salve en kHz,
- la puissance partielle en kHz : puissance dans une bande de fréquence donnée du spectre fréquentiel.

Plusieurs auteurs dans la littérature ont recalculé certains paramètres dérivés de ces descripteurs classique tels que le SWF (*stress wave factor* en anglais), l'AUP (*acousto-ultrasonic parameter* en anglais), le RA (*Rise angle*) value, etc.

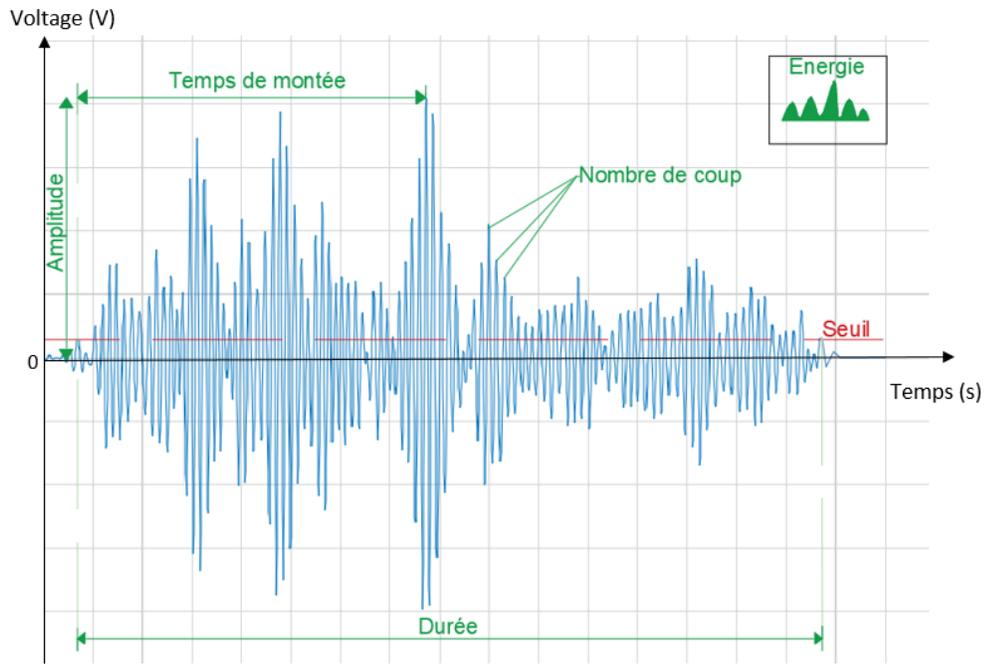


FIGURE 1.17 – Descripteurs temporels d'un signal d'EA

— Le SWF (*Stress Wave Factor*) :

Selon Vary [95], la définition de ce paramètre est laissée à l'appréciation du chercheur car il dépend des descripteurs contenant les caractéristiques les plus pertinentes selon la configuration de l'essai, du matériau ou de la géométrie de la structure testée. Ainsi, plusieurs méthodes de calcul permettent de définir cette valeur mais la plus utilisée est celle décrite par l'équation 1.7 :

$$SWF = R * G * C \quad (1.7)$$

Avec : R - le nombre de répétitions de salve émise, G - l'intervalle de temps prédéfini séparant différentes salves et C - le nombre de coups total des salves.

La méthode qui définit le SWF doit être choisie de manière adéquate pour une interprétation correcte des résultats [96].

— L'AUP (*Acousto-Ultrason Parameter*) :

L'utilisation de ce paramètre dans le post-traitement des mesures par acousto-ultrasons a pris la place sur celle du SWF dans la littérature [7]. Il est en effet relativement plus sensible aux propriétés physiques des matériaux que le SWF, car il prend en compte l'amplitude du signal qu'il subdivise en p parties égales en plus du nombre de coups correspondant à chaque partie i (équation 1.8).

$$AUP = \sum_{i=0}^p V_i * (C_i - C_{i+1}) \quad (1.8)$$

Avec : V_i - le seuil en V à l'instant i , C_i - le nombre de coups dépassant le seuil V_i

Sur la figure 1.18, l'auteur donne un exemple de calcul de l'AUP.

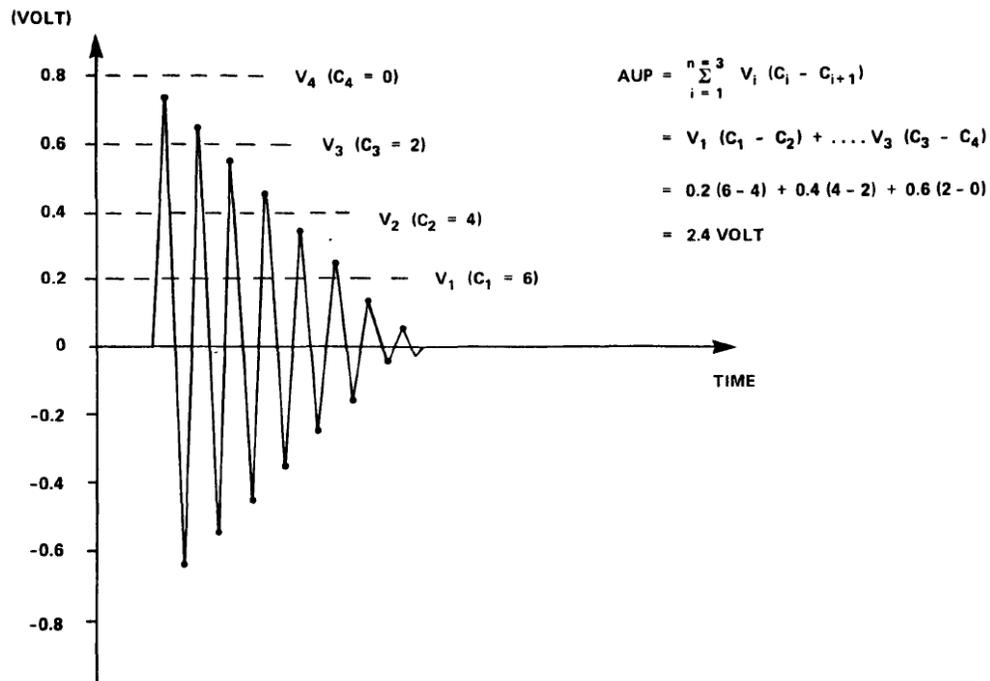


FIGURE 1.18 – Exemple de calcul de l’AUP [7]

— Le RA value (Rise angle) :

Il s’exprime en s/V ou s/dB. C’est le rapport entre le temps de montée et l’amplitude du signal. Dans la littérature, on utilise souvent le plan qu’il forme avec la fréquence moyenne (kHz) pour caractériser les origines d’une fissuration [97] [98] [99] comme l’illustre l’exemple de la figure 1.19.

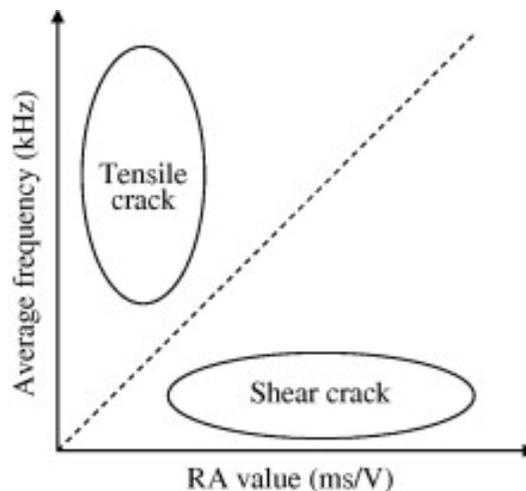


FIGURE 1.19 – Classification conventionnelle des fissures dans le béton selon le JCMS (*Japan Construction and Material Standard*) [100]

1.3.2.4.1.2 Transducteurs piézoélectriques

Lors de l'émission et de la réception des ondes ultrasonores pour une application en US, EA ou AUS, on utilise le plus souvent des transducteurs piézoélectriques. L'effet piézo-électrique a été découvert à Paris en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie. Il est caractéristique des matériaux capables de se déformer sous l'action d'un champ électrique ou de créer un champ électrique sous l'action d'une contrainte mécanique. Les capteurs piézoélectriques se composent de plusieurs éléments (figure 1.20) dont :

- une céramique piézoélectrique usuellement en titanate-zirconate de plomb (PZT) en forme cylindrique avec des électrodes sur chaque face,
- des électrodes connectées l'une à une masse électrique et l'autre à un fil de signal,
- une éventuelle masselotte pour les capteurs large bande conçue pour minimiser les réflexions vers l'élément et pour amortir le signal autour de la fréquence de résonance,
- et un boîtier métallique qui sert de blindage et minimise les interférences électromagnétiques.

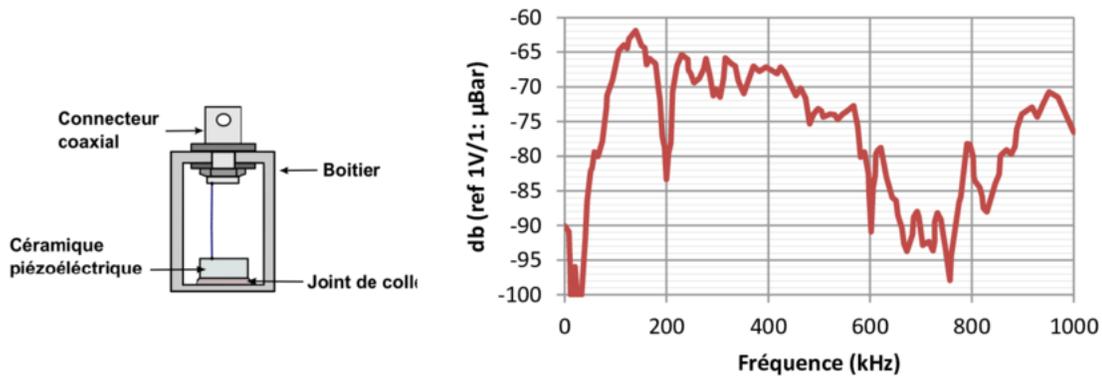


FIGURE 1.20 – Schéma et courbe de sensibilité du capteur résonant R15α [101]

1.3.2.4.1.3 Facteurs influençant les mesures

Pour obtenir des résultats fiables, une procédure de mise en œuvre de la technique doit être préétablie et respectée pour tous les échantillons testés. En effet, celle-ci est indispensable car la technique peut être influencée par plusieurs facteurs autres que la variation des propriétés de l'échantillon. Parmi ces facteurs, on peut citer le type de capteurs, la pression appliquée sur eux, le couplant utilisé pour les relier à l'échantillon, leur position ainsi que leur orientation et également le choix des consignes d'émission [7].

La pression appliquée sur les capteurs est un des facteurs influant de manière prépondérante

sur les mesures. Une pression suffisante mais pas excessive doit être appliquée aux transducteurs afin de les coupler à l'échantillon [102].

Pour créer une continuité entre le matériau testé et le capteur piézoélectrique, on se sert d'un couplant. Le choix et l'application du couplant peuvent aussi être des facteurs qui affectent les résultats et notamment la répétabilité des mesures. Par exemple, une étude comparative de trois couplants menée par *Haddad et Iyer* [102] sur un échantillon de polychlorure de vinyle sans défaut non sollicité a montré une variation de la propagation des ondes caractérisée par une différence de la valeur de l'AUP calculé. Le résultat de cette étude représenté sur la figure 1.21 suivante montre que le couplant SC-2, comparé aux deux autres couplants, offre une meilleure lecture de l'AUP atténuant moins le signal transmis et sans variation dans le temps.

Selon *Gholizadhe* [58], l'air qui a une impédance relativement faible de 0.44 T/s/m^2 , peut dans certains cas faire office de couplant, ce qui permet de faire des essais sur site lorsque la pièce est difficile d'accès.

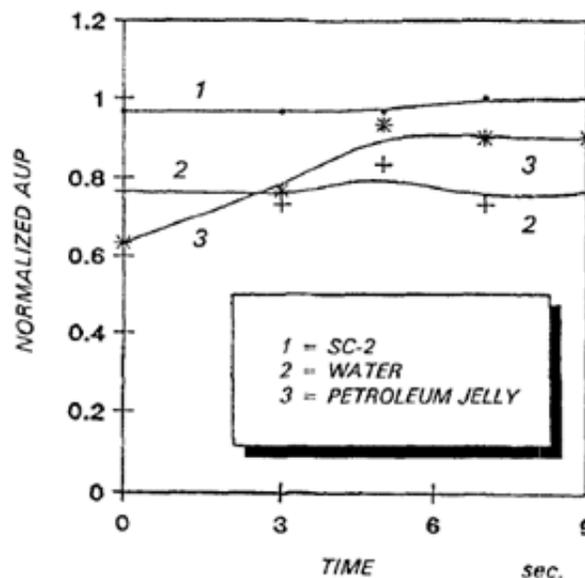


FIGURE 1.21 – Effet du couplant sur l'AUP mesuré dans un même échantillon de polychlorure de vinyle sans défaut non sollicité [102]

La localisation des capteurs sur l'échantillon, leur orientation et la distance entre capteurs émetteur et récepteur sont également des facteurs influençant les mesures. En effet, la distance idéale entre capteurs peut changer d'un matériau à l'autre dépendant de sa microstructure [102].

Par exemple, sur la figure 1.22 présentant les résultats d'une étude faisant la comparaison entre différentes distances inter-capteurs de mesures réalisées sur un même échantillon de polychlorure de vinyle [102], les auteurs ont trouvé une distance optimale de 25.4 mm entre les transducteurs selon l'analyse de l'AUP.

En outre, le choix des capteurs et les consignes d'émission et de réception à renseigner pour chaque mesure doit être identique car pouvant également influencer ces dernières. Dans une

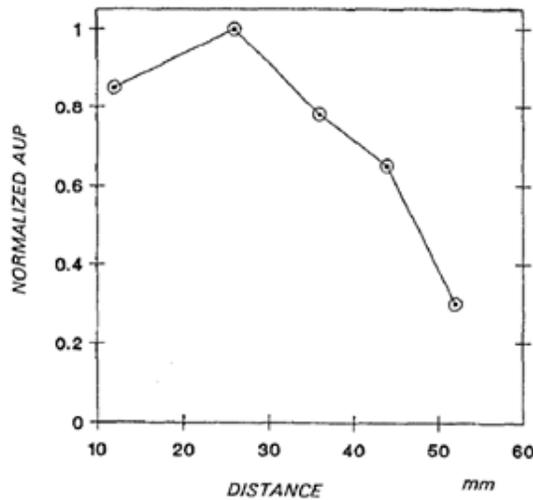


FIGURE 1.22 – Variation du paramètre AUP en fonction de la distance entre capteurs pour un même échantillon de polychlorure de vinyle sans défaut non sollicité [102]

étude de *Brahma et Murthy* [103], les auteurs testent deux configurations de capteurs pour l'évaluation de la qualité de collage d'une bande bimétallique de cuivre-plomb avec pour la première un capteur émetteur US de 2 MHz de fréquence de résonance et un capteur récepteur EA de fréquence centrée sur 375 kHz. La deuxième configuration présentée par les auteurs est une combinaison d'un capteur émetteur US de 1 MHz et d'un capteur récepteur EA de 1 MHz. Les résultats de l'étude semblent confirmer que le choix des capteurs influence les mesures. En effet, les auteurs trouvent un ratio du nombre de coups d'un signal reçu dans un échantillon bien collé et de celui d'un signal reçu dans échantillon mal collé, étant compris entre 1.4 et 1.8 pour la première configuration et étant égale à 6.3 pour la seconde configuration.

1.3.2.4.2 État de l'art sur l'application des AUS

Dans le domaine du génie civil, la technique des acousto-ultrasons (AUS) a fait l'objet d'études pour la détermination du ratio eau/ciment d'un mortier [104] et d'un béton [105]. *Wang et al.* [104] ont établi à travers une analyse paramétrique que les descripteurs qui permettraient de suivre le plus efficacement possible l'évolution du ratio eau/ciment d'un mortier sont l'amplitude et l'énergie absolue. Ainsi, comme on peut le voir sur la figure 1.23, plus le ratio est important, moins le sont les valeurs de ces descripteurs.

La technique des acousto-ultrasons a également été utilisée pour la caractérisation de joints de colle entre plaques minces essentiellement rencontrées dans l'aéronautique ou l'automobile [7] [25] [26] [96] [103] [106] [107].

Kwon et Lee [8] ont étudié la corrélation entre la taille d'un défaut simulé par insertion de Téflon dans un assemblage collé aluminium-composite et les paramètres acousto-ultrasons. Ils ont trouvé que certains paramètres évoluaient en fonction de la taille du défaut; par exemple l'amplitude décroît en fonction de l'augmentation de la fraction de zone défectueuse tandis que le

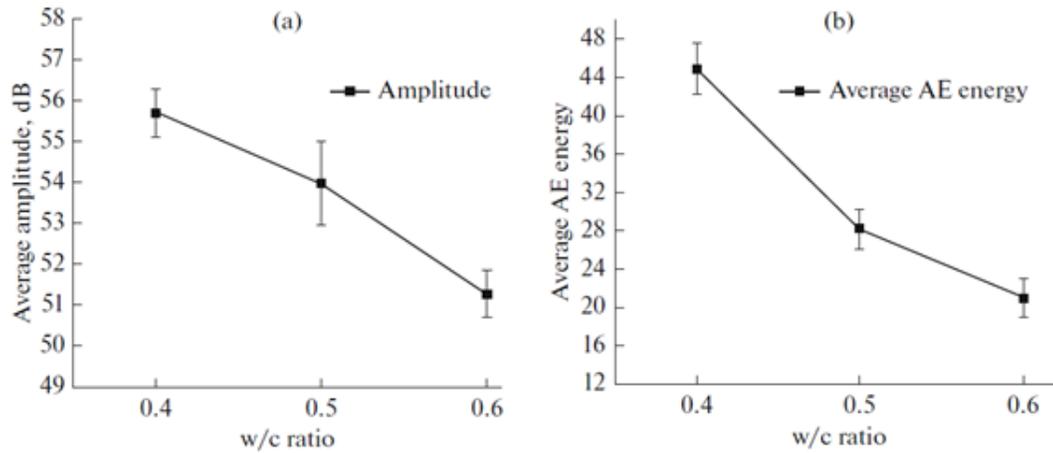


FIGURE 1.23 – Paramètres EA avec différents ratios Eau/ciment d’échantillons de mortier à base de ciment Portland 42.5 cylindriques de 53 mm de diamètre et de 153 mm de longueur : a) Amplitude; b) Énergie moyenne [104]

paramètre AUP2 augmente (figure 1.24). La conclusion importante à retenir de cette étude est que les paramètres acousto-ultrasons sont influencés par la présence de défauts ainsi que leur taille.

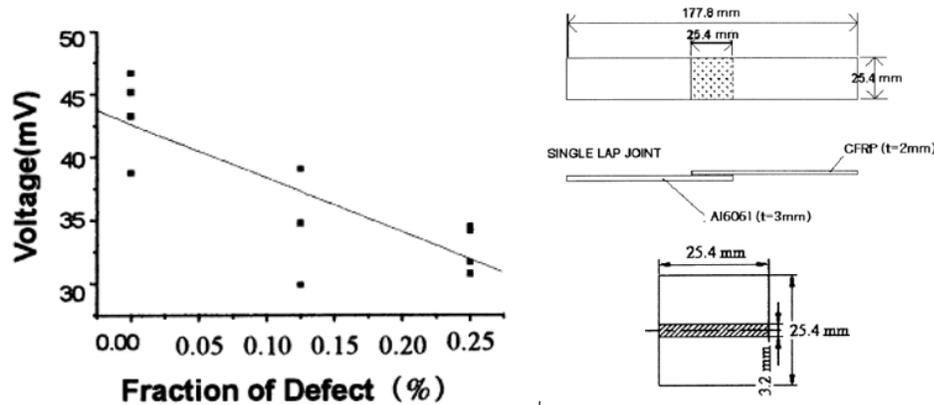


FIGURE 1.24 – Résultat d’une mesure acousto-ultrason de fréquence d’entrée 1 MHz sur un assemblage collé à simple recouvrement entre un composite à fibres de carbone (CFRP) et de l’aluminium (Al6061) : à gauche - Corrélation entre l’amplitude (V) et la taille du défaut, à droite - schéma de la zone de recouvrement avec simulation d’une insertion de Téflon sur 12.5% de la surface [8]

La technique des acousto-ultrasons a fait l’objet de plusieurs études pour l’évaluation non destructive des matériaux composites, notamment pour la détermination de la signature acoustique d’une rupture de fibre de carbone due à un impact [108] ou par traction simple [109]. Williams *et al.* [96] ont évalué l’état d’endommagement d’une corde à l’aide d’une observation du SWF à diverses tensions pour des échantillons de corde non endommagés, âme coupée, âme enlevée et couverture coupée. Ils ont utilisé un capteur émetteur d’une bande fréquentielle allant de 0.1 à 3 MHz et un capteur récepteur d’une fréquence de résonance de 375kHz. Ces capteurs sont placés sur la corde sans couplant avec une pression constante de 24N de part et d’autre du défaut recherché. Les auteurs ont établi une relation entre la présence des endomma-

gements et la variation du SWF. Cette variation était également proportionnée à l'augmentation de la tension exercée sur la corde.

La technique AUS a été éprouvée par *Guo et Cawley* [110] pour détecter des défauts de type délaminage dans un plat composite en utilisant des ondes de Lamb en signaux d'émission par le biais d'un capteur incliné de 27° qui envoie 10 cycles d'impulsion à 0.5 MHz. Les auteurs ont réalisé plusieurs essais par pas de 5 mm sur un plat composite en fibre de carbone afin de détecter une délamination de 10 mm. L'un des principaux résultats de leur étude est que les ondes de Lamb interagissent avec les défauts de type délamination dans leur plaque composite par une excitation du mode A0. Ainsi, la technique AUS peut être utilisée pour détecter des délaminages dans des stratifiés composites bien que les changements produits ne soient détectables de manière fiable que lorsque l'un des capteurs est localisé précisément sur le défaut. Ainsi, pour détecter le défaut avec leur méthodologie, il est nécessaire d'ausculter l'ensemble de la structure à tester, ce qui rend la méthode peu avantageuse pour l'inspection de ce type de défaut.

Vary et Lark [106] ont également utilisé cette technique pour estimer les caractéristiques mécaniques (résistance à la traction et au cisaillement) d'un composite multi-couches (8 plis) avec différentes orientations des fibres sur chaque couche. Ils calculent le SWF propre à chaque éprouvette en gardant toutes les consignes d'émission et de réception constantes de sorte que ce paramètre ne reflète que les variations matérielles des échantillons testés. Avec ce paramètre, les auteurs trouvent une corrélation avec les caractéristiques mécaniques à la rupture de ces composites.

Tanary [7] a étudié la dégradation de la résistance d'un film adhésif FM300 entre deux plaques de composite collées par simple recouvrement et soumises à des efforts de cisaillement. Il a cherché à évaluer une corrélation de cette dégradation avec les paramètres d'AUS. Cette diminution de la résistance de l'adhésif était due à la présence de défauts de type vide, insertion de graisse (défaut d'adhésion) ou de vieillissement de la colle (défaut de cohésion). L'auteur dispose un capteur émetteur de fréquence de résonance 500 kHz au droit du défaut et à 58 mm un récepteur de 375 kHz de fréquence de résonance, tous les deux fixés à l'éprouvette sur du gel qui fait office de couplant. La détection des défauts a été possible grâce à une analyse paramétrique des spectres fréquentiels qui révèlent une apparition de pics dans les plus hautes fréquences en présence d'un défaut d'adhésion (figure 1.25). En outre, l'auteur propose une méthode END par le suivi de l'évolution du paramètre AUP par rapport à la résistance en cisaillement pour chaque échantillon avec défauts et la recherche d'une corrélation entre les deux en cherchant une droite d'ajustement du nuage de points par la méthode des moindres carrés. Ainsi, pour un défaut d'adhésion l'auteur a trouvé une corrélation de 94% entre le paramètre AUP et la résistance au cisaillement, de 88% pour un défaut de type vide et 83% pour un défaut de cohésion. Ces coefficients de corrélation pourraient permettre à partir des valeurs de l'AUP de retrouver les caractéristiques mécaniques des assemblages. Toutefois, il subsiste deux limites à la généralisation de la méthodologie; d'abord les coefficients ne sont applicables que pour des assemblages de matériaux et de géométries identiques, et d'autre part il faudrait d'abord déterminer la na-

ture du défaut pour connaître le facteur de corrélation à utiliser. La méthodologie proposée par l'auteur illustre tout de même le fait que les performances mécaniques des assemblages collés sont potentiellement évaluables par des mesures d'AUS.

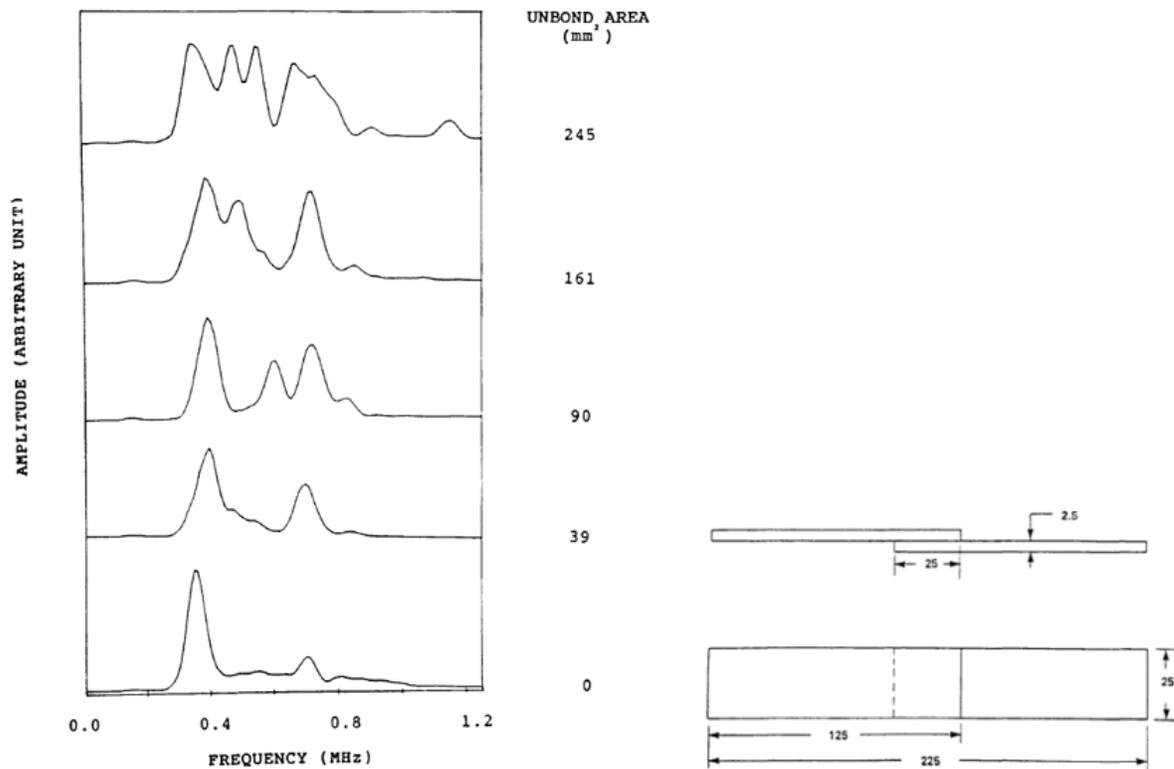


FIGURE 1.25 – À gauche - changement dans le spectre fréquentiel (en MHz) des signaux d'AUS d'un joint collé en fonction de l'augmentation de la surface (en mm²) du défaut, à droite - schéma de l'assemblage de deux composites collés par simple recouvrement avec des défauts d'adhésion simulés par l'insertion de graisse (dimensions en mm). [7]

1.3.3 Modélisation de la méthode des acousto-ultrasons sur des assemblages collés

La simulation est une aide à l'interprétation et à la compréhension de phénomènes physiques. Elle permet en outre d'optimiser les expérimentations.

Dans le cas d'un contrôle non destructif par AUS, modéliser la propagation des ondes dans un assemblage collé nous permettrait de déterminer pour le défaut recherché quels descripteurs du signal sont les plus pertinents à analyser en comparant deux modèles : l'un sain et l'autre avec un défaut simulé.

Dans le cas de l'évaluation des caractéristiques physico-mécaniques, la modélisation permettrait par exemple de remonter au module d'élasticité de l'assemblage, connaissant les paramètres d'AUS, par résolution d'un problème inverse.

1.3.3.1 Modèles matériaux pour un assemblage collé

Plusieurs modèles sont proposés dans la littérature concernant la propagation des ondes élastiques en régime linéaire dans un assemblage collé. Si on se limite aux structures constituées de substrat plan, nous notons deux principales méthodes : les modèles multicouches et les modèles rhéologiques.

Dépendant des caractéristiques de l'assemblage recherché, ces modèles sont divisés en deux sous-groupes :

- Modèles utilisés pour l'étude de la cohésion

Il s'agit du modèle tri-couche (figure 1.26-a) et du modèle rhéologique avec l'adhésif et les interphases modélisés par deux distributions surfaciques de ressorts de raideurs k_L et k_T (figure 1.26-c). Dans ces deux modèles, les défauts d'adhésion sont négligés, l'assemblage est supposé donc avoir une adhésion parfaite entre ces couches.

- Modèles utilisés pour l'étude de l'adhésion

Dans ce cas, on utilise un modèle à 5 couches qui est une équivalence du modèle tri-couches avec insertion de deux couches isotropes minces représentant les interphases entre substrats et adhésif (figure 1.26-b), puis le modèle rhéologique où les interphases sont modélisées par deux distributions surfaciques de ressorts de raideurs k_L et k_T (figure 1.26-d). Dans ces modèles, la

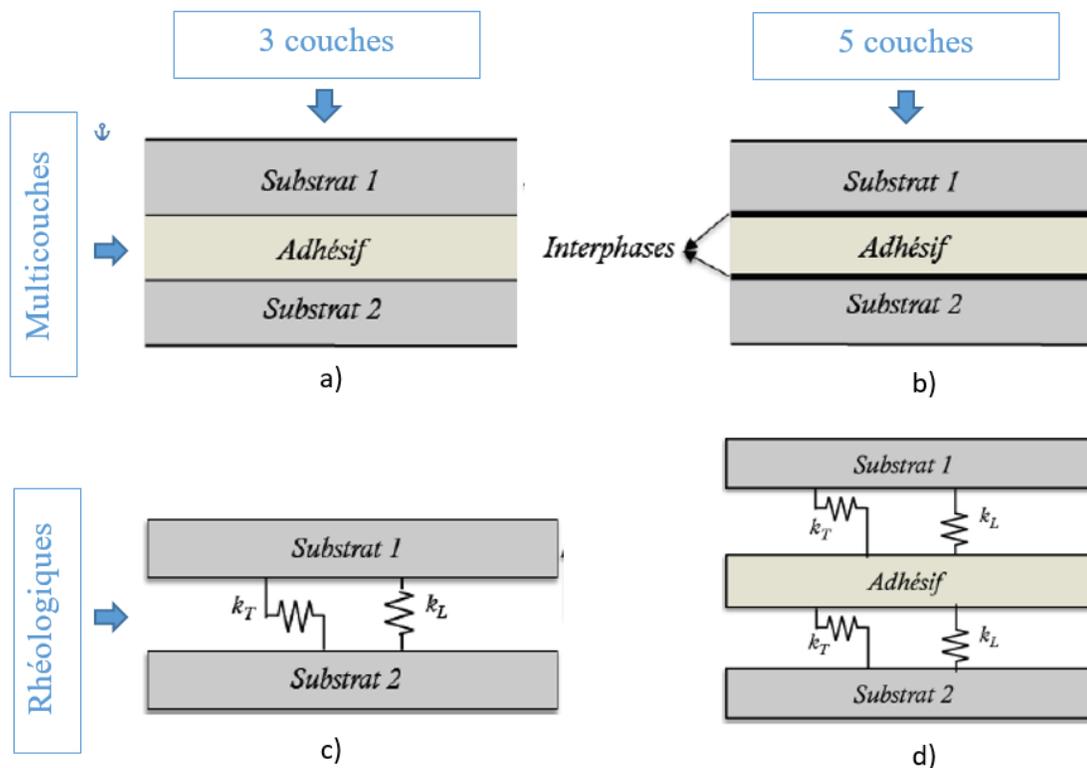


FIGURE 1.26 – Schématisation des modèles : (a) tri-couches, (b) 5 couches, (c) rhéologique pour l'étude de la cohésion sans masse, (d) rhéologique pour l'étude de l'adhésion sans masse.[14]

continuité des déplacements et des contraintes entre les différentes couches est imposée (saut de déplacement autorisé pour les modèles rhéologiques) [14] [111].

1.3.3.2 Modélisation de l'onde élastique

Lorsqu'il s'agit d'évènements acoustique, l'onde élastique interagit avec chaque élément de la chaîne d'acquisition (figure 1.27). Elle est d'abord colorée par la source puis le milieu de propagation où elle peut être atténuée (par diffraction, réflexion, transfert de chaleur etc) et transmise, et enfin elle peut aussi interagir avec le capteur récepteur et le système d'acquisition (couplant, câbles électriques, pré-amplificateur etc.) faisant intervenir tous ces aspects dans la modélisation de sa propagation.

Pour l'application des acousto-ultrasons, la source est générée par l'opérateur de façon plus ou

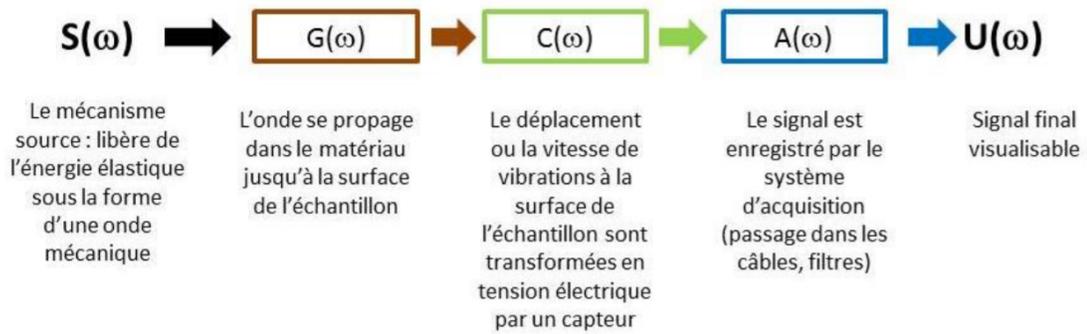


FIGURE 1.27 – Chaîne d'acquisition d'une émission acoustique [112]

moins maîtrisée par des consignes d'émission.

1.3.3.2.1 Modélisation de la source de l'onde

De nombreuses études de la littérature qui se sont penchées sur la modélisation de la source de l'onde élastique concernent la simulation d'endommagements générant un événement d'émission acoustique [113] [114], ou la modélisation en US-ondes de Lamb [115] [116] (Logiciel CIVA). Les études modélisant les acousto-ultrasons sont peu exhaustives.

On note en général deux approches pour simuler les sources d'EA : une modélisation analytique et semi-analytique basée sur la théorie d'élastodynamique [115] et une modélisation par éléments finis par application d'une force analytique explicite qui prend la forme d'un couple de force et de déplacement exercé de manière ponctuelle [117] ou en tenant compte de l'évolution de l'endommagement [118].

Dans une étude de *Diaz et al.* [119], les auteurs ont réalisé la simulation de la propagation des ondes de Lamb dans une plaque de composite de 2 mm d'épaisseur en vue de détecter la présence d'un délaminage au centre de la plaque et de quantifier ces effets sur le signal propagé. Dans cette étude, l'excitation de la plaque à l'aide de patches piézoélectriques (20*5 mm²) a été modélisée avec des moments uniformément répartis de signes opposés appliqués le long de

deux courtes lignes nodales parallèles (largeur du capteur), séparées par une distance équivalente à la longueur du capteur piézoélectrique, comme indiqué avec les lignes en gras sur la figure 1.28. Le signal d'excitation utilisé dans toutes les simulations était une onde sinusoïdale de 20 kHz à 5,5 cycles modulée par une fenêtre de Hanning.

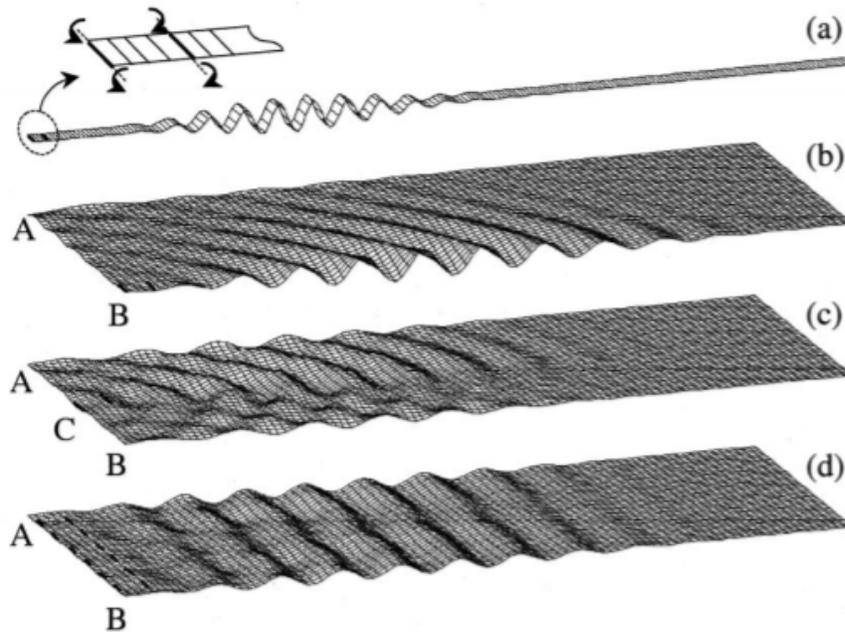


FIGURE 1.28 – La réponse prévue des composites stratifiés de 2 mm d'épaisseur à une charge sinusoïdale appliquée aux emplacements indiqués par des lignes en gras sur chaque maille : (a) extrémité gauche de la plaque; (b) point B; (c) point C; (d) distribution linéaire le long de la frontière AB. [119]

1.3.3.2.2 Modélisation de la propagation de l'onde

L'onde élastique résultant de la vibration générée à la source se propage dans le matériau avant d'atteindre le capteur.

La propagation dans le milieu est essentiellement prise en compte en AUS afin de mettre en avant la signature de la présence du défaut sur l'onde élastique.

La simulation numérique de la propagation de l'onde dans un milieu dépend essentiellement de ses caractéristiques physico-mécaniques (géométrie et loi de comportement) [120] [121] [122] [123]. La méthode des éléments finis (EF) confère un avantage considérable de pouvoir modéliser de manière simple des milieux de propagation complexes. De plus, lorsque le signal d'excitation se propage dans la structure elle s'atténue et subit des réflexions, phénomènes qui sont pris en compte par la méthode EF en dynamique [112].

Les déplacements et les vitesses hors-plan calculés sur la surface du matériau constituent les principales grandeurs d'intérêt dans ces modèles.

Dans ces modèles par EF, le maillage est un point décisif pour avoir des résultats exploitables. En effet, la taille des éléments doit être suffisamment petite pour que la plus petite longueur d'onde étudiée soit représentée correctement, mais juste assez grande pour ne pas avoir des temps de calcul excessifs [124] [125].

La modélisation numérique de la propagation est réalisée par résolution de l'équation fondamentale de la dynamique à chaque nœud appartenant au maillage.

L'atténuation de l'onde est prise en compte dans la propagation par deux méthodes classiques : les modèles rhéologiques de viscoélasticité linéaire (Kelvin-Voigt, Maxwell, etc.) ou le modèle d'atténuation défini par les paramètres de Rayleigh qui suppose que la matrice d'amortissement est une combinaison linéaire de la matrice de masse et de rigidité.

De Luca et al. ont dans leur étude [126] évalué un modèle numérique d'éléments finis (EF) pour prédire la propagation des ondes dans un winglet (aileron d'avion) en composite multicouche à base de fibres de verre. Les auteurs ont par ailleurs conduit des essais expérimentaux pour valider le modèle en réalisant un réseau de 12 pastilles piézoélectriques de 10 mm de diamètre et 0.2 mm d'épaisseur pouvant être émettrices comme réceptrices. Une impulsion sinusoïdale de 4.5 cycles modulée par une fenêtre de Hanning formant une courbe en cloche à bande étroite dans le domaine fréquentiel a été utilisée comme source de l'onde de Lamb sur la pastille centrale (n°5) du réseau. Les excitations à bandes étroites ont été nécessaires pour limiter le problème de la dispersion des ondes de Lamb, fortement dépendant de la fréquence [127]. Comme illustré sur la figure 1.29, un bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux a été obtenu en termes de temps de vol du signal et d'amplitude.

1.3.3.2.3 Modélisation du capteur

Enfin la modélisation du capteur a fait également l'objet de plusieurs études [101] [128] parce qu'il altère à son tour le signal à son émission comme à sa réception, et qu'aucun post-traitement du signal ne peut compenser le mauvais comportement du transducteur [129].

Cette modélisation est d'autant plus importante si l'on désire faire une comparaison des résultats de la simulation avec ceux obtenus expérimentalement. Plusieurs modèles existent dans la littérature pour modéliser le capteur :

- modèle mécanique [129] [130],
- fonction de transfert établie à partir des ondes longitudinale ou à partir des ondes de Rayleigh [131] [132] [133],
- modèle numérique où le capteur est pris en compte par sa géométrie et ses propriétés mécaniques et électriques [101] [134].

Boulay et al. dans leur étude [135] ont modélisé un capteur émetteur par éléments finis, puis l'ont validé de manière expérimentale par l'émission d'une impulsion sinusoïdale modulée par une fenêtre de Hanning avec un capteur d'EA couplé sur une plaque d'aluminium de 3 mm d'épaisseur. La figure 1.30 montre la comparaison faite entre simulation et expérimental des déplacements verticaux d'une particule située à la surface de la plaque à 50 mm du capteur.

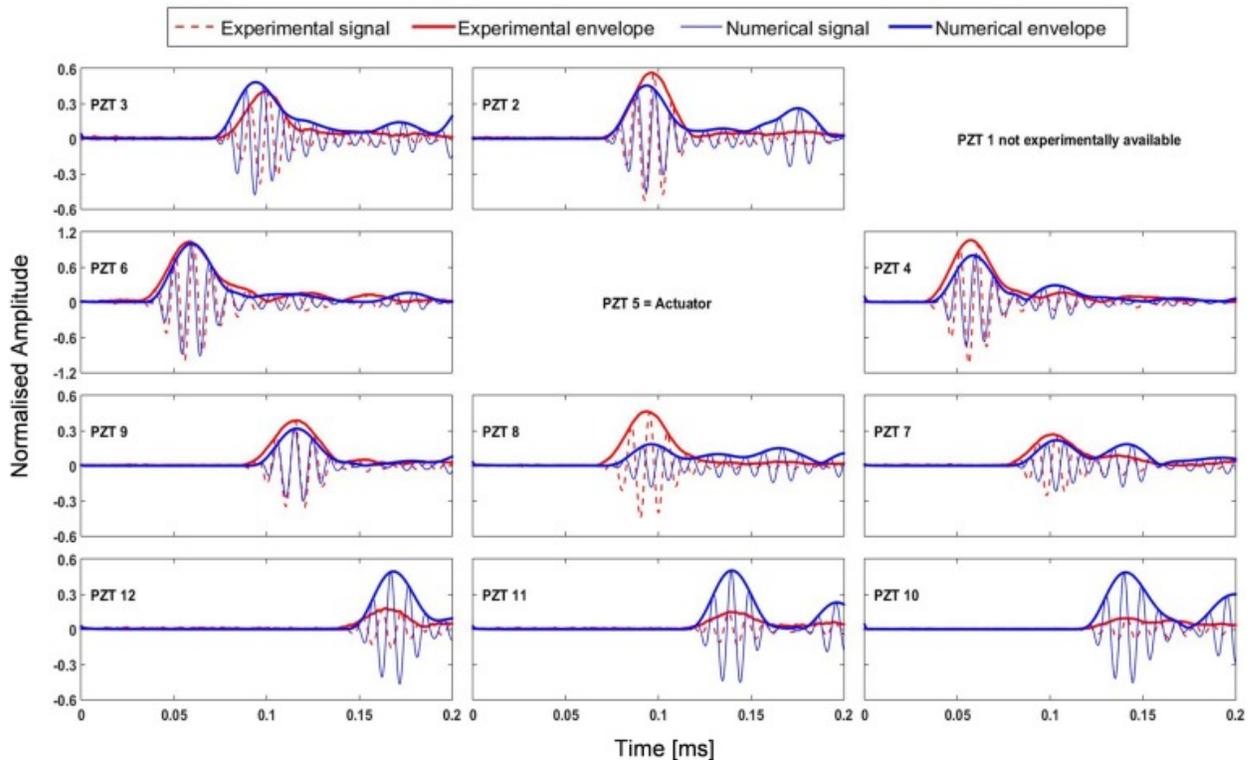


FIGURE 1.29 – Évaluation de la propagation des ondes de Lamb sur un winglet en composite à base de fibres de verre : comparaison des résultats de simulation et expérimentaux pour une consigne d’émission à une fréquence centrée de 100 kHz sur le capteur n°5 [126]

Les auteurs notent dans cette étude une bonne superposition des premiers trains d’ondes entre la simulation et l’expérimental, et un certain manque de précision dans les derniers paquets. L’hypothèse qu’ils émettent pour cette imprécision est une forte dépendance de la sensibilité du capteur à la géométrie de son boîtier.

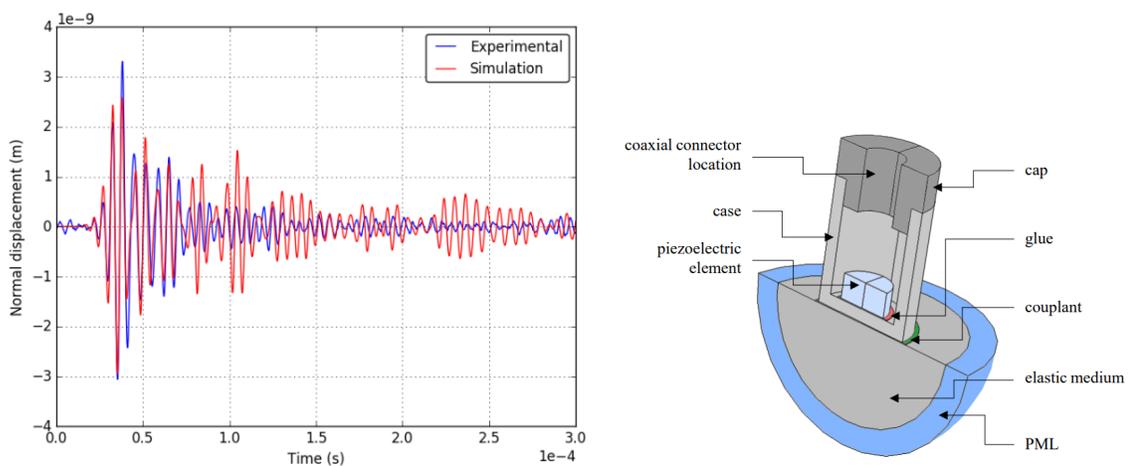


FIGURE 1.30 – Modélisation par EF d’un capteur EA, gauche : courbes simulées (rouges) et mesurées (bleues) de la vitesse normale d’une particule à une distance de 50 mm du centre du capteur, droite : géométrie du capteur modélisé [135]

1.4 Les méthodes d'aide au diagnostic

Le PHM (*Prognostics and health management* en anglais) des matériaux implique à la fois une phase de diagnostic et une phase de pronostic [136] [137]. Les diagnostics sont basés sur la détection et l'identification des défauts et/ou endommagements. Cet aspect est crucial pour la fiabilité de ces structures [138] et pour le succès des pronostics.

Ces méthodes sont basées sur les données mesurées par un réseau de capteurs situés sur la structure afin de déterminer l'état des défauts, puis les stratégies de pronostic peuvent prédire la durée de vie utile restante (RUL : *remaining useful lifetime*) de la structure [139].

Cette procédure comporte plusieurs étapes : 1) détection des défauts 2) localisation des défauts 3) classification et quantification des défauts et 4) pronostic. Par conséquent, la détection et l'identification des défauts qui constituent le sujet principal de notre étude sont des étapes très importantes pour réaliser un PHM.

Pour parvenir à réaliser ces étapes, des méthodes d'aides au diagnostic que nous détaillons dans cette section sont proposées. Ces méthodes vont de la plus simple, une analyse paramétrique, à la plus complexe et robuste, des classifications supervisées et non-supervisées (forêt d'arbres décisionnels et analyse par composantes principales).

1.4.1 Méthode de détection : analyse mono-paramétrique

L'analyse mono-paramétrique est la méthode de traitement la plus simple que nous utiliserons en vue de détecter voir identifier les défauts. Elle consiste en une comparaison des valeurs des descripteurs des signaux reçus pour différents échantillons. C'est la méthode la plus utilisée dans la littérature [7] [25] [102] [107] [96] [109].

Cependant, la méthode repose sur la sélection judicieuse des paramètres ou combinaisons de paramètres les plus pertinents pour discerner un échantillon sain d'un échantillon avec défaut. La modélisation par éléments finis de la technique des AUS peut être un outil utile pour le choix des paramètres dans une analyse mono-paramétrique.

Pour une meilleure visualisation, cette comparaison peut être représentée sous forme d'un diagramme en boîte.

Le diagramme en boîte (ou boîte à moustaches) est une représentation graphique inventée en 1977 par *John Tukey* [140]. Elle permet de visualiser plus facilement la dispersion d'un ensemble de données statistiques en indiquant les positions de ses valeurs descriptives (moyenne, médiane, quartiles, minimum et maximum ou déciles). Elle est constituée d'un rectangle (la boîte) allant du premier quartile au troisième quartile, et coupé par la médiane, d'où sortent deux segments (les moustaches ou clôtures) qui indiquent les valeurs extrêmes (voir figure 1.31).

Les extrémités des clôtures sont calculées en utilisant 1.5 fois l'espace inter-quartile ($IQR = Q_3 - Q_1$). La moustache supérieure ne peut pas être au-dessus de la valeur de $Q_3 + 1.5 * IQR$ et la moustache inférieure ne peut pas être en deçà de la valeur de $Q_1 - 1.5 * IQR$. On peut remarquer avec cette représentation, que 50% des valeurs se trouvent à l'intérieur de la boîte, et

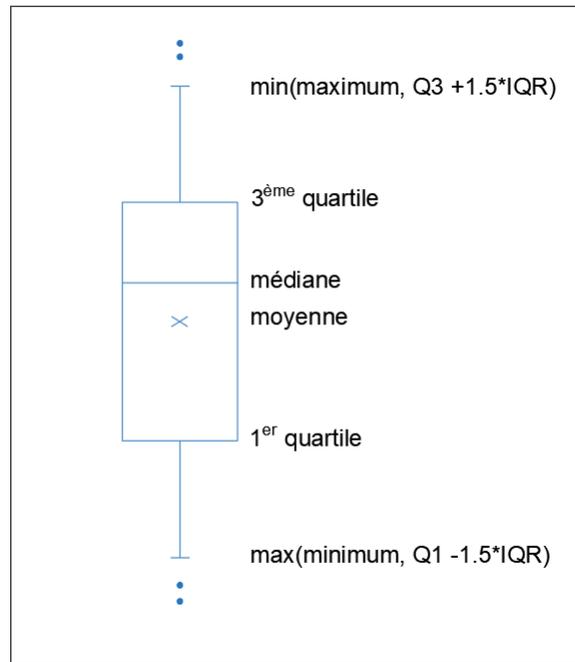


FIGURE 1.31 – Représentation par diagramme en boîte

qu'il peut y avoir des valeurs à l'extérieur des clôtures. Ces valeurs seront représentées par des points dans les diagrammes.

La constante 1.5 couramment utilisée pour définir les clôtures intérieure et extérieure ne fournit à l'utilisateur qu'une idée générale de la mesure dans laquelle une observation pourrait être extrême. Ces observations ne peuvent tout de même pas être systématiquement qualifiées de valeurs aberrantes [141]. Ainsi, ces mesures hors des clôtures feront l'objet d'une vérification plus fine afin d'évaluer leur caractère aberrant. Cette forme de représentation nous permet donc d'effectuer un pré-traitement des signaux, en identifiant et éliminant les signaux aberrants.

1.4.2 Méthodes d'identification supervisée et non supervisée

La classification supervisée a pour objectif principal de définir des règles permettant de répartir des objets dans des classes à partir de variables qualitatives ou quantitatives les caractérisant. On dispose au départ d'un ensemble de données dit d'apprentissage dont le classement est connu (données étiquetées). Ces données sont utilisées pour l'apprentissage des règles de classement. Puis, d'autres jeux de données étiquetées peuvent volontairement être omis dans la construction du modèle, afin de lui servir de données de validation.

En classification non supervisée, les données ne sont pas étiquetées. L'objectif de ce dernier est de proposer une répartition d'un ensemble de n observations suivant K classes en nous basant sur l'évolution des p paramètres qui les décrivent.

1.4.2.1 Classifications non supervisées : K-moyennes

L'algorithme de partitionnement des K-moyennes est une des méthodes de classification non supervisée les plus utilisées dans la littérature. C'est une méthode itérative de partition des données par minimisation de la variance intra-groupe (similarité entre les signaux d'un même groupe) et maximisation de la variance intergroupe (les groupes doivent être très différents). La segmentation des données ou la division en classes (ou cluster) a certes un caractère non supervisé, mais il est quand même nécessaire de préciser le nombre de classes k qu'on désire obtenir au terme du groupement ainsi que la limite des itérations.

L'application de la méthode des k-moyennes suit la procédure suivante :

1. choix du nombre k de classes,
2. initialisation des centres m_k des k classes C_k de façon aléatoire ou en les définissant manuellement,
3. calcul de la distance séparant chaque vecteur X aux centres des k classes,
4. affectation des vecteurs d'entrée X à une des k classes selon le concept de classification de la recherche du minimum de la distance euclidienne :

$$X \in C_j \quad \text{si} \quad \|X - m_j\| < \|X - m_i\| \quad \forall i \in [1, k], \quad i \neq j \quad (1.9)$$

5. évaluation des nouveaux centres des clusters à la fin de cette étape d'itération,
6. si les centres des classes sont stables, alors l'algorithme a convergé et la procédure est terminée; dans le cas contraire, on répète les opérations de 3 à 5.

Pour valider le nombre de classes obtenu, plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature. Sans être exhaustif, nous présentons ci-dessous quelques unes d'entre elles :

- L'index de validité de Dunn [142]

Il est donné par la formule suivante :

$$S_D = \frac{\min_{1 \leq i < j \leq k} d(c_i, c_j)}{\max_{1 \leq l \leq k} d'(c_l)} \quad (1.10)$$

Avec :

- $d(c_i, c_j)$: la distance entre la classe c_i et la classe c_j ,
- $d'(c_l)$: la distance intra-classe,
- et k : le nombre de classes.

L'objectif étant de rendre maximales les distances interclasses, la valeur de k qui rend maximale S_D est le nombre optimal de classes à choisir.

- Index de validité de Davies et Bouldin [143]

Il est fonction du rapport de la somme de la dispersion intra-classes et de la dispersion inter-classes. Sa formule est :

$$S_{DB} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{h \neq i} \left(\frac{e_i + e_h}{d(c_i, c_h)} \right) \quad (1.11)$$

Avec :

- $d(c_i, c_h)$: la distance euclidienne des centres des classes h et i,
- e_i : la distance moyenne des vecteurs d'une même classe au centre de la classe.

La valeur de k optimale est celle qui minimise ce rapport. Il existe d'autres critères de validité (les silhouettes de Rosseeuw, l'indice de Tou, l'indice C, l'indice de Goodman-Kruskal, etc.) qui fonctionnent tous selon le même principe : la meilleure classification est celle qui minimise les distances intra-classes et qui maximise les distances interclasses [144].

1.4.2.2 Analyse par composantes principales

L'analyse par composantes principales (ACP) est une méthode statistique permettant de visualiser un jeu de données contenant des individus décrits par plusieurs variables quantitatives. Cette méthode prend sa source dans un article de Karl Pearson publié en 1901 [145]. Elle permet de réduire de la manière la plus pertinente possible une représentation d'un espace de dimension (n, p) à un espace de dimension (n, q) tel-que q est inférieur à p [146]. Afin de retranscrire le plus fidèlement la réalité, l'ACP va chercher à projeter le nuage de points initial sur les axes en maximisant la dispersion des individus dans le nouveau sous-espace. Rappelons que la dispersion d'une variable quantitative se mesure, en général, par sa variance (ou par son écart-type, racine carrée positive de la variance). Plus généralement, lorsqu'on dispose d'un nuage de points x_i en plusieurs dimensions (p) , on parle d'inertie (somme des variances des variables considérées). En maximisant l'inertie totale projetée (ou inertie expliquée I_{exp}), on reporte le maximum d'information possible du nuage de points.

1.4.2.2.1 Principe de la méthodologie

Le calcul de l'inertie totale projetée passe d'abord par la détermination du centre de gravité g du nuage de points que forment les n individus qui sera pris égal à la moyenne des mesures x_i (équation 1.12).

$$g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.12)$$

L'inertie totale I_g est égale à la somme des variances soit le rapport de la somme des distances des points avec le centre de gravité au carré sur le nombre de points (équation 1.13).

$$I_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(g, x_i) \quad (1.13)$$

Cette inertie totale peut être décomposée en inertie expliquée I_{exp} et inertie résiduelle I_{res} (équation 1.14).

$$I_g = I_{exp} + I_{res} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(g, x'_i) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(x'_i, x_i) \quad (1.14)$$

Afin d'optimiser les critères de proximité et de fidélité des distances, l'axe de projection (H) doit passer par le centre de gravité g , de sorte à maximiser l'inertie expliquée I_{exp} et en minimisant ainsi l'inertie résiduelle I_{res} (figure 1.32). Cet axe porte le vecteur u qui devient la composante principale qui représente au mieux le nuage de points dans ce nouveau sous-espace.

L'objectif de l'ACP consiste à rechercher le vecteur u tel que la projection du nuage des points

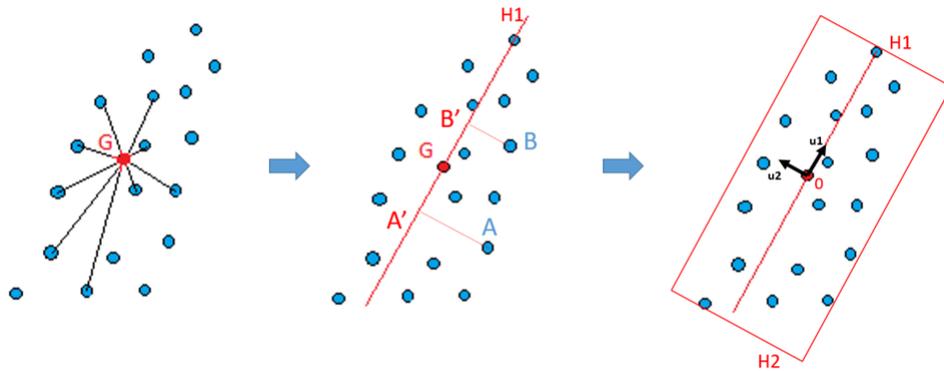


FIGURE 1.32 – ACP : Construction de l'axe de projection

sur ce vecteur ait une variance maximale. La matrice covariance-variance, ici appelée matrice de corrélation C à cause de la réduction, est obtenue à partir de la matrice initiale M de dimension (n, p) par l'équation 1.15.

$$C = \frac{1}{n} \cdot \tilde{M}^T \cdot \tilde{M} \quad (1.15)$$

La projection de l'échantillon des x_i sur u s'écrit selon l'équation 1.16 et sa covariance selon l'équation 1.17.

$$\pi_u(\tilde{M}) = \tilde{M} \cdot u \quad (1.16)$$

$$\pi_u(M)^T \cdot \frac{1}{n} \cdot \pi_u(M) = u^T \cdot \underbrace{M^T \cdot \frac{1}{n} \cdot M}_C \cdot u \quad (1.17)$$

La matrice C est carrée (de taille p), symétrique, et réelle. Elle est donc diagonalisable dans une base orthonormée en vertu du théorème spectral [147]. Le résultat de cette diagonalisation donne une matrice diagonale Δ , dont les valeurs $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)$ classées par ordre décroissant, désignent les valeurs propres ou variances empiriques des axes portés par les composantes principales. L'inertie totale est donnée par la somme des variances, soit la somme des valeurs de la diagonale de Δ .

1.4.2.2.2 Choix du nombre de composantes principales

En règle générale, nous ne perdons aucune information en prenant un espace de projection de même dimension que l'espace initial ($q = p$). Le nombre de composantes principales à conserver dépend fortement de la dimension de l'espace d'entrée. Cependant, la lecture des données reste graphiquement plus difficile dès que q est supérieur à 3, c'est pourquoi l'ACP préconise une restriction du nombre de composantes principales à conserver et donc la dimension du sous-espace même si cela occasionne une perte d'information.

Afin de déterminer au mieux la taille du sous espace à appliquer, il existe plusieurs critères :

- La part d'inertie expliquée :

Elle mesure la qualité globale de la représentation et est obtenue en faisant le rapport de l'inertie expliquée sur l'inertie totale (équation : 1.18).

$$R_q = \frac{\sum_{i=1}^q \lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (1.18)$$

La valeur de q est choisie de sorte que cette part d'inertie expliquée R_q soit supérieure à une valeur seuil fixée a priori par l'utilisateur.

- Le critère du coude :

Sur l'éboulis des valeurs propres (figure 1.33), on recherche un décrochement ("coude") suivi d'une décroissance régulière. Les axes correspondants aux valeurs propres avant le décrochement seront par la suite les seuls à être choisis.

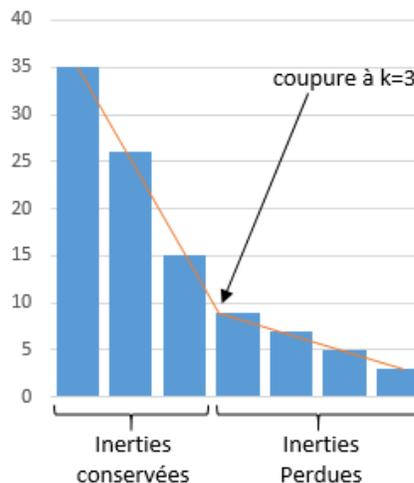


FIGURE 1.33 – ACP : Critère de coude

- La règle de Kaiser :

On considère que si toutes les variables sont indépendantes, les composantes principales sont toutes de variances égales (égales à l'inertie moyenne $\bar{\lambda}$). La règle de Kaiser stipule de ne conserver alors que les valeurs propres supérieures à $\bar{\lambda}$ car seules jugées plus "informatives" que les

variables initiales. Dans le cas d'une ACP réduite, l'inertie moyenne \bar{I} est égale à 1. Dans ce cas, seules les composantes principales dont les valeurs propres sont supérieures à 1 seront conservées.

1.4.2.2.3 État de l'art sur l'application de l'ACP

L'ACP peut être utilisée comme méthode statistique descriptive par une représentation de la répartition des individus suivant deux ou trois axes principaux. Cependant, l'interprétation de ces résultats peut s'avérer complexe [148]. La représentation des poids des variables suivant les axes principaux, le cercle de corrélation, peut être une aide au diagnostic car permettant de mettre en avant la contribution des variables sur ces axes et la corrélation entre elles.

L'ACP est souvent utilisée comme modèle de classification pour diverses applications telles que la maintenance et la production industrielle [149] [150] [151], mais également dans la classification de signaux acoustiques [81] [152] [153] [154] [155] [156] [157].

Long et al. [158] ont utilisé l'ACP pour visualiser, reconstruire et réduire la dimension des données d'images de la qualité des joints de collage en coin de fils d'aluminium réalisés pour la fabrication de dispositifs à semi-conducteurs. Puis, en se servant de machines à vecteurs de support, un ensemble de techniques d'apprentissage supervisé, les auteurs ont pu distinguer les joints de bonne qualité des joints de mauvaise qualité sur le plan de cette ACP formé par les deux premières composantes principales (figure 1.34).

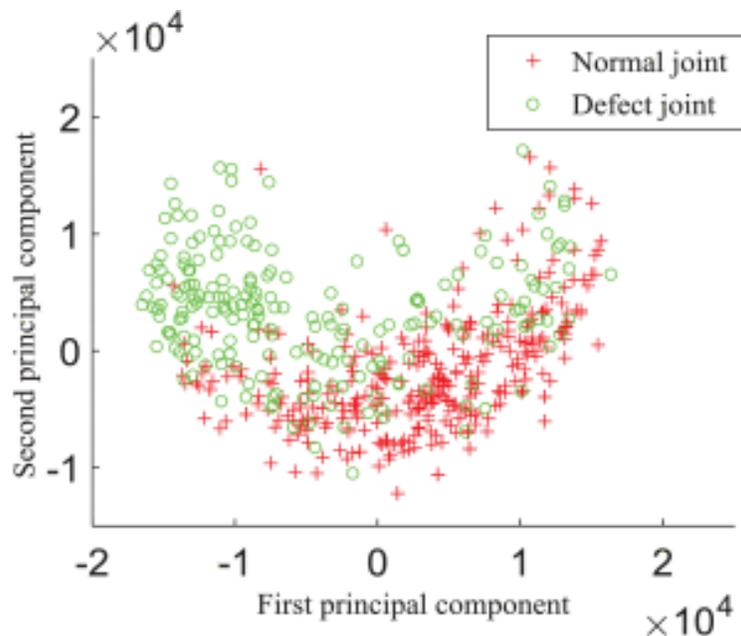


FIGURE 1.34 – Visualisation des premières composantes principales d'une ACP réalisée sur des images de collage en coin d'aluminium. [158]

Dia et al. [156] ont fait usage de cette méthodologie pour classifier les signaux d'EA dus à des endommagements survenant dans un stratifié hybride aluminium/verre lors d'essais de

traction quasi-statiques et de fatigue. En la combinant avec une méthode de classification non supervisée, les k-moyennes, les auteurs ont pu classer différents mécanismes d'endommagement similaires en fonction d'un ensemble de cinq paramètres d'EA, à savoir : la fissuration matricielle et la rupture de fibre, la décohésion et la délamination/décohesion.

Ramadan et al. [155] ont proposé une méthodologie basée sur la combinaison de l'ACP avec l'algorithme des K-moyennes (méthode de classification non supervisée) puis celui des K-plus proches voisins (méthode de classification supervisée) pour identifier les trois étapes d'endommagement par corrosion d'un toron utilisé dans des ouvrages de béton pré-contraints. Ces trois étapes sont le déclenchement de la fissuration, sa propagation et la rupture du toron. Les auteurs ont pu obtenir cette classification présentée sur le plan formé des deux premières composantes principale de l'ACP (figure 1.35) par l'application de l'algorithme des k-moyennes, puis ils ont trouvé un taux d'erreur de 2.27% lorsqu'il ont vérifié la classification par l'algorithme des k-plus proches voisins.

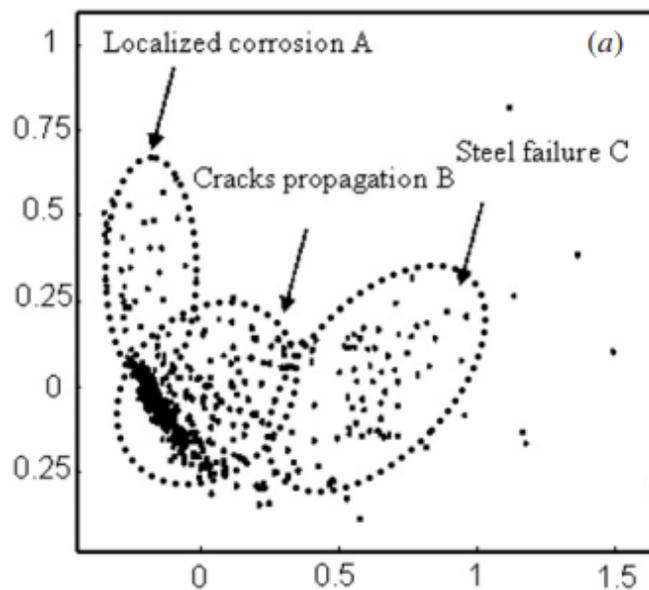


FIGURE 1.35 – Visualisation des premières composantes principales d'une ACP réalisée sur des signaux issus d'essais de fissurations par corrosion sous tension d'un câble en acier utilisé dans des structures en béton pré-contraint. [155]

Ces études montrent que l'ACP est un outil très utile lorsqu'on a plusieurs variables qui décrivent un même événement comme c'est le cas pour un signal acoustique. Elles utilisent pour la plupart l'ACP comme moyen de visualisation, et l'accompagnent souvent de techniques de classification supervisées ou non supervisées.

1.4.2.3 Classification supervisée : forêt d'arbres décisionnels

La forêt d'arbres décisionnels est une classification supervisée qui nécessite la création d'une bibliothèque par apprentissage à partir de données étiquetées. Cette méthode de classification

utilise la construction des arbres de décision à partir de données étiquetées. Pour ce faire, une partie des données est utilisée pour réaliser l'apprentissage du modèle, une autre pour le tester.

1.4.2.3.1 Les arbres de décision

Un arbre de décision est un outil d'aide à la décision dont la paternité est attribuée à Morgan et Sonquist [159], représentant un ensemble de choix sous la forme graphique d'un arbre. Aux extrémités des branches, nous avons les différentes décisions possibles ("feuilles") qui sont atteintes en fonction de décisions prises à chaque étape ("nœud") (figure 1.36).

L'apogée de l'utilisation des arbres de décision en statistique comme modèle prédictif est at-

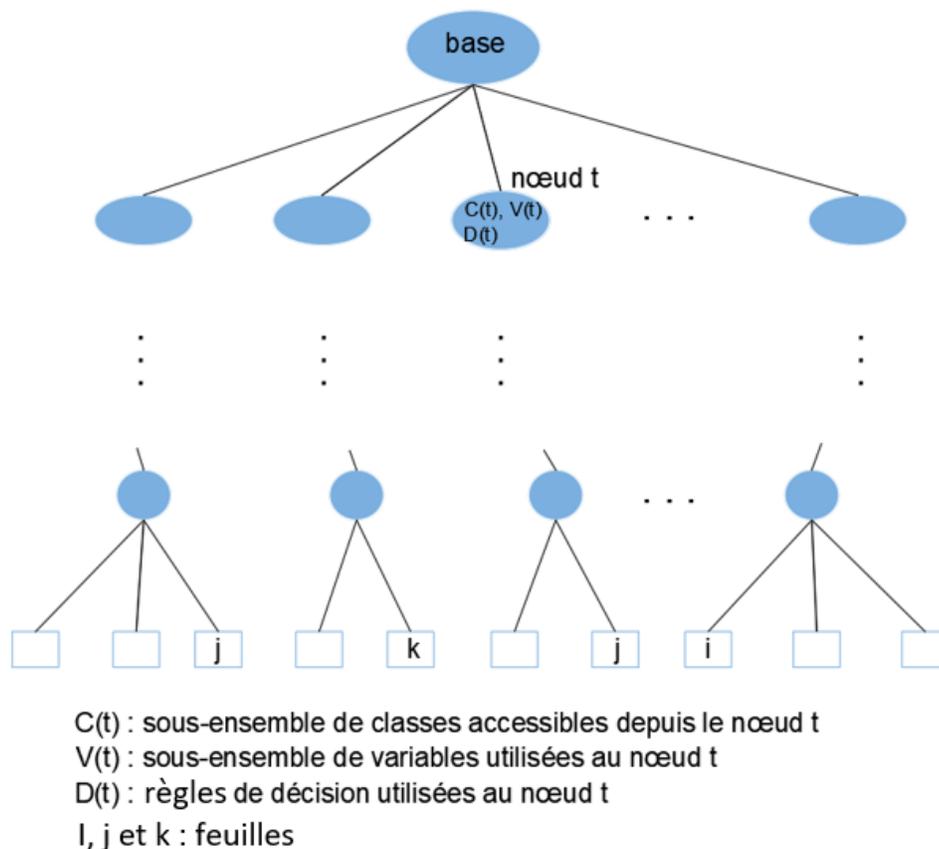


FIGURE 1.36 – Exemple d'arbre de décision

teinte avec le développement de l'algorithme CART (*Classification and Regression Tree*) par Breiman et al. [160] en 1984 qui fait encore référence aujourd'hui. CART est un algorithme d'apprentissage par arbre de décision consistant à construire depuis un ensemble de données de dimension (n, p) un arbre où chaque nœud interne décrit un test sur une (ou des) variable (s) d'apprentissage. Chaque branche représente un résultat du test, et chaque feuille contient la valeur de la variable cible (une étiquette de classe pour les arbres de classification, une valeur numérique pour les arbres de régression). Cet algorithme propose pour la classification, la génération d'un arbre de décision binaire (un nœud ne peut avoir que deux branches) avec comme

critère de segmentation, l'indice de diversité de Gini.

Le critère de segmentation permet d'effectuer le choix le plus pertinent d'une ou de plusieurs variables parmi les p variables d'entrée qui permettrait de réaliser le meilleur partage des n observations d'entrée sur chaque noeud. Le choix porte également sur le seuil à considérer pour chaque variable, afin de partager les observations en deux sous-ensemble distincts. L'indice de diversité de Gini mesure la fréquence à laquelle une observation est mal classée si son étiquette est choisie de manière aléatoire parmi les étiquettes du sous-ensemble. Il est égal à la somme des probabilités qu'une observation soit choisie multipliée par les probabilités qu'elle soit mal classée. Le choix des variables à utiliser pour la segmentation doit se faire en minimisant l'indice de Gini qui représente le taux d'erreur de classification sur une variable donnée pour un seuil donné. I_G prend sa valeur minimale (zéro) lorsque toutes les observations du sous-ensemble sont dans une même classe de la variable-cible.

D'après Breiman *et al.* [160], la détermination de la taille optimale d'un arbre de décision permettrait d'avoir une idée plus précise sur sa performance. En effet, plus l'arbre est grand, plus il aura tendance à s'ajuster aux données d'apprentissage, et sera ainsi plus difficile à extrapoler pour de nouvelles données. Ce phénomène appelé "sur-apprentissage" est un problème classique de l'apprentissage automatique (*machine learning*) et de la fouille de données (*data mining*). Pour répondre à cette problématique, des solutions sont proposées tel que le pré-élagage qui consiste à stopper la construction de l'arbre en fixant des critères d'arrêt, ou le post-élagage (c'est le cas pour l'algorithme CART) qui consiste à réduire l'arbre après qu'il ait atteint sa taille maximale. Des techniques plus récentes appelées "méthodes d'ensemble", consistant à créer plusieurs arbres de décision avec les mêmes données permettent une amélioration des performances de la classification. La forêt d'arbres décisionnels est l'une de ces techniques [161].

1.4.2.3.2 Principe de fonctionnement de la méthode

L'algorithme de classification par forêt d'arbres décisionnels permet de générer par apprentissage un ensemble d'arbres décisionnels (par l'algorithme CART) et de recueillir leurs votes pour la classe la plus pertinente correspondant aux données testées (figure 1.37). Chaque arbre est entraîné à partir d'un échantillonnage parmi les données d'apprentissage. Cet échantillonnage se fait de manière aléatoire pour chaque arbre en utilisant deux techniques :

- D'abord, un procédé appelé *Bagging* ou technique de *bootstrap* en statistique qui consiste à effectuer un tirage avec remise d'un nombre n d'observations parmi les données d'origine de dimensions (n, p) ,
- Ensuite, une sélection aléatoire des $2/3$ des variables p ("*in-bag*" data), que l'on garde pour l'apprentissage de l'arbre. Le tiers restant des données ("*Out of bag*" data) sera utilisé pour évaluer le taux d'erreur de l'arbre correspondant.

La construction des arbres dans l'algorithme de classification par forêt d'arbres décisionnels ne s'arrête que lorsque toutes les étiquettes sont portées par les feuilles. Lorsque cette méthode est appliquée à la classification de signaux acoustiques, la construction de l'arbre s'arrêtera lorsque

tous les signaux seront classés par type d'échantillon [88]. Un dépouillement des votes effectués par les arbres sera réalisé après chaque test, à l'issue duquel une décision pourra être prise sur la classe d'appartenance du signal.

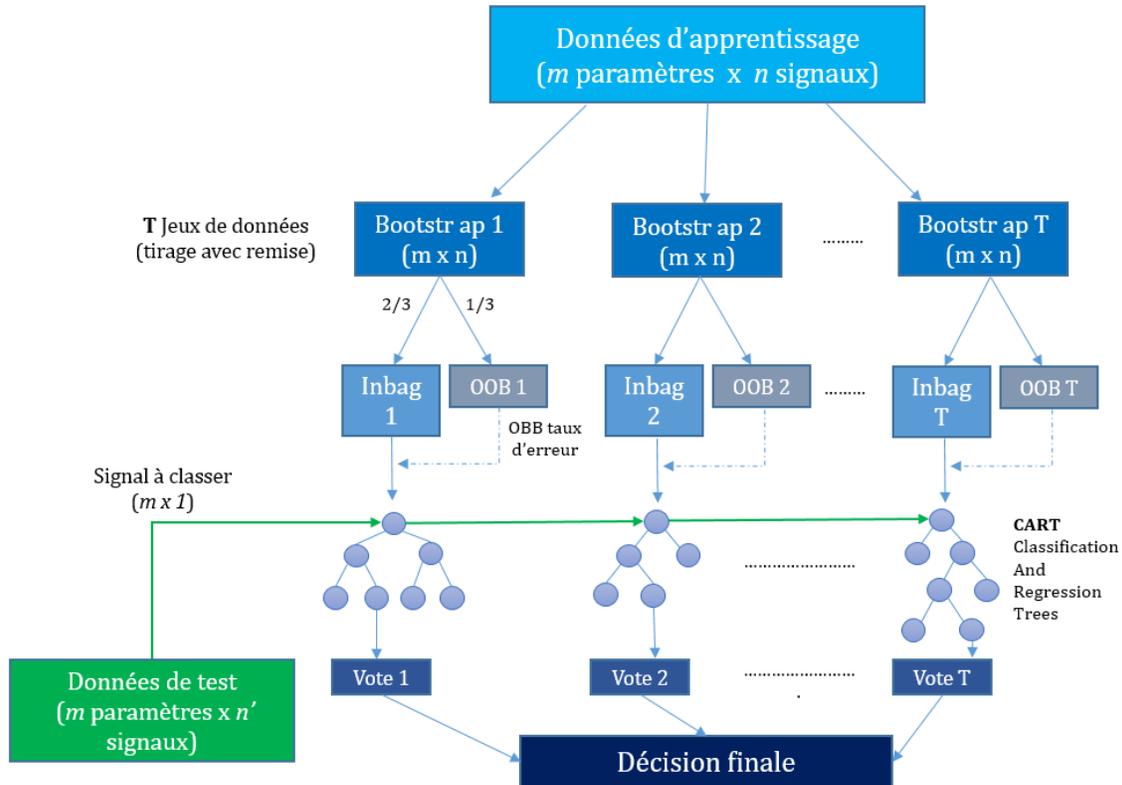


FIGURE 1.37 – Fonctionnement de l’algorithme de classification par forêt d’arbres décisionnels [88]

1.4.2.3.3 État de l’art de l’application de la méthode de classification par forêt d’arbres décisionnels

Cette méthode de classification a fait l’objet de plusieurs applications dans la classification de signaux acoustiques [88] [162] [163] [164] [165].

Wang et al.[162] l’ont appliqué lors du suivi par émission acoustique des ruptures de fils suivant différentes directions de coupe dans un composite à fibres naturelles avec différentes orientation de fibres. Les auteurs, grâce à l’algorithme de la forêt d’arbres décisionnels ont réussi avec une précision d’environ 95% à distinguer diverses orientations de fibres en fonction des directions de coupe qui sont liées à des mécanismes de coupe distincts.

Morizet et al. [88] ont proposé une méthodologie centrée sur l’utilisation de la classification par forêt d’arbres décisionnels dans l’optique de la détection de la corrosion caverneuse. Leur méthodologie inclut la prise en compte d’un potentiel bruit environnant et propose également un outil d’évaluation de la robustesse de la classification appelé ACM (*alter-class matrix*) permettant de déterminer la sensibilité de cet algorithme de la forêt d’arbres décisionnels par rapport

aux k-plus proches voisins en fonction du pourcentage de signaux mal labélisés dans la bibliothèque. Les auteurs ont appliqué la méthodologie à des données mesurées sur site et ont obtenu des classifications avec des taux de reconnaissance allant jusqu'à 98.3%. Leurs résultats montrent que cette approche est très efficace sur la base des données réelles et leur travail a abouti au développement d'un logiciel appelé RF-CAM pour la classification de signal acoustique avec l'algorithme de la forêt d'arbres décisionnels.

1.5 Bilan et position du travail de thèse

L'auscultation des assemblages collés a fait l'objet de plusieurs études avec plusieurs méthodes END/CND telles que la thermographie IR (TIR) [46], les méthodes optiques (holographie et shearographie) [57], la radiographie (RX R γ) [63], l'émission acoustique (EA) [93] ou les ultrasons (US) [75]. Nous avons vu dans ce chapitre que la plupart des méthodes proposées comportaient des limites en terme de profondeur d'inspection (TIR, RX), de rendement sur site (shearographie), de capacité de détection des défauts d'adhésion et de cohésion (TIR, radiographie méthodes optique), etc.

Les méthodes non destructives à base d'ondes ultrasonores et notamment les acousto-ultrasons (AUS) offrent de bonnes potentialités quant à l'établissement d'un facteur de corrélation entre la propagation des ondes mécaniques dans les assemblages collés et leur caractéristiques physiques (épaisseur de colle, longueur de recouvrement) ou mécaniques (modules de Young, coefficient de Poisson, résistance ultime) [8] [7]. Les méthodologies de diagnostic (détection, localisation et identification) de ces assemblages que les auteurs proposent dans leur études montrent de très bons résultats pour la détection des défauts grossiers de type vide.

Cependant, les géométries rencontrées dans ces études sont différentes de celles des assemblages classiques du génie civil.

Dans ce travail de thèse, nous évaluerons la capacité de la méthode acousto-ultrasons à détecter et identifier la plupart des types de défauts rencontrés dans les joints collés pour l'application visée notamment les défauts d'adhésion dont la détection reste un enjeu. L'objectif est de proposer une méthodologie fiable et répétable en vue de poser les bases pour une application sur site.

L'innovation de cette méthodologie résulte de l'étude de différentes configurations et paramètres de test tels que le type de capteur, leur nombre et leur emplacement, la géométrie des assemblages et les techniques de diagnostic utilisées pour le post-traitement des données. Nous nous appuyons également de manière non exhaustive sur des travaux de modélisation de la propagation de l'onde ultrasonore dans un assemblage pour mieux appréhender son interaction avec un défaut.

CHAPITRE 2

MATÉRIAUX ET MÉTHODES

« La démarche scientifique n'utilise pas le verbe croire; la science se contente de proposer des modèles explicatifs provisoires de la réalité; et elle est prête à les modifier dès qu'une information nouvelle apporte une contradiction »

Albert Jacquard

Sommaire

2.1	Introduction	64
2.2	Assemblages étudiés	65
2.2.1	Choix du procédé de collage (adhérents et adhésif)	65
2.2.1.1	Assemblages collés acier-composite	65
2.2.1.2	Assemblages collés béton-composite	66
2.2.1.3	Protocole de mise en œuvre du collage	67
2.2.2	Simulation des défauts étudiés	68
2.2.2.1	Choix et simulations des défauts	68
2.2.2.2	Échantillon avec un seul défaut	69
2.2.2.3	Échantillons avec plusieurs défauts	70
2.3	Protocole de mesures pour les acousto-ultrasons	73
2.3.1	Système ultrasons	73
2.3.1.1	Choix du couplant	73
2.3.1.2	Configuration de l'émission des signaux	76
2.3.1.3	Configuration de la réception des signaux	78
2.3.1.4	Choix des capteurs Piézoélectriques	79
2.3.2	Protocole de mesure retenu	82
2.3.3	Évaluation de la distance maximale d'investigation sur les assemblages BC-Po	83
2.4	Évaluation de l'impact de différents facteurs pouvant influencer la répétabilité des mesures	84
2.4.1	Effet de la variation de la température ambiante sur les mesures	84

2.4.2	Effet de la variation du degré de polymérisation de l'adhésif sur les mesures d'AUS	85
2.5	Exploitation des mesures	87
2.5.1	Traitement du signal et détermination des descripteurs	87
2.5.1.1	Descripteurs calculés via AEWIn	88
2.5.1.2	Descripteurs calculés via COSMOS	88
2.5.2	Calculs des coefficients de corrélation dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel	90
2.5.3	Analyse mono-paramétrique : exploitation des diagrammes en boîte	92
2.5.4	Analyse multi-paramétrique : Analyse par composantes principales (ACP)	92
2.5.5	Classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels	93
2.5.6	Modélisation par élément finis de la technique des acousto-ultrasons	94
2.5.6.1	Modélisation des éprouvettes	94
2.5.6.2	Modélisation de la source et de la propagation de l'onde	96
2.5.6.3	Modélisation des capteurs	97
2.6	Conclusion	99

2.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les ouvrages du génie civil peuvent être renforcés par collage de matériaux composites pour répondre à de nouvelles sollicitations non prises en compte lors de la conception, réparer leurs endommagements ou tout simplement prolonger leur durée de vie. En effet, le renforcement par matériaux composite est plus facile à mettre en place et moins coûteux qu'une solution de démolition et de reconstruction. Nous avons également vu que ces solutions de renforcement sont d'autant plus efficaces s'il n'y a pas de défaut dans le joint de colle, d'où l'intérêt de mettre en place une méthodologie de diagnostic des différents types de défauts rencontrés dans ces assemblages. Les techniques de contrôle non destructif actuellement utilisées sur site et en développement comportent toujours des verrous quant à la détection de toutes les typologies de défauts, notamment les défauts de type *kissing-bond*.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une méthodologie basée sur l'utilisation de la technique des acousto-ultrasons que nous appliquerons à des assemblages typiques du génie civil. Dans ce chapitre, nous allons présenter les échantillons étudiés, en passant en revue les matériaux utilisés pour leur élaboration, leurs géométries ainsi que celles des défauts qui y sont implémentés. Les deux matériaux sur lesquels nous allons conduire la réalisation des éprouvettes sont l'acier et le béton, qui sont les matériaux les plus utilisés dans les ouvrages du génie civil.

Ensuite, nous décrirons la méthode des acousto-ultrasons utilisée pour réaliser l'auscultation non destructive de ces éprouvettes. Les différents composants d'un système de mesure par acousto-ultrasons seront décrits, ainsi que les essais préliminaires qui nous ont permis d'effectuer un choix optimal de ces composants. Le protocole de mesure qui sera ensuite appliqué lors de nos campagnes sur nos corps d'épreuve sera détaillé dans ce chapitre.

Nous déclinons les différents outils de traitement des signaux qui ont été utilisés pour analyser et interpréter les résultats des mesures en vue d'une détection et d'une identification de l'ensemble des défauts présents dans les assemblages.

Enfin, les différentes configurations considérées pour la modélisation par éléments finis de la technique des acousto-ultrasons appliquée aux assemblages collés seront fournies, avant de terminer par une conclusion.

2.2 Assemblages étudiés

2.2.1 Choix du procédé de collage (adhérents et adhésif)

Le renforcement des ouvrages du génie civil par collage structural se fait par le biais d'un "procédé" qui est un tandem renfort-adhésif accompagné d'une procédure de mise en oeuvre à respecter scrupuleusement.

Le procédé le plus utilisé et qui offre de meilleures performances est le renforcement par lamelles en matériaux composite à fibres de carbone collées avec de la résine époxy [27]. Nous appliquons ce procédé sur des substrats acier et béton qui sont les matériaux les plus rencontrés en génie civil.

2.2.1.1 Assemblages collés acier-composite

2.2.1.1.1 Mono-plaques : AC-1P

Une première série d'éprouvettes a été réalisée à partir d'un acier de construction sur lequel nous collons un renfort composite. Ce premier groupe d'éprouvettes que nous nommerons par la suite "AC-1P" (assemblages collés Acier-Composite Mono-Plaque) a été utilisé pour optimiser le protocole de mesures ainsi que les outils de traitement du signal adéquats pour une détection et une identification fiables des différents défauts qu'on peut rencontrer dans un joint de colle pour ce type d'assemblage. Les assemblages AC-1P sont constitués de plaques d'acier de nuance S235 sur lesquelles sont collées des plaques de composite FLT M514 (figure 2.1). Ce composite est un pultrudé unidirectionnel à fibres de carbone T800S noyées dans une matrice à base de résine époxy (le taux de fibres est de 60%). Les caractéristiques des composants de ce type d'assemblage sont répertoriées dans le tableau 2.1.

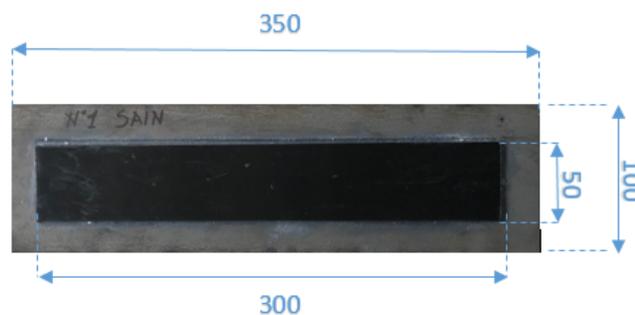


FIGURE 2.1 – Assemblage collé acier-composite mono-plaque (AC-1P) : dimensions en mm

2.2.1.1.2 Multi-plaques : AC-3P

La deuxième catégorie d'assemblages collés acier-composite que nous nommerons "AC-3P" est constituée de plaques d'acier sur lesquelles nous avons collé simultanément trois plaques de

composite côte à côte (figure 2.2). L'objectif de cette catégorie d'éprouvettes est d'étudier l'influence d'une telle disposition sur la propagation de l'onde acoustique dans chaque plaque de composite. Ces assemblages sont faits d'acier de construction de nuance S355 sur lesquels des plats de composites FOREVA LFC sont collés. Ces composites sont des pultrudés unidirectionnels à fibres de carbone T700SC noyées dans une matrice époxy. Le volume des fibres constitue 65% de ce composite. Les caractéristiques physiques et mécaniques des différents composants de ces éprouvettes sont également renseignées dans le tableau 2.1.

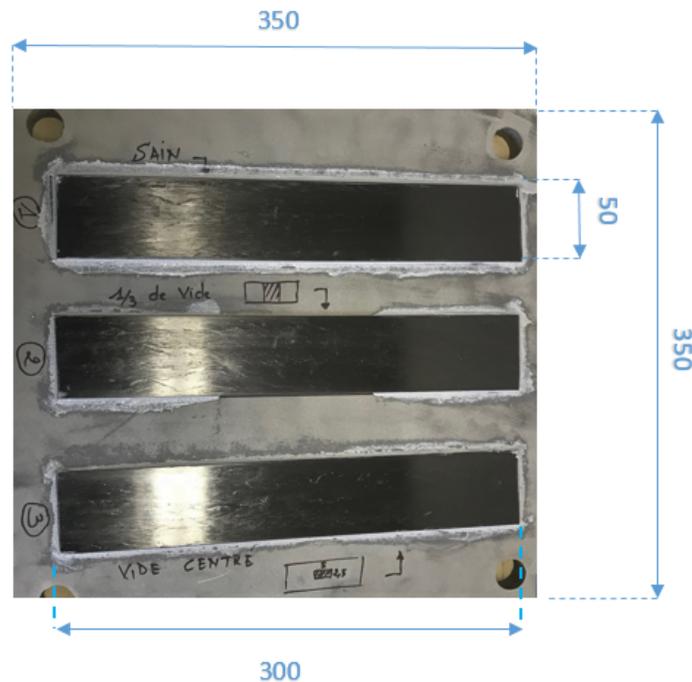


FIGURE 2.2 – Assemblage collé acier-composite multi-plaques (AC-3P) : dimensions en mm

2.2.1.2 Assemblages collés béton-composite

2.2.1.2.1 Dallettes : BC-Da

De même que pour les assemblages AC-1P, un premier lot d'assemblages béton-composite nommés "BC-Da" a été confectionné pour évaluer la mise au point du protocole de mesure optimal et d'outils de traitement adéquats pour la détection et l'identification fiables des défauts pour ce type d'assemblage. Les assemblages BC-Da sont constitués de dallettes de béton de classe C25/30 sur lesquelles nous avons collé des plaques de composite unidirectionnel COMPODEX C12 (figure 2.3). Ce composite est fabriqué en usine par pultrusion en noyant des fibres de carbone dans une matrice en résine époxy à un pourcentage volumique de 70%. Dans le tableau 2.1, nous regroupons pour les composants de ce type d'assemblage leurs dimensions et leurs caractéristiques mécaniques.

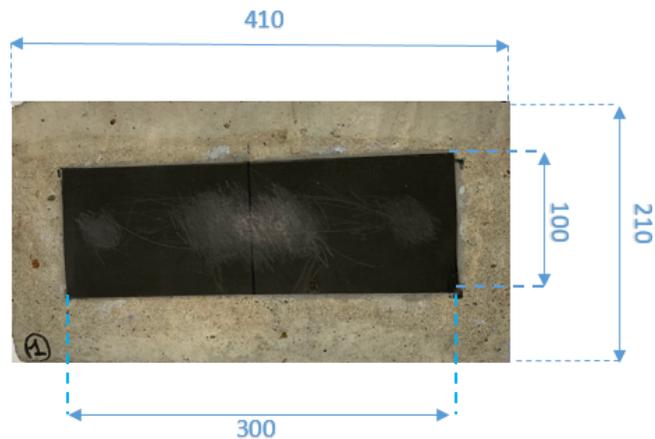


FIGURE 2.3 – Assemblage collé béton-composite dalle (BC-Da) : dimensions en mm

2.2.1.2.2 Poutres : BC-Po

L'étude réalisée sur le deuxième lot d'assemblage béton-composite qui a pour nomenclature "BC-Po" a pour objectif d'éprouver les limites de la méthodologie développée quant à la distance d'auscultation possible, et l'impact de la présence de plusieurs défauts sur une même éprouvette. À cet effet, nous avons utilisé des poutres en béton armé C35/45 sur lesquelles nous avons collé des plaques de composite FLFT S512 (figure 2.4) pour constituer ces assemblages BC-Po. Ce composite est un pultrudé unidirectionnel à fibres de carbone T700 et à matrice époxy avec un pourcentage volumique de fibre de 60%. Les dimensions des plaques, des poutres ainsi que leurs caractéristiques mécaniques, sont répertoriées dans le tableau 2.1.



FIGURE 2.4 – Assemblages collés béton-composite poutre : BC-Po

2.2.1.3 Protocole de mise en œuvre du collage

Les éprouvettes ont été réalisées selon les recommandations de l'AFGC [11]. Nous avons ainsi réalisé des préparations de surface différentes pour nos trois types de substrats :

Échantillons	Matériaux	Dimensions (mm^3)	E_{LT} (GPa)	σ_{LT} (MPa)
AC-1P	Plaque d'acier S235	350*100*5	210	235
	Composite FLT M514	300*50*1.4	200	2900
AC-3P	Plaque d'acier S355	350*350*20	210	355
	Composite Foreva LFC	300*50*1.4	210	3000
BC-Da	Dalette béton C25/30	410*210*110	31.5	2.6
	Composite COMPODEX 12	300*100*1.4	160	2800
BC-Po	Poutre béton armé C35/45	3400*200*200	34.1	3.2
	Composite FLT S512	3000*50*1.2	160	2800

E_{LT} : Module de Young dans le sens longitudinal

σ_{LT} : Contrainte à la rupture en traction dans le sens longitudinal

TABLEAU 2.1 – Caractéristiques physiques et mécaniques des composants des assemblages collés

- les dalles et poutres en béton ont été soigneusement poncées afin d'éliminer la couche de laitance superficielle puis nettoyées par aspiration,
- les plaques de composites ont été nettoyées à l'acétone après avoir subi une légère abrasion de la surface à coller,
- et les plaques d'acier ont été sablées pour enlever une éventuelle couche de corrosion, avant d'être nettoyées à l'acétone.

L'adhésif utilisé dans tous les assemblages est une résine époxy bi-composant polymérisant à froid (Sikadur 30). Le mélange de résine et de durcisseur a été réalisé selon les proportions massiques prescrites par le fournisseur à savoir, 75% de résine et 25% de durcisseur.

L'adhésif ainsi constitué est répandu sur le substrat acier ou béton en fonction du défaut simulé. C'est ainsi que des défauts maîtrisés ont été incorporés dans chaque type d'échantillon en nous basant sur l'observation faite sur les différentes typologies de défauts rencontrés dans les assemblages collés du génie civil.

la plaque composite est ensuite appliquée sur le substrat pré-enduite d'adhésif puis une pression y est appliquée à l'aide d'un rouleau maroufleur.

À l'issue du collage, un temps de polymérisation de la résine époxy d'au moins 72 heures est respecté avant d'entamer des mesures sur les éprouvettes. Une étude préliminaire portant sur l'évolution du taux de réticulation nous a permis de valider cette durée (en section 2.4.2).

Les épaisseurs des joints de colle ont été déterminées à l'aide d'un pied à coulisse en faisant la moyenne de six mesures prise de part et d'autre sur les longueurs des plaques de composite.

2.2.2 Simulation des défauts étudiés

2.2.2.1 Choix et simulations des défauts

Les défauts susceptibles d'être rencontrés dans un joint de colle sont en général de trois types. Nous pouvons être en présence de défauts de type vide ou porosité, de défauts de type

mauvaise adhérence ou "kissing bond", et de défauts de type faible force de cohésion [14] [12] [7] [28] [29].

Les vides ont été réalisés dans les assemblages par une absence de matière sur toute l'épaisseur du joint de colle, avec des dimensions différentes selon le type d'assemblage. La présence de ce défaut est ensuite vérifiée après le durcissement de l'adhésif par sondage au maillet, une méthode CND utilisée sur site pour détecter des vides d'une certaine taille (voir 1.2.3.2).

Les défauts d'adhésion ont été élaborés par l'addition d'une fine couche de graisse à l'interface composite-adhésif. Cette couche fait office de polluant liquide qui, d'après la littérature [166] est plus représentatif de ce type de défaut qu'un contaminant solide tel que le Téflon (polytétrafluoroéthylène PTFE). L'épaisseur de ce type de défaut est faible, seule la surface sera mentionnée.

Pour matérialiser les défauts de type faible force de cohésion, une substitution d'une partie de la résine époxy est effectuée par de la colle polyuréthane plus souple, sur toute l'épaisseur du joint de colle. Dans le cas des assemblages collés acier-composite, nous avons utilisé une colle polyuréthane bi-composant polymérisant à froid Axson Sika A252. Le mélange a été réalisé avec les proportions volumiques de 50% de Polyol et de 50% d'Isocyanate nous procurant un produit de module élastique longitudinal de 8 MPa (selon la fiche technique du fournisseur). Ce type de défaut a été réalisé dans les assemblages collés béton-composite avec un mastic polyuréthane mono-composant Sikaflex PRO-15FC d'un module élastique de 0.4 MPa (selon la fiche technique du fournisseur).

Dans nos assemblages qui ont servi au développement de la méthodologie (AC-1P et BC-Da), nous avons matérialisé un défaut unique sur chaque éprouvette, tandis que plusieurs défauts sont insérés dans un même échantillon pour les éprouvettes de tailles plus conséquentes (AC-3P et BC-Po).

2.2.2.2 Échantillon avec un seul défaut

Les assemblages AC-1P et BC-Da ont servi pour l'optimisation de la méthodologie proposée dans ce travail de thèse. Nous avons réalisé pour chacun de ces types d'assemblages, cinq échantillons pour représenter tous les types de défauts rencontrés dans un assemblage collé du génie civil :

- des échantillons sains dit "type- α " ne contenant pas de défaut maîtrisé constituant ainsi nos échantillons de référence,
- des échantillons "type- β " avec deux tailles de vides; des "type- β 1" étant des vides centrés et entourés de résine époxy (figure 2.5-a), et des "type- β 2" étant des vides ouverts couvrant le tiers de la surface collée (figure 2.5-b),
- des échantillons "type- γ " avec de la colle polyuréthane incorporée sur 1/3 de surface du joint de manière centrée,
- et des échantillons "type- δ " avec une fine couche de graisse incorporée sur 1/3 de surface du joint à l'interface composite-adhésif.

Les défauts ont été centrés sur les éprouvettes comme illustré sur la figure 2.5. Les dimensions des défauts ainsi que les épaisseurs de colle de ces différents échantillons sont répertoriées dans le tableau 2.2.

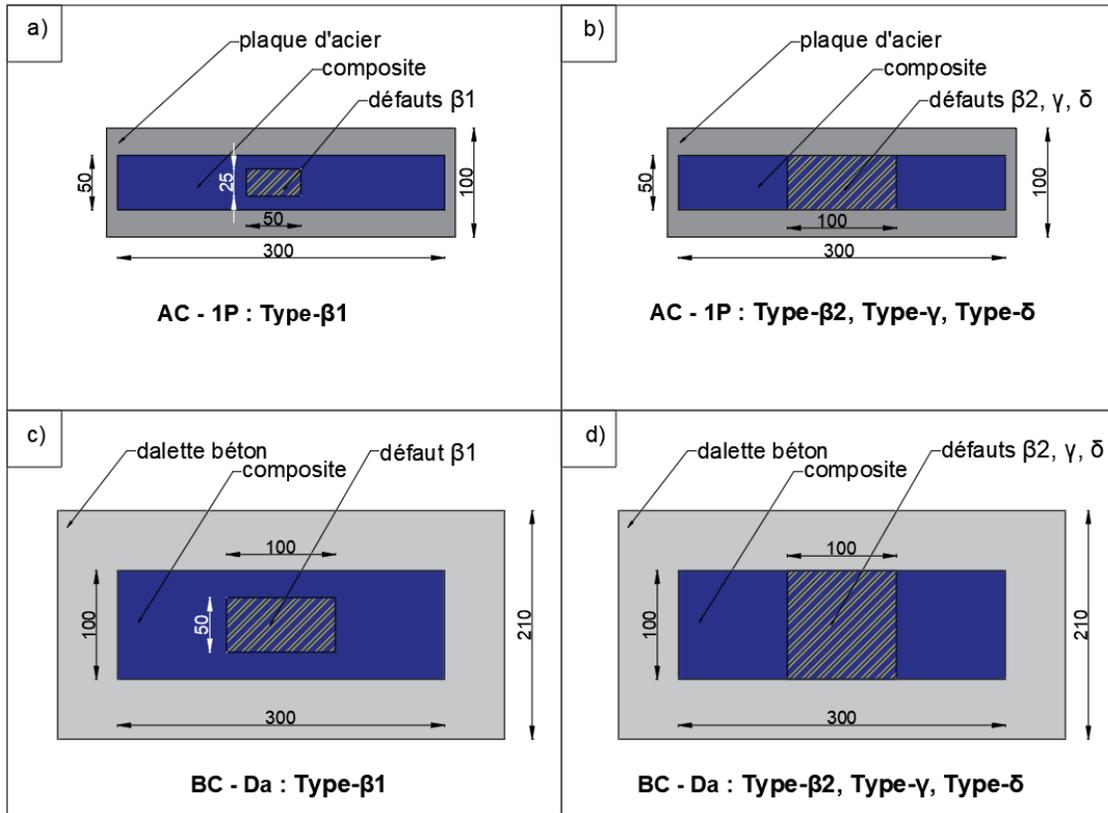


FIGURE 2.5 – Positions et tailles des défauts dans les assemblages AC-1P et BC-Da : a) et c) défauts fermés, b) et d) défauts ouverts

2.2.2.3 Échantillons avec plusieurs défauts

2.2.2.3.1 Assemblages acier-composite multi-plaques

Les assemblages AC-3P ont été réalisés dans le but de déterminer l'influence de la présence d'une plaque composite voisine sur la capacité de détecter ou d'identifier un défaut.

À cet effet, nous avons collé sur des plaques d'acier carrées trois plaques de composite côte à côte. Sur la première plaque d'acier (PAc1), nous avons un assemblage collé sain (type- α 1), disposé à côté de deux assemblages contenant des vides de tailles différentes (défauts type- β 1 et type- β 2). Sur la deuxième plaque d'acier (PAc2) nous avons un autre assemblage sain (type- α 2) avec un assemblage collé présentant une partie de la résine époxy substituée par de la colle polyuréthane (défaut type- γ) et un autre contenant de la graisse à l'interface composite-adhésif (défaut type- δ). La troisième plaque d'acier (PAc3) ne contient qu'un assemblage sain (type- α 3)

Assemblages	Nomenclature	Dimensions des défauts	Épaisseur de colle (mm)
AC-1P	T- α : Sain	-	0.32
	T- β 1 : vide centré	50*25*0.44 mm^3	0.44
	T- β 2 : 1/3 vide	100*50*0.23 mm^3	0.23
	T- γ : PU	100*50*0.67 mm^3	0.41
	T- δ : graisse	100*50 mm^2	0.58
BC-Da	T- α : Sain	-	1.12
	T- β 1 : vide centré	100*50*1.25 mm^3	1.25
	T- β 2 : 1/3 vide	100*100*1.7 mm^3	1.7
	T- γ : PU	100*100*1.86 mm^3	1.86
	T- δ : graisse	100*100 mm^2	1.81

TABLEAU 2.2 – Caractéristiques des défauts pour les échantillons AC-1P et BC-Da

et sert de plaque témoin. Les défauts sont centrés tels qu'illustré sur la figure 2.6. Les caractéristiques de ces assemblages sont répertoriées dans le tableau 2.3.

2.2.2.3.2 Assemblages collés béton-composite sur poutres

Les assemblages BC-Po, sur poutres en béton armé ont été réalisés dans le but d'évaluer la méthodologie déjà mise en place pour la détection et l'identification des défauts dans ce type d'assemblage (BC-Da). L'évaluation passe par la détermination des limites de la méthode en termes de distance auscultable et d'influence de la présence de plusieurs types de défauts dans un même joint de colle.

À cet effet, nous avons élaboré trois assemblages collés avec une combinaison de deux défauts par éprouvette en assurant toujours une zone saine de préférence au milieu de la poutre tel qu'illustré sur la figure 2.7.

Les épaisseurs des colles réalisées varient entre 0.9 et 1 mm, et les autres caractéristiques de ces éprouvettes sont détaillées dans le tableau 2.4.

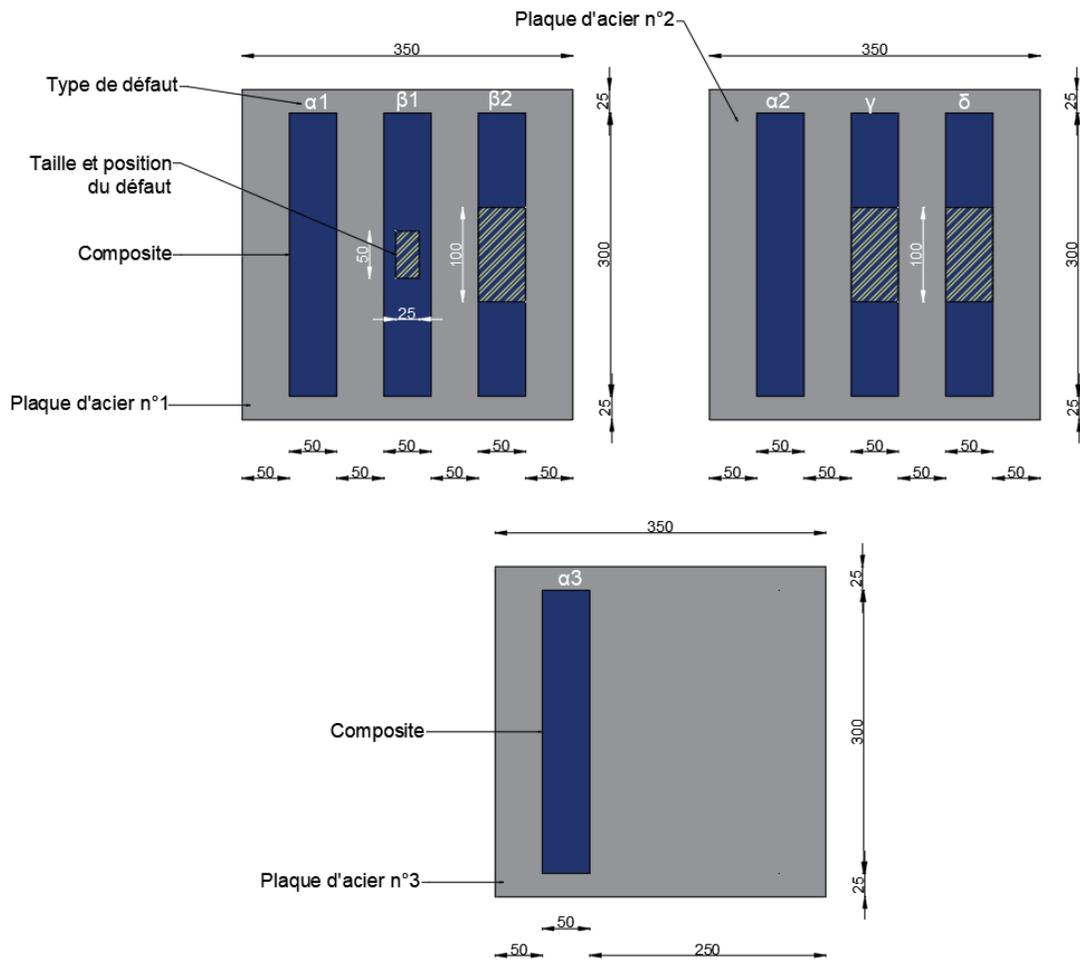


FIGURE 2.6 – Positions et tailles des défauts dans les assemblages AC-3P (dimensions en mm)

	Nomenclature	Dimensions des défauts	Épaisseur de colle (mm)
AC-3P : Acier n°1	T- α_1 : Sain	-	0.54
	T- β_1 : vide centré	$50*25*0.86 \text{ mm}^3$	0.86
	T- β_2 : 1/3 vide	$100*50*0.6 \text{ mm}^3$	0.6
AC-3P : Acier n°2	T- α_2 : Sain	-	0.92
	T- γ : PU	$300*100*0.83 \text{ mm}^3$	0.83
	T- δ : 1/3 graisse	$50*25 \text{ mm}^2$	1.09
AC-3P : Acier n°3	T- α_3 : Sain	-	0.25
	-	-	-
	-	-	-

TABLEAU 2.3 – Caractéristiques des défauts pour les assemblages A-C multi-plaques

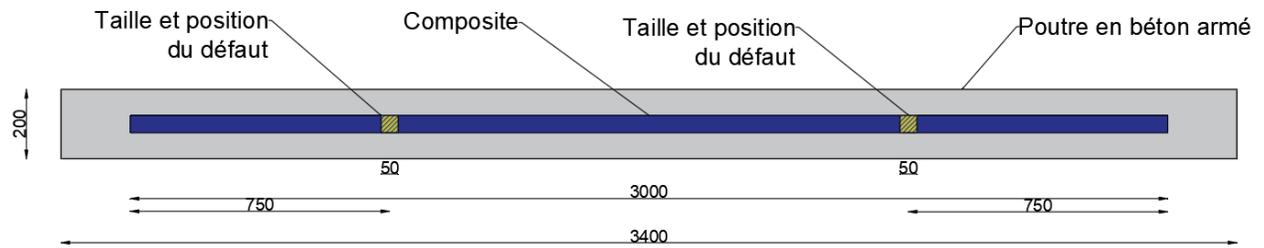


FIGURE 2.7 – Positions et tailles des défauts dans les assemblages BC-Po (dimensions en mm)

	Type-β : Vide	Type-γ : défaut de cohésion	Type-δ : défaut d'adhésion	Épaisseur de colle (mm)
Poutre n°1	50*50*0.94 mm ³	50*500.94 mm ³	-	0.94
Poutre n°2	-	50*50*0.9 mm ³	50*50 mm ²	0.9
Poutre n°3	50*50*1 mm ³	-	50*50 mm ²	1

TABLEAU 2.4 – Dimensions des défauts pour les assemblages BC-Po

2.3 Protocole de mesures pour les acousto-ultrasons

2.3.1 Système ultrasons

Le système utilisé lors des investigations expérimentales est produit et commercialisé par *Mistras Group SA*. Il est accompagné de ses propres logiciels d'exploitation pour l'émission et l'acquisition des signaux. L'ensemble des composants sont représentés sur la figure 2.8 qui comprend ainsi :

- un capteur émetteur piézoélectrique relié à une carte émettrice, carte ARB,
- deux capteurs récepteurs piézoélectriques reliés à la carte réceptrice (système d'EA, PCI2) via deux pré-amplificateurs,
- et un ordinateur permettant le pilotage, l'émission puis l'acquisition et le stockage des signaux.

2.3.1.1 Choix du couplant

Le choix du couplant utilisé pour fixer les capteurs piézoélectriques sur l'échantillon a fait l'objet d'une étude préliminaire que nous détaillons dans cette partie. Cette étude est réalisée pour deux types de couplant :

- du phényle salicylate (C₁₃H₁₀O₃), un composé cristallin à bas point de fusion (40°C) qui se solidifie à température ambiante,
- de la graisse silicone, un couplant visqueux.

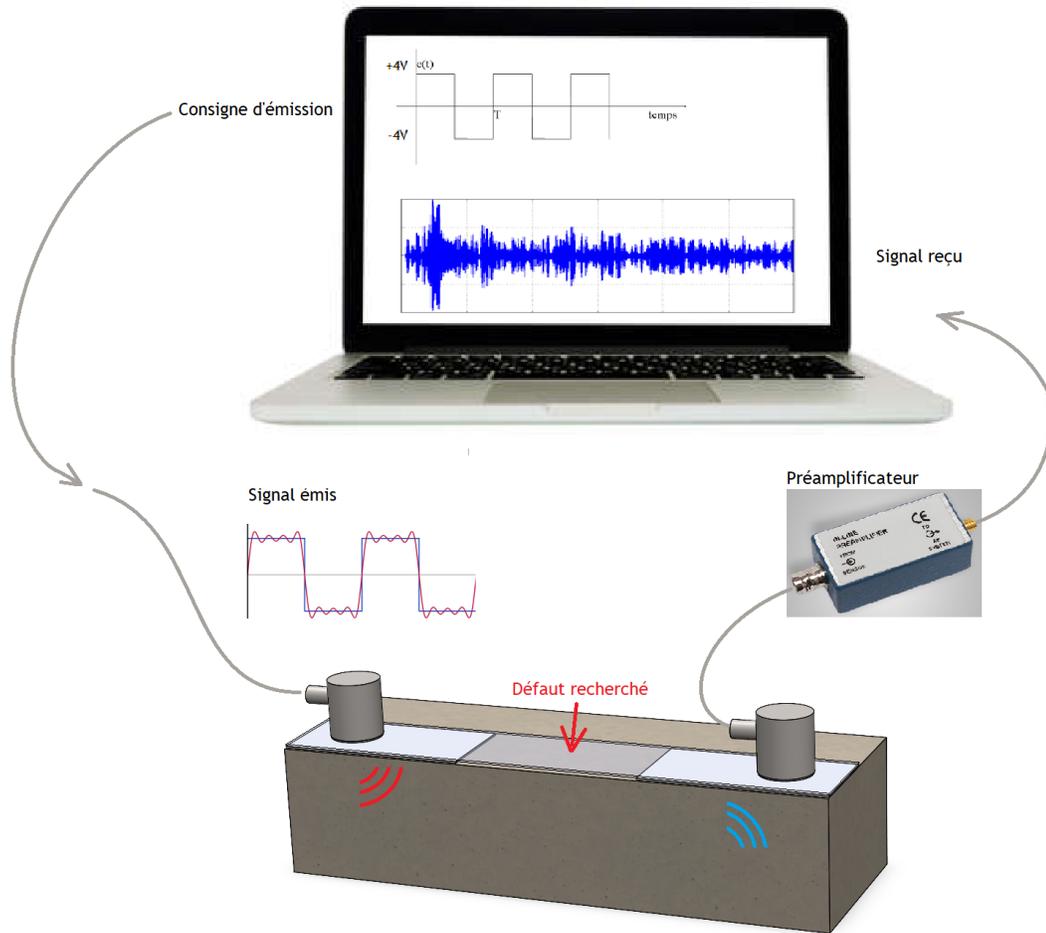


FIGURE 2.8 – Dispositif expérimental de mesures par acousto-ultrasons

Pour assurer la fixation du capteur sur l'échantillon dans le cas de l'application de la graisse, nous utilisons des bandes élastiques en caoutchouc.

Comme illustré sur la figure 2.9, nous adoptons deux dispositions de capteur afin d'évaluer le signal réellement transmis ainsi que celui qui se propage dans l'assemblage sur une courte distance. Ainsi nous utilisons, selon la configuration d'essai, deux capteurs SH10 l'un émetteur et l'autre récepteur, en face à face (FF), ou bien en côte à côte (CC) sur l'assemblage sain BC-Da à 10 mm d'intervalle.

La consigne du signal émis lors des essais est un signal carré à 1 cycle de 100 kHz et d'amplitude égale à 0.01 V dans les configurations FF et de 0.05 V dans les configurations CC. Les paramètres d'individualisation de salves ont été obtenus de manière empirique avec des essais de cassé de mines [92]. Pour toutes les configurations, nous avons opté pour un seuil de 45 dB avec les paramètres PDT, HDT et HLT de valeurs respectivement égales à 70 μ s, 200 μ s et 300 μ s. Les résultats de cette investigation sont mis en évidence par la visualisation des signaux reçus sur chaque configuration présentés sur la figure 2.10 pour le domaine temporel, et la figure 2.11 pour le domaine fréquentiel.

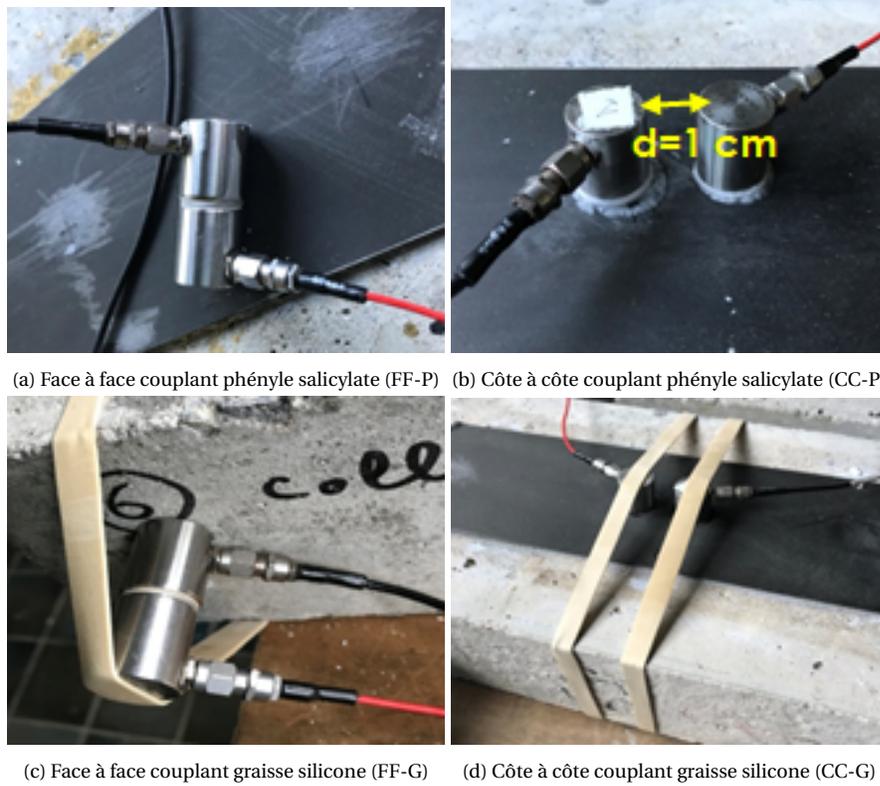


FIGURE 2.9 – Dispositions d'essais pour le choix du couplant

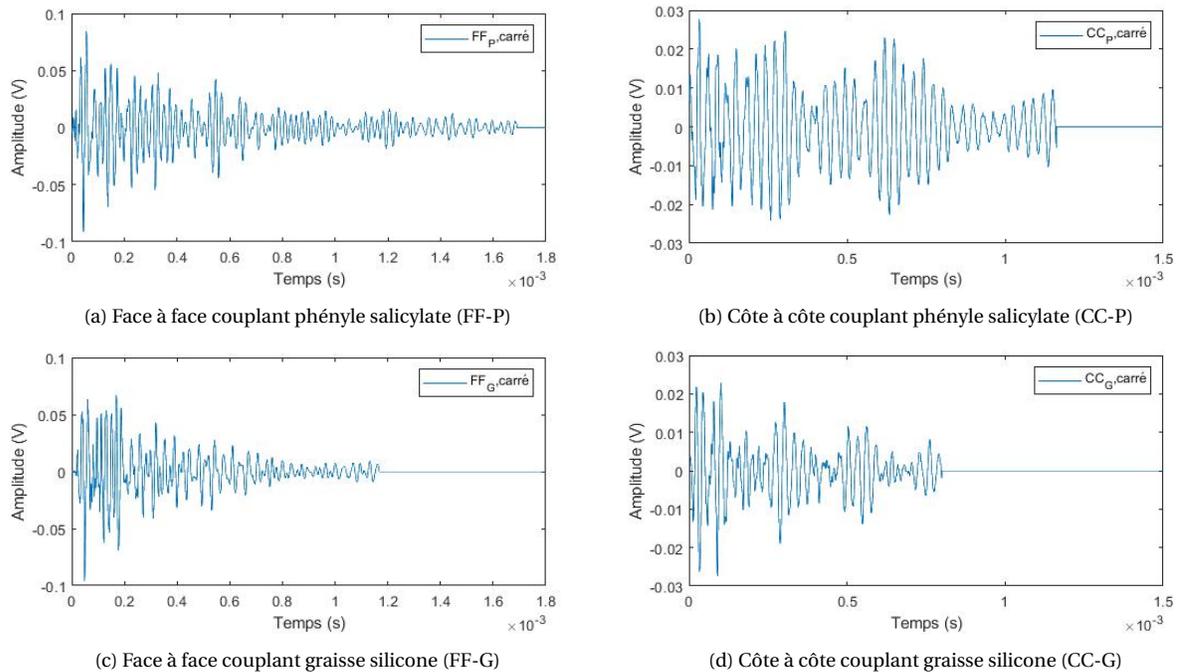


FIGURE 2.10 – Résultats de l'étude pour le choix du couplant : comparaison dans le domaine temporel

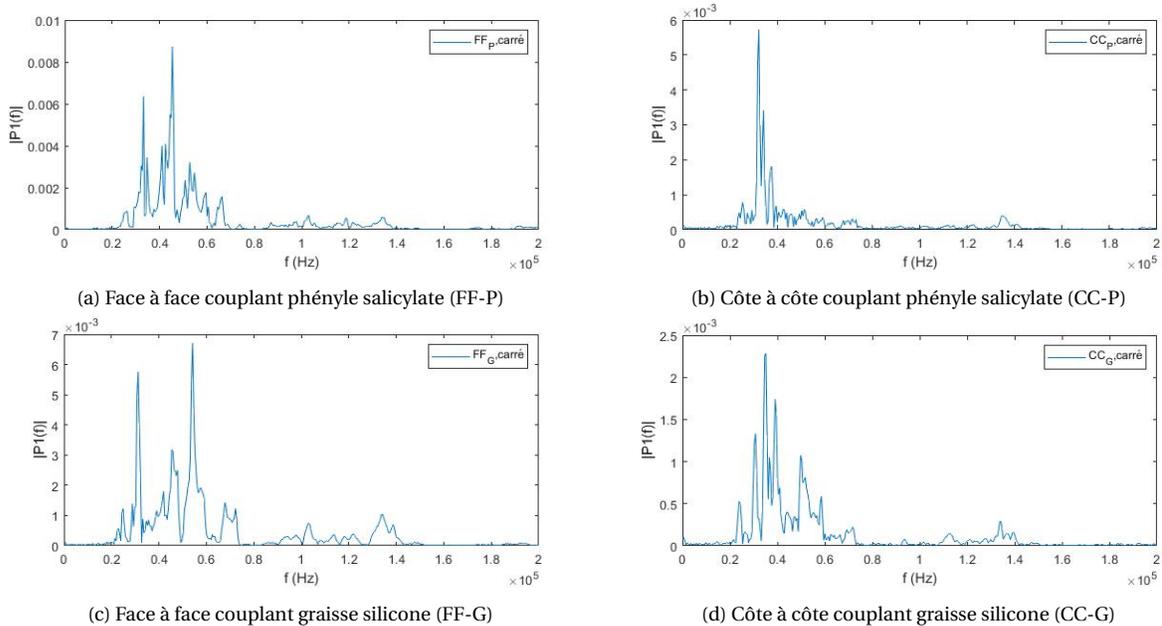


FIGURE 2.11 – Résultats de l'étude pour le choix du couplant : comparaison dans le domaine fréquentiel

Nous notons sur la figure 2.10 que la graisse silicone atténue d'avantage le signal que le phényle salicylate avec un facteur de 1.5 en faisant une comparaison des énergies des signaux reçus dans les différentes configurations. De plus, dans le domaine fréquentiel cette atténuation atteint un facteur de plus de 2 lorsque les capteurs sont couplés à l'échantillon (figure 2.11). Enfin, pour fixer le capteur à l'échantillon d'étude, une pression supplémentaire n'est nécessaire que dans le cas des couplants visqueux, ce qui nécessite l'utilisation de techniques assurant des pressions mesurables et répétitives entre chaque mesure. Pour toutes ces raisons, le choix du couplant pour le reste de notre étude se porte sur le phényle salicylate qui transmet plus efficacement l'onde élastique et dont la mise en œuvre est plus facile.

2.3.1.2 Configuration de l'émission des signaux

L'émission des ondes ultrasonores se fait par le biais d'une carte ARB-1410. Cette carte possède un convertisseur de 14-bits à une vitesse d'acquisition de signal de 100 MHz, délivrant en sortie analogique :

- +/-20V jusqu'à 15 MHz,
- +/-35V jusqu'à 2 MHz,
- +/-150V jusqu'à 0.7 MHz.

L'ARB-1410 permet notamment de générer différents signaux périodiques entretenus (carrés ou sinusoïdaux), des trains d'ondes ou cycles uniques et des signaux arbitraires ou non périodiques. Le logiciel Wavegen qui est associé à cette carte émettrice permet de configurer les consignes de l'émission à savoir : le type de signal souhaité (carré, sinusoïdal), sa fréquence,

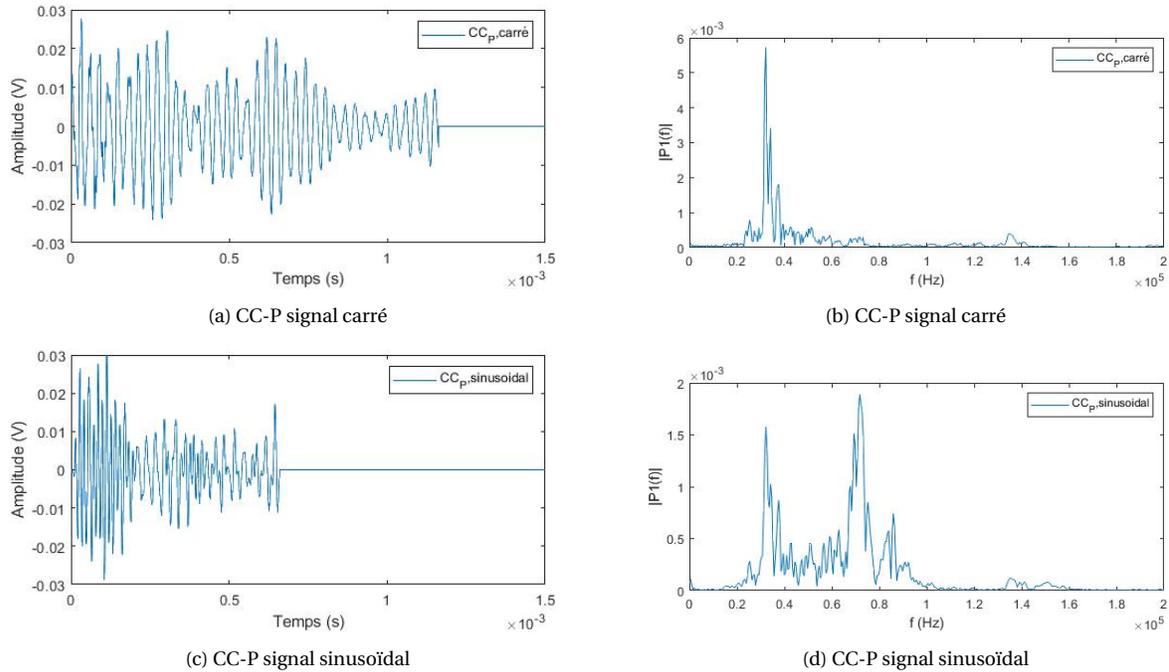


FIGURE 2.12 – Résultats de l'étude pour le choix de la consigne d'émission : (a et b) signal carré, (c et d) signal sinusoïdal

son amplitude et le nombre de cycles produit. Nous noterons que les signaux réellement envoyés par les capteurs sont inconnus. Nous ne maîtrisons en réalité que les consignes données à la carte ARB1410. Une étude préliminaire a été réalisée pour choisir ces paramètres de manière optimale.

Deux capteurs SH10 sont couplés en côte à côte avec du phényle salicylate suivant le même dispositif d'essai que celui réalisé pour le choix du couplant décrit dans la section précédente (figure 2.9-b). Puis nous réalisons deux essais avec des consignes d'émission presque identiques mis à part les formes d'onde : l'une carrée et l'autre sinusoïdale. Pour les deux essais, nous avons fixé la consigne à 1 cycle de fréquence 100 kHz et d'amplitude 0.05 V. Sur la figure 2.12 nous représentons les signaux reçus lors de ces deux essais dans les domaines temporel et fréquentiel.

Le choix s'est finalement porté sur un signal périodique carré qui s'est montré plus énergétique notamment avec une durée du signal plus importante. Les amplitudes des signaux vont dépendre du type de matériau étudié. En effet, le béton étant par nature un milieu plus atténuant que l'acier, il est nécessaire d'augmenter l'amplitude du signal pour les mesures réalisées pour ce type d'assemblage, afin de garder les mêmes distances de mesure pour les deux types d'assemblage. Ainsi, nous avons calibré de manière empirique une amplitude à 10V pour les mesures réalisées sur les assemblages béton-composite (BC-Da et BC-Po), et à 4V sur celles réalisées sur les assemblages acier-composite (AC-1P et AC-3P) en nous assurant toujours d'avoir assez d'énergie sur le capteur récepteur le plus éloigné tout en évitant de saturer le capteur récepteur le plus proche. Sur la figure 2.13, nous représentons la consigne d'émission sur les assemblages collés acier-composite. Les fréquences données comme consigne d'émission seront

toujours prises autour de la valeur de la fréquence de résonance du capteur utilisé.

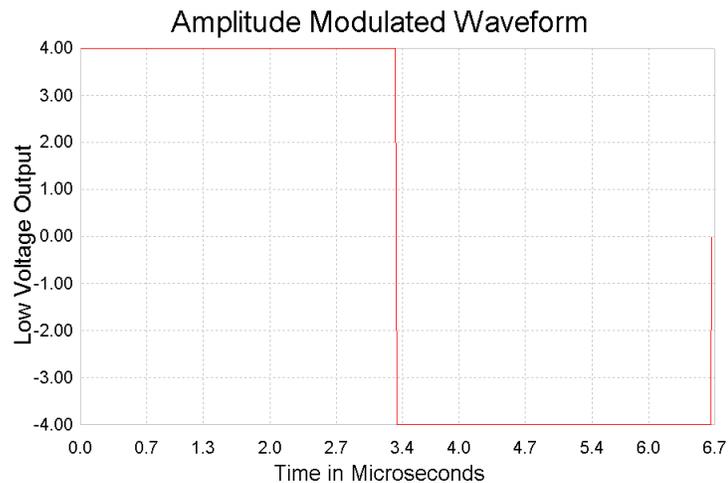


FIGURE 2.13 – Consigne de l’émission lors des mesures réalisées sur les assemblages collés acier-composite

2.3.1.3 Configuration de la réception des signaux

Une carte à deux voies PCI2 est utilisée pour la réception des signaux acoustiques. Cette carte possède une résolution de 18 bits avec une vitesse d’acquisition allant jusqu’à 40 MSPS (*Mega Sample Per Second*). Sa bande passante s’étend de 1 kHz à 3 MHz. Le logiciel AEWIn qui l’accompagne permet de configurer la réception des signaux selon le milieu de propagation et l’environnement de l’essai.

Notons que la définition d’un signal d’émission acoustique se fait nécessairement en fixant un seuil d’acquisition afin de discrétiser les signaux. Dans notre cas, ce seuil a été fixé de manière expérimentale à 45 dB pour éliminer tout bruit parasite ambiant. La pertinence de ce seuil a été vérifiée par une comparaison des descripteurs extraits du logiciel AEWIn et ceux calculés à partir de la forme d’onde.

L’individualisation des signaux EA est réalisée à l’aide de trois paramètres spécifiques : PDT, HDT et HLT. Ces paramètres sont décrits dans le chapitre précédent et la détermination de leur valeur s’est faite de manière empirique et validée par le test de cassé de mines (*Hsu-Nielsen test*) [92]. Les valeurs retenues des paramètres d’individualisation de salve pour nos deux types d’assemblages sont répertoriées dans le tableau 2.5.

Assemblages	PDT (μ s)	HDT (μ s)	HLT (μ s)
Acier-composite	300	800	1000
Béton-composite	70	200	300

TABEAU 2.5 – Paramètres d’individualisation des signaux acoustiques

Un pré-amplificateur IL40S-HT avec un gain de 40 dB est placé entre chaque capteur récepteur et la carte PCI2. Ce modèle de pré-amplificateur opère sur une bande passante de 32 à 1100 kHz. Sa large bande passante nous a permis d'utiliser le même modèle pour tous les capteurs piézoélectriques à notre disposition.

Nous réalisons l'acquisition des signaux avec une fréquence d'échantillonnage qui nous permet sur une longueur maximale de 15k points de numériser sa majeure partie (environ 99% de l'énergie totale). Les fréquences d'échantillonnage correspondantes aux mesures réalisées sur différents types d'assemblages sont répertoriées dans le tableau 2.6. Dans le cas des assemblages BC-Da, les signaux reçus sont de durées relativement plus faibles. Pour éviter des traînées de signaux trop longues, nous avons donc limité le nombre de points à 8000.

Le *pre-trigger* est un paramètre temporel que l'on renseigne durant l'acquisition dans le logi-

Assemblages	Fréquence d'échantillonnage (kSPS)	Nombre de points
AC-1P	5000	15k
AC-3P	5000	15k
BC-Da	2000	8k
BC-Po	5000	15k

TABLEAU 2.6 – Paramètres de numérisation des signaux acoustiques

ciel AEwin afin de réguler le début de la numérisation du signal qui correspond à l'instant t du premier dépassement de seuil moins le *pre-trigger*. Dans notre cas, un *pre-trigger* de 20 μ s à été nécessaire pour visualiser clairement les débuts de nos signaux sur tous les types de substrat.

2.3.1.4 Choix des capteurs Piézoélectriques

Différents capteurs produits et commercialisés par *Mistras Group SA* ont été comparé lors de notre étude. Des couples d'émetteur et de récepteur ont été formé avec des capteurs variés en matière de sensibilité, de fréquence de résonance et de bande fréquentielle. Les domaines de fréquence choisis (0.05 - 1 MHz) restent assez bas comparés aux ultrasons classiques (jusqu'à 10 MHz). Le domaine de fréquence sélectionné peut avoir une influence importante sur la probabilité de détecter un défaut. Avec une fréquence plus élevée, la probabilité de détection est ainsi augmentée pour les petits défauts. Néanmoins, dans le cas de notre étude, les effets d'atténuation et de propagation sont très importants et indésirables pour une auscultation optimale des structures sur des distances relativement importantes. La gamme de fréquence allant de 20 à 1000 kHz a été privilégiée pour optimiser l'efficacité de la propagation du signal. Les caractéristiques des différents capteurs sont renseignées dans le tableau 2.7 et leurs courbes de sensibilité sont jointes en annexe 6.6.

2.3.1.4.1 Protocole d'essai pour le choix des capteurs

Le choix des capteurs s'est fait suivant des essais préliminaires réalisés sur l'échantillon BC-Da de type- α qui ne comporte aucun défaut (figure 2.14). Les capteurs émetteur et récepteur

Capteurs	Fréquence de résonance ou centrée (kHz)	Bande passante (kHz)
SH10	100	0 - 200
R15	150	50 - 200
S9204	150	50 - 200
S9208	500	20 - 1000
WD	650	100 - 1000

TABLEAU 2.7 – Caractéristiques des capteurs utilisés

sont disposés sur l'échantillon en mode transmission avec une distance entre axes de 50 mm. Le couplant utilisé pour les fixer sur l'échantillon est le phényle salicylate ($C_{13}H_{10}O_3$). Nous avons sélectionné comme consigne à l'émission durant ces essais des signaux carrés d'amplitude 2V et de fréquence prise autour de la valeur de la fréquence de résonance du capteur émetteur. La réception a été configurée comme pour celle d'un assemblage collé béton-composite définie dans la section 2.3.1.3 précédente.

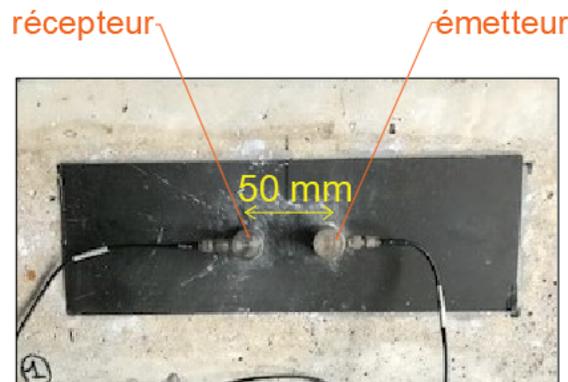


FIGURE 2.14 – Dispositif d'essai pour le choix des capteurs

2.3.1.4.2 Résultats sur le choix des capteurs

Sur la figure 2.15, nous présentons les valeurs des énergies absolues et des durées observées pour chaque configuration de capteurs émetteur/récepteur. En nous basant sur un critère énergétique qui nous permettrait d'avoir des distances d'auscultation d'autant plus importantes, nous remarquons que les deux configurations S9204-S9204 et S9204-R15 sont les plus optimales.

Une représentation par une distribution de Pseudo-Wigner-Ville lissée nous permet d'apprécier la distribution du spectre fréquentiel dans le temps pour ces deux configurations (figure 2.16). Cette représentation est linéaire avec un seuil de 5%.

Cette figure 2.16 nous révèle que la configuration S-R offre une représentation spectrale plus

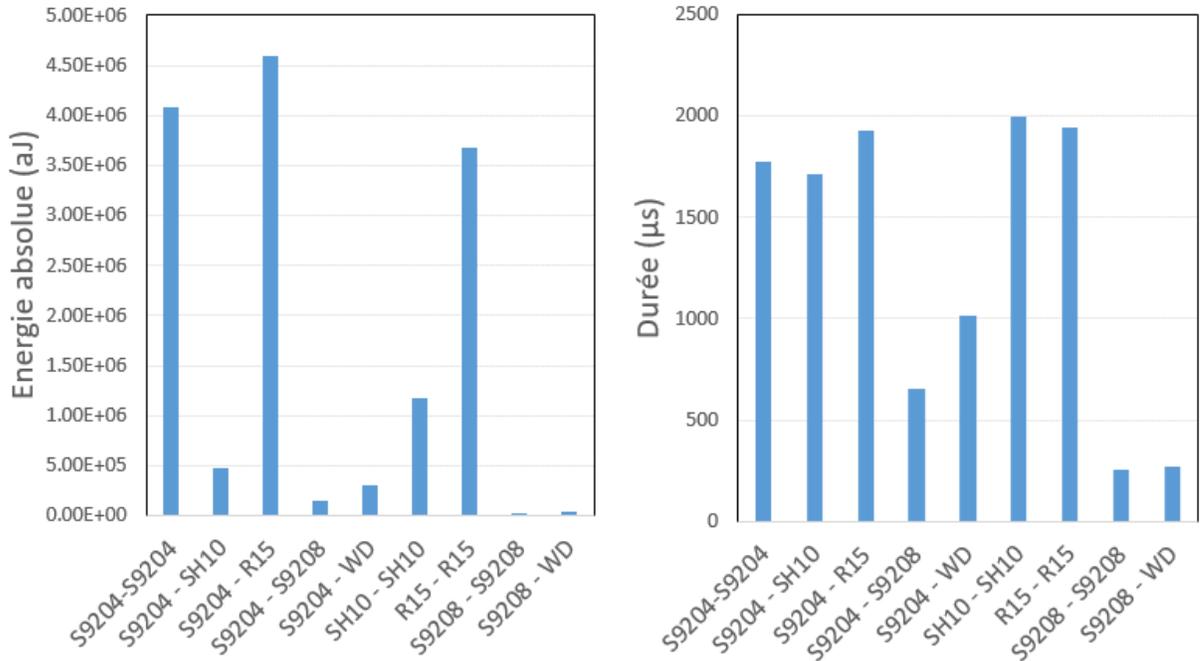


FIGURE 2.15 – Résultats de l’analyse paramétrique pour le choix des capteurs : à gauche l’énergie absolue (aJ) et à droite la durée (µs)

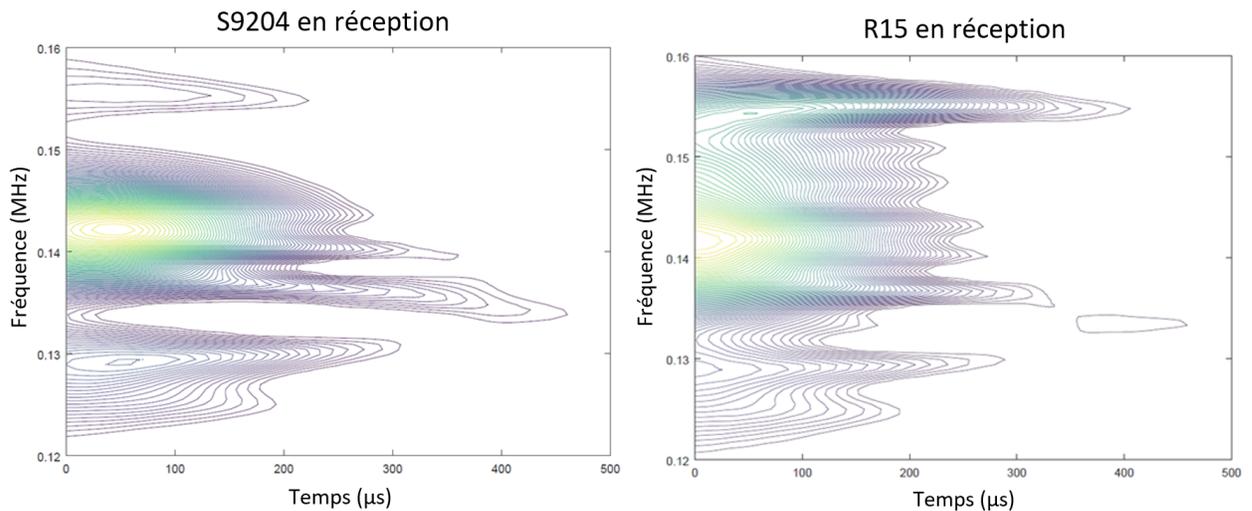


FIGURE 2.16 – Représentation temps-fréquence du signal de réception : à gauche S9204 en émission et en réception; à droite S9204 en émission et R15 en réception

large et moins centrée autour de la fréquence de résonance (150 kHz).

La configuration S-R sera donc retenue pour les campagnes de mesures réalisées sur les assemblages collés AC-1P et BC-Da en vue de la mise au point d’une méthode de diagnostic pour la détection et l’identification des défauts.

2.3.2 Protocole de mesure retenu

Les capteurs retenus pour nos campagnes de mesures sont le S9204 en émission et le R15 en réception. Nous plaçons un capteur récepteur N°1 à 230 mm de l'émetteur et un capteur récepteur N°2 à 115 mm au droit du défaut recherché. Les trois capteurs sont placés de manière alignée, parallèle aux fibres du composite et centrée sur la largeur (figure 2.17).

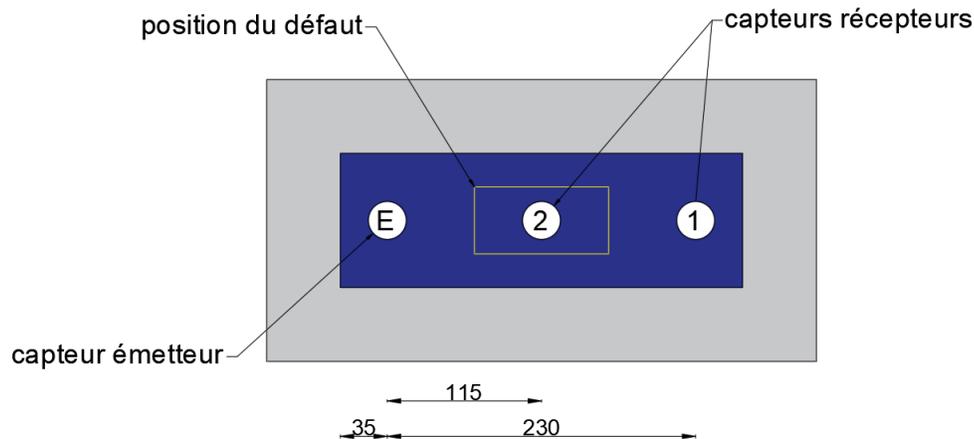


FIGURE 2.17 – Disposition des capteurs lors des mesures réalisées sur les assemblages collés AC-1P et BC-Da

La position des capteurs est maintenue constante pendant les investigations par utilisation d'une règle imprimée en 3D (figure 2.18). Afin de prendre en compte la variabilité potentielle liée à la mise en place du système, nous avons réalisé sept séries de dix mesures indépendantes sur chaque échantillon. Chaque mesure consiste à mettre en place et à fixer la règle sur l'échantillon, à chauffer le phényle salicylate jusqu'à sa fusion, à coupler les capteurs les uns après les autres à l'échantillon avant de retirer la règle. Puis, après un temps d'attente d'environ 15 minutes correspondant au refroidissement du couplant et la fin de sa cristallisation, nous lançons l'émission et l'acquisition de dix signaux à 2 secondes d'intervalle, avec les consignes définies dans les sections précédentes (2.3.1.3 et 2.3.1.2). Enfin, les capteurs sont découplés de l'échantillon puis on procède à leur nettoyage ainsi que la surface de l'échantillon, avant d'entamer une nouvelle série de mesure.



FIGURE 2.18 – Règle imprimée en 3D utilisée pour conserver une disposition des capteurs identique

Les mesures peuvent être affectées par la variation du degré de réticulation ou de la température environnante. Ce point sera abordé dans les sections suivantes.

2.3.3 Évaluation de la distance maximale d'investigation sur les assemblages BC-Po

Nous avons cherché à évaluer la distance maximale sur laquelle on pouvait ausculter notre structure avec les mêmes consignes d'émission et de réception proposées ci-dessus. Pour ce faire, nous avons étudié l'atténuation du signal dans les différentes zones saines des assemblages béton-composite "poutres" (BC-Po).

Les capteurs utilisés sont le S9204 en émission et le R15 en réception, couplés à l'échantillon par du phényle salicylate. Nous disposons les capteurs récepteurs par pas de 15 cm sur la zone centrale des poutres qui est la zone exempte de défauts comme on peut le voir sur la figure 2.19.

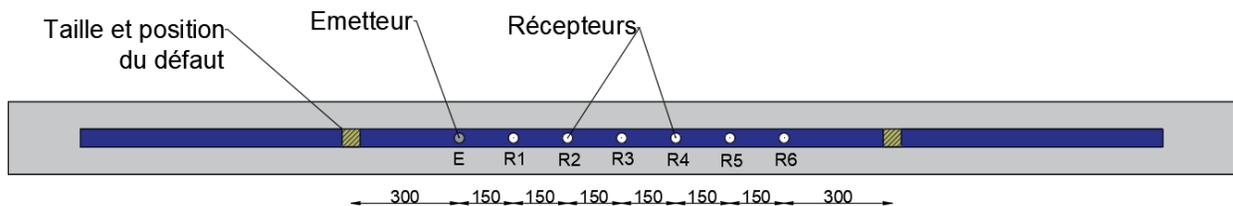


FIGURE 2.19 – Disposition des capteurs pour l'investigation de l'atténuation du signal sur une zone saine des assemblages BC-Po : distance en centimètres

Afin d'apprécier l'atténuation du signal sur ces zones, une analyse paramétrique a été réalisée sur les données reçues pour chaque position de capteur. Sur la figure 2.20, nous présentons les résultats de cette comparaison des valeurs paramétriques pour les investigations réalisées sur les zones saines des poutres n°1 et n°2.

Sur ces figures, nous pouvons vérifier la dissipation de l'énergie élastique libérée lors de l'émission du signal tout au long des poutres. Cette dissipation se traduit par une diminution des valeurs de tous les descripteurs EA temporels en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur alors que les descripteurs fréquentiels restent plus ou moins constants.

Nous notons toutefois que les descripteurs ne décroissent pas de la même manière par rapport à la distance d'investigation. Par exemple, les descripteurs énergétiques tels que l'énergie absolue et la force du signal ont plutôt une décroissance exponentielle là où l'amplitude et la durée décroissent de manière presque linéaire. Nous notons que la décroissance des paramètres énergétiques est plus accentuée dans le cas de la poutre n°2. Le changement de comportement en fonction du milieu de propagation semble plus effectif lorsque la distance inter-capteur est plus importante. Ainsi, nous préconisons un ajustement de la méthodologie in fine pour fixer une distance d'investigation adéquate pour une application sur site. Dans notre exemple, le critère qui devrait orienter notre choix d'une distance maximale d'investigation doit se baser sur les descripteurs énergétiques. En tenant compte d'une atténuation supplémentaire du signal pouvant être causée par la présence d'un éventuel défaut, la distance d'investigation ne devrait ainsi pas dépasser 45 cm dans le cas étudié.

Cependant, afin de pouvoir comparer les résultats de cette étude avec ceux des échantillons

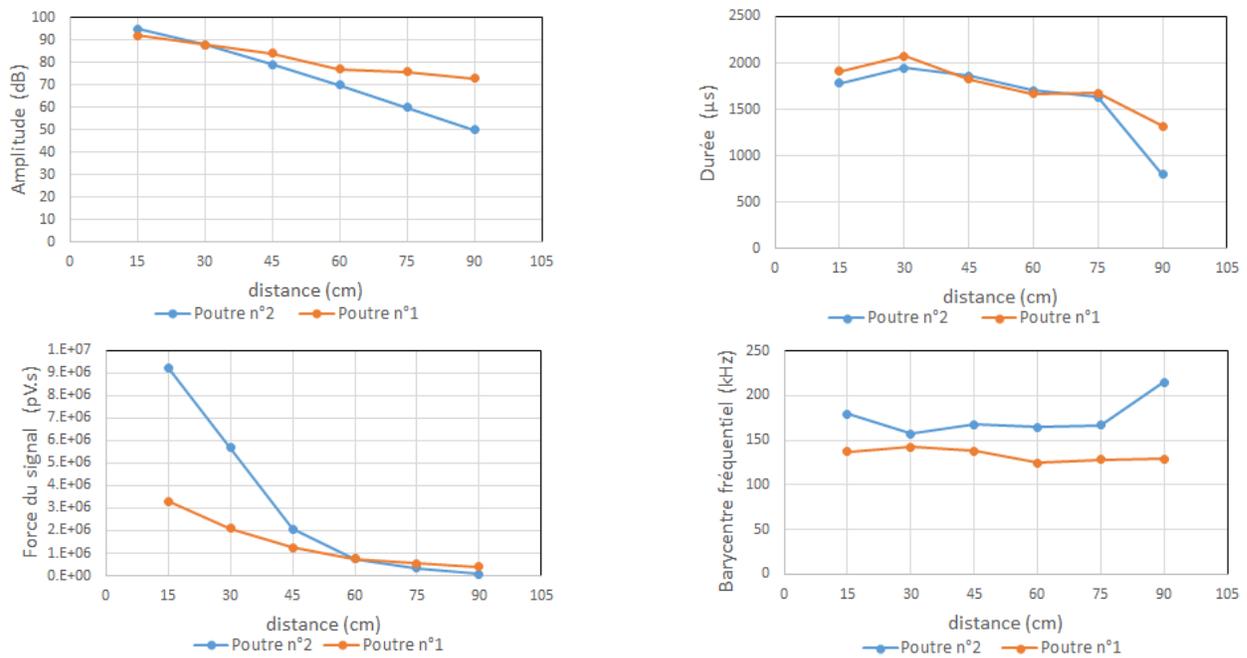


FIGURE 2.20 – Évolution des descripteurs en fonction des distances de propagation du signal sur la zone saine des poutres n°1 et n°2

de référence (BC-Da), nous limiterons la distance maximale d’investigation à 230 mm sur les échantillons BC-Po.

2.4 Évaluation de l’impact de différents facteurs pouvant influencer la répétabilité des mesures

2.4.1 Effet de la variation de la température ambiante sur les mesures

Nous avons mené une étude pour déterminer l’effet de la variation de la température sur les mesures d’AUS. Cette expérience a été menée dans une salle orientée Ouest où en plein été nous avons des variations jour/nuit de température allant jusqu’à 14°C.

Sur l’échantillon sain AC-1P, nous disposons un capteur émetteur S9204 et un capteur récepteur R15 à 115 mm d’intervalle, fixés à l’échantillon par un couplant visqueux de type graisse et l’exercice d’une pression constante par le biais d’une masse de 123 g. La configuration de la réception est identique à celle proposée par la méthodologie pour l’application de la technique AUS aux assemblages AC-1P.

L’essai a duré 16 h 40 min durant lesquelles nous émettons tous les 20 s un signal carré à 1 cycle de 150 kHz de fréquence avec une amplitude de 2 V. La température ambiante de la salle est mesurée durant l’essai grâce à un thermocouple type K relié à une chaîne de mesure Spider8 développée par HBM.

Sur la figure 2.21, nous représentons les valeurs de la force du signal reçu en fonction du temps

et la température enregistrée en fonction du temps durant cette expérimentation.

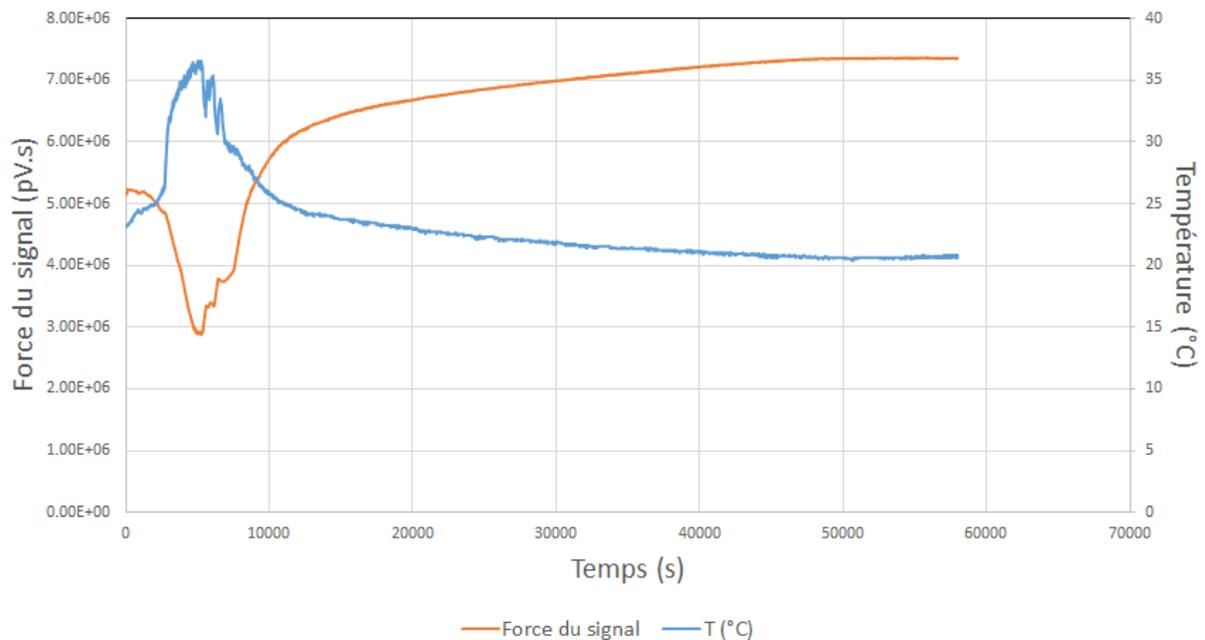


FIGURE 2.21 – Évolution de la température de la salle et de la valeur de la force du signal mesuré par le capteur n°1

Cette figure révèle la corrélation existante entre les variations de la température et les mesures d'AUS. Nous constatons que la diminution de la température entraîne une rigidification du couplant ce qui le rend plus transmissible vis à vis de l'onde élastique. Inversement, plus la température augmente plus le couplant s'assouplit et transmet moins l'onde incidente ce qui conduit à une diminution des valeurs des paramètres tels que la force du signal. Dans cette expérimentation, une augmentation de la température de +14°C entraîne une diminution significative de la force du signal de -41%.

Au vu de ces résultats, nous préconisons pour la réalisation des campagnes expérimentales d'effectuer les mesures avec moins de 5°C de différence pour obtenir une bonne répétabilité de ces dernières.

2.4.2 Effet de la variation du degré de polymérisation de l'adhésif sur les mesures d'AUS

Une investigation a été menée afin d'évaluer l'influence du degré de polymérisation de l'adhésif époxy sur les mesures d'AUS. Le degré de polymérisation de l'adhésif à un instant t est déterminé à l'aide d'une analyse thermique par calorimétrie à balayage différentiel DSC3 (Mettler Toledo), couplé avec un système de froid de type HUBER TC 125.

Cette technique consiste en la détermination de l'enthalpie de la réaction de réticulation à un instant t déduite par l'intégration de la courbe du flux de chaleur en fonction de la température.

Sachant que le flux de chaleur diminue à mesure que l'adhésif durcit, on en déduit son taux de réticulation à cet instant t du rapport de l'enthalpie résiduelle sur l'enthalpie initiale (équation 2.1) :

$$D_p = \frac{T_0 - T_i}{T_0} \quad (2.1)$$

Avec : T_0 - l'enthalpie calculée le jour du collage et T_i - l'enthalpie mesurée i jours après le collage.

Les éprouvettes ont subi à chaque essai deux cycles de chauffe et de refroidissement avec des températures minimale et maximale de 20 et 220 °C pour des vitesses de ± 10 K/min. Nous renseignons en annexe 6.8 le programme en version graphique avec les différents segments et les vitesses de chauffe, ainsi que la courbe correspondant à la mesure réalisée à T_0 , la date initiale de l'élaboration de la résine époxy.

Dans le cadre de cette évaluation, nous réalisons un assemblage sain AC-1P constitué d'une plaque d'acier de 5 mm d'épaisseur sur laquelle on colle une plaque de composite avec de la résine époxy bi-composant polymérisant à froid. Une certaine quantité de l'adhésif utilisé pour la réalisation de cet assemblage est prélevé avant le collage afin de préparer, pour chaque jour d'essai prévu, 3 échantillons de masse variant entre 29 et 34 mg pour les mesures DSC. Ainsi, une campagne d'essai d'AUS et DSC en simultané est prévue pour le jour du collage, puis 1, 2, 7, 30 et 60 jours après le collage.

Les mesures d'AUS sont réalisées à l'aide d'un capteur SH10 couplé à l'échantillon durant toute la durée de la campagne par du phényle salicylate à 20 cm d'intervalle. Comme consigne d'émission, nous avons opté pour un même signal carré d'amplitude 2V et de fréquence de 80 kHz à 1 cycle. Le seuil d'acquisition est fixé à 45 dB avec des valeurs de PDT, HDT et HLT prises respectivement égales à 300 μ s, 800 μ s et 1000 μ s.

Sur la figure 2.22 nous représentons l'évolution du degré de polymérisation de l'adhésif époxy en fonction du temps. Sur la figure 2.23, nous représentons l'évolution en fonction du temps de paramètres décrivant les signaux reçus lors des mesures d'AUS.

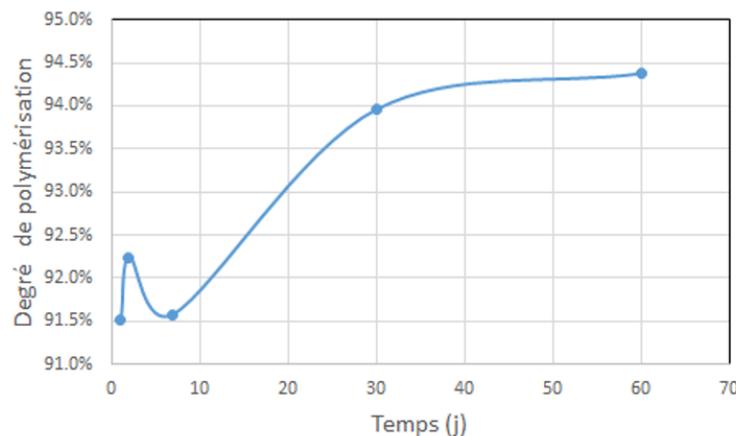


FIGURE 2.22 – Degré de polymérisation de la résine époxy en fonction du temps

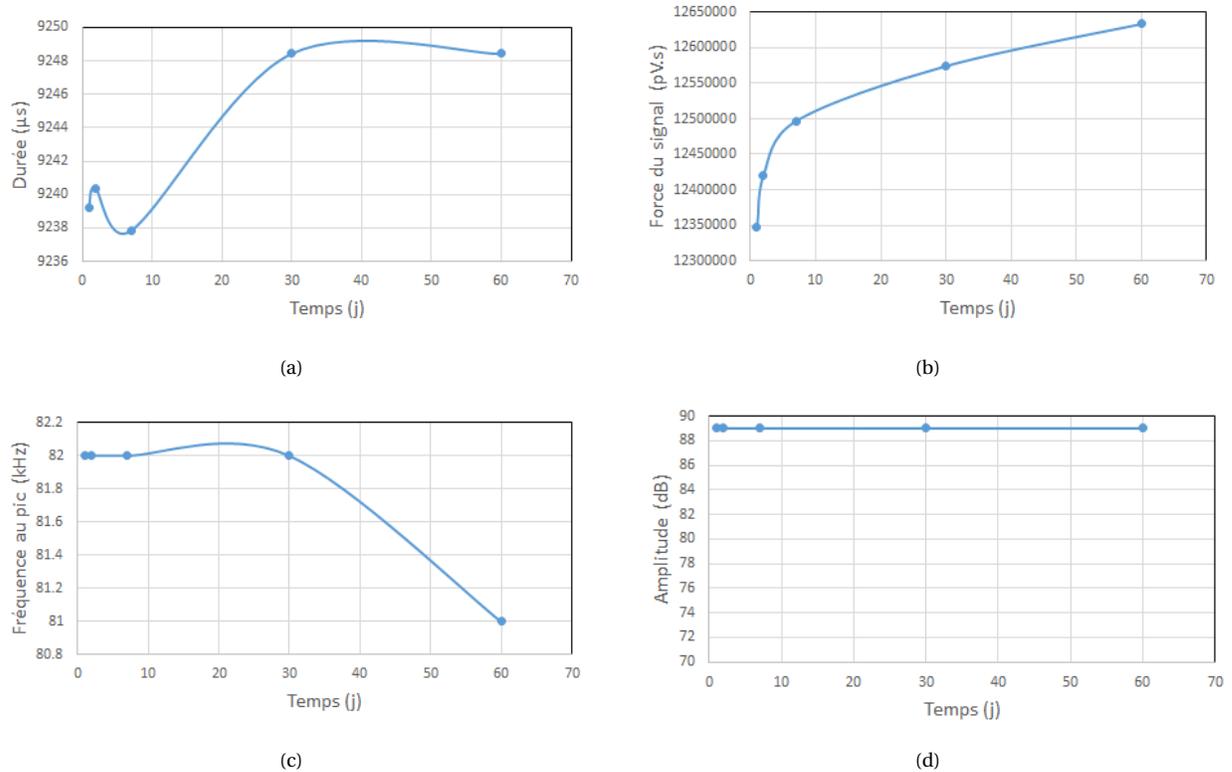


FIGURE 2.23 – Évolution des paramètres d’AUS en fonction du temps de polymérisation : a) Durée (μs), b) Force du signal (pV.s), c) Fréquence pic (kHz), d) Amplitude (dB).

Nous notons que la majeure partie de la polymérisation de l’adhésif est quasiment complète après 24 h (91.5% de degré de polymérisation). De plus, l’augmentation du degré de polymérisation de l’adhésif semble corrélée avec celle de la plupart des descripteurs du domaine temporel (Force du signal et durée, nombre de coups et énergie). Plus l’adhésif se polymérise, plus il se raidit et donc transmet davantage l’onde élastique qui le traverse. L’amplitude maximale du signal qui est moins sensible de même que les descripteurs fréquentiels semble constante. Nous remarquons toutefois pour une augmentation de 3% du degré de polymérisation, que nous avons une faible variation des paramètres d’AUS de l’ordre de 0.11‰ pour la durée, et de 24.3‰ pour la force du signal.

Nous constatons que le degré de polymérisation a des effets sur les mesures d’AUS relativement faibles. Nous préconisons lors de l’auscultation d’assemblages collés sur site industriel d’avoir une zone de référence avec un adhésif du même âge que celui du reste de la structure à consulter pour s’affranchir de cette influence.

2.5 Exploitation des mesures

2.5.1 Traitement du signal et détermination des descripteurs

2.5.1.1 Descripteurs calculés via AEWIn

Le logiciel du système d'acquisition AEWIn de Mistras extrait la forme d'onde du signal reçu ainsi que plusieurs descripteurs de ce signal dans le domaine temporel et fréquentiel. À partir de chaque signal reçu, 10 paramètres listés dans le tableau 2.8 sont retenus pour détecter et identifier les défauts en utilisant les méthodes présentées en section 1.4. L'essentiel de ces descripteurs temporels est illustré sur la figure 1.17.

Le choix porté sur ces dix descripteurs est motivé par leurs écarts assez importants observés sur

	#	Paramètres	Unité
Domaine temporel	a1	Amplitude	dB
	a2	Durée	μs
	a3	Énergie	$\mu\text{V.s/coup}$
	a4	Force du signal	pV.s
	a5	Énergie absolue	aJ
	a6	Nombre de coups	-
	a7	Temps de montée	μs
	a8	Nombre de coups au pic	-
Domaine fréquentiel	a9	Barycentre fréquentiel	kHz
	a10	fréquence pic	kHz

TABLEAU 2.8 – Liste des descripteurs calculés via AEWIn

les mesures réalisées sur les différents échantillons, ce qui fut peu (ou pas) le cas pour les autres descripteurs non retenus et listés à la section 1.3.2.4. En outre, d'autres descripteurs fréquentiels (moyenne, initiale et de réverbération) ne sont pas retenus car étant des combinaisons des descripteurs déjà pris en compte (a2, a6, a7 et a8).

2.5.1.2 Descripteurs calculés via COSMOS

Du signal numérisé, nous recalculons avec un logiciel codé sous Matlab COSMOS [88] d'autres descripteurs en effectuant sur chaque forme d'onde un pré-traitement afin de conserver la partie utile du signal. Ce pré-traitement consiste à retirer les *pre-triggers* et les traînées de signaux avant de les réajuster par interpolation à la fréquence d'échantillonnage initiale. Ces étapes sont expliquées ci-dessous et illustrées sur la figure 2.24.

- **Retrait du *pre-trigger*** : Cette étape est utile pour supprimer le bruit numérique de l'acquisition. Le retrait du *pre-trigger* consiste à supprimer simplement les points de la forme d'onde correspondant à ce temps.

La valeur du *pre-trigger* à supprimer est ajustable dans COSMOS selon les conditions expérimentales. Dans notre cas, nous estimons que tous les essais se sont réalisés dans les mêmes conditions et nous la prendrons toujours égale à 20 μs .

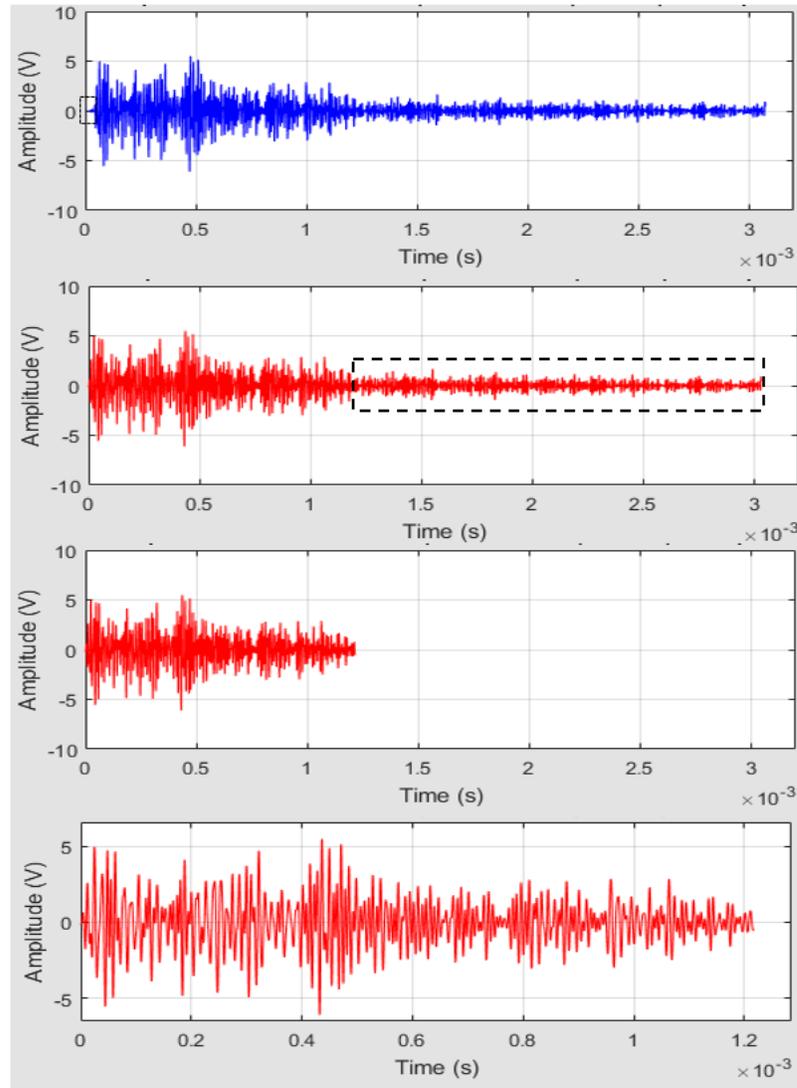


FIGURE 2.24 – Étapes de pré-traitement via COSMOS de haut en bas : original, *pre-trigger* de 20 μ s retiré, traînée supprimée à 0.1% de E puis réajustement par ré-échantillonnage à 5 MSPS.

- **Suppression de la traînée du signal** : Elle consiste à enlever les derniers points de la forme d'onde sur la base d'un critère énergétique. Pour chaque point de la forme d'onde, l'énergie cumulée calculée depuis le début est comparée à l'énergie contenue dans une fenêtre de longueur de 10 μ s qui suit ce point. Si cette énergie est inférieure à un certain seuil (en %) de l'énergie cumulée, alors le point correspondant va être considéré comme étant la fin du signal.

Dans notre étude, ce seuil est pris égale à 0.1% de manière empirique.

- **Réajustement des signaux par ré-échantillonnage** : Il est basé sur la technique d'interpolation par Spline Cubique d'Hermite (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial* ou *PCHIP*) [167][168] et sur le théorème d'approximation de Weierstrass [169]. Cette étape permet de redonner aux formes d'ondes leur fréquence d'échantillonnage initiale et de les ramener au même nombre de points afin de pouvoir les stocker numériquement dans une

matrice pour des traitements ultérieurs.

Les descripteurs calculés et retenus à l'issu de ce pré-traitement sont au nombre de 22 et sont répertoriés dans le tableau 2.9 [122] [123]. Ces nouveaux descripteurs du signal seront utilisés

	#	Paramètres	Unité
Domaine temporel	r1	Amplitude	V
	r2	Durée	s
	r3	Énergie	V ²
	r4	Franchissements de zéro	%
	r5	Temps de montée	s
	r6	Barycentre temporel	s
	r7	Régression temporelle	V.s ⁻¹
Domaine fréquentiel	r8	Puissance partielle 1 [0 ; 50] kHz	%
	r9	Puissance partielle 2 [50 ; 125] kHz	%
	r10	Puissance partielle 3 [125 ; 200] kHz	%
	r11	Puissance partielle 4 [200 ; 400] kHz	%
	r12	Barycentre fréquentiel	Hz
	r13	Fréquence pic	Hz
	r14	Étalement	Hz
	r15	Dissymétrie	-
	r16	Aplatissement	-
	r17	Pente spectrale	Hz ⁻¹
	r18	Fréquence de coupure (95% de l'énergie)	Hz
	r19	Étalement (/pic)	Hz
	r20	Dissymétrie (/pic)	-
	r21	Aplatissement (/pic)	-
	r22	Fréquence d'ouverture (5% de l'énergie)	Hz

TABLEAU 2.9 – Liste des descripteurs calculés sur les signaux numérisés via Cosmos

dans l'application de la méthode d'identification par classification supervisée, car dans certains cas de figure, ils permettent une amélioration de l'efficacité de la méthode.

2.5.2 Calculs des coefficients de corrélation dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel

Le calcul des coefficients de corrélation entre deux signaux permet d'avoir une idée sur leur similitude. Cette propriété a longtemps été utilisée pour la classification des signaux [170]. Dans notre cas, il nous permet d'évaluer la répétabilité des mesures effectuées sur un même échantillon avec les mêmes consignes, dans les mêmes conditions. Le but de cette évaluation est de proposer une méthode de diagnostic fiable basée sur des mesures qui sont répétables. Ainsi, certaines séries de mesures peuvent être enlevées lors des analyses pour la détection et l'identification des défauts lorsqu'elles sont jugées incompatibles avec les autres séries de mesures. Le calcul du coefficient de corrélation de deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ s'effectue par le biais de

l'équation 2.2 de Pearson.

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y} \quad -1 \leq \rho_{xy} \leq 1 \quad (2.2)$$

Avec :

- ρ_{xy} : le coefficient de corrélation entre $x(t)$ et $y(t)$,
- σ_{xy} : la covariance des deux signaux,
- et σ_x et σ_y : leurs variances respectives.

La détermination des coefficients de corrélation permet en outre d'étudier la dissimilitude entre deux signaux reçus dans des échantillons différents (par exemple, l'un défectueux et l'autre sain). Si les valeurs des coefficients observées sont plus faibles que celles observées entre signaux reçus sur un même type d'échantillon, cela aura tendance à confirmer la bonne répétabilité des mesures car la distance entre deux signaux n'a de signification que lorsqu'elle est comparée à une autre distance avec un autre signal.

Le calcul de ce coefficient de corrélation pour chaque couple de signaux est toujours précédé d'un pré-traitement des signaux suivant la méthode décrite en section 2.5.1.2. Ensuite, nous réglons un éventuel défaut d'alignement des signaux comme illustré sur la figure 2.25 en estimant et corrigeant le délai entre les deux par le biais de la fonction Matlab *alignsignals* [171].

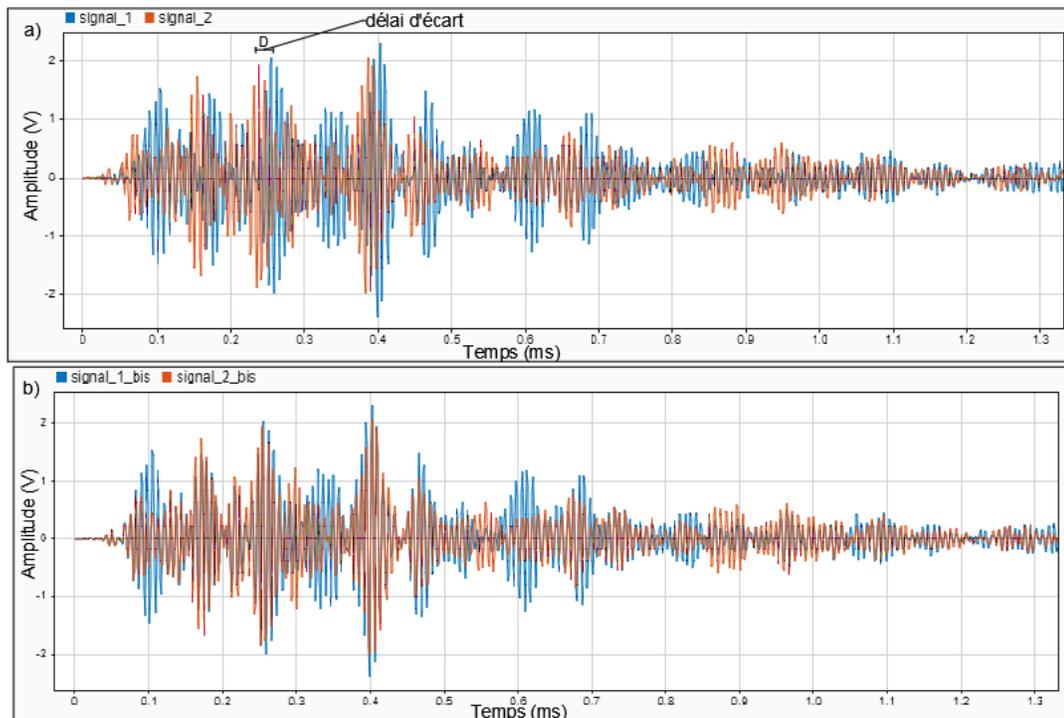


FIGURE 2.25 – Superposition de deux signaux reçus sur un même échantillon : a) en haut avant alignement, b) en bas après alignement

Sur les sept séries de mesures réalisées par échantillon, 10 signaux sont sélectionnés par série

pour déterminer les corrélations croisées des 70x70 signaux, soit 2415 coefficients de corrélation par type d'échantillon, que nous représenterons sous forme d'histogramme de dispersion entre 0 et 1.

2.5.3 Analyse mono-paramétrique : exploitation des diagrammes en boîte

Le premier niveau de diagnostic pour la détection des défauts consiste en une comparaison de la dispersion des valeurs par descripteur suivant les mesures réalisées sur les différents échantillons. Cette analyse mono-paramétrique a été facilitée par une représentation en boîte à moustache décrite dans la section 1.4 et les descripteurs concernés sont ceux calculés via AE-Win (tableau 2.8).

La représentation par des diagrammes en boîte à moustaches nous permet d'effectuer un pré-traitement sur les paquets de signaux reçus en retirant ceux qui semblent aberrants et représentés par des points hors des clôtures (figure 1.31). Le reste des signaux sera ensuite retenu pour l'évaluation de la capacité de détection des défauts. Pour y parvenir, nous avons déterminé les différences entre les valeurs moyennes par descripteur pour les mesures réalisées sur les échantillons de référence (type- α) et celles réalisées sur les échantillons présentant un défaut (équation 2.3).

$$D_f = \frac{\bar{P}_s - \bar{P}_d}{\bar{P}_s} * 100 \quad (2.3)$$

Avec :

- D_f : la différence observée en %,
- \bar{P}_s : la valeur moyenne du descripteur mesurée sur l'échantillon sain,
- et \bar{P}_d : la valeur moyenne du descripteur mesurée sur l'échantillon avec défaut.

Le critère de détection a été fixé à une valeur absolue de la différence $|D_f|$ qui doit être supérieure ou égale à 20%. Lorsque $|D_f|$ est comprise entre 10 et 20%, le défaut est caractérisé comme peu détectable, et non détectable lorsqu'elle est inférieure à 10%. Dans ce cas de figure, la détection de ce défaut nécessiterait l'utilisation des autres méthodes d'analyse proposées telles que l'analyse par composantes principales ou la classification par forêt d'arbres décisionnels.

2.5.4 Analyse multi-paramétrique : Analyse par composantes principales (ACP)

Nous avons proposé une ACP décrite dans la section 1.4, pour détecter les défauts présents dans les assemblages collés ne considérant les données des deux positions de capteur de manière distincte. De plus, l'ACP a été utilisée comme première approche pour identifier les différentes typologies de défauts étudiés. Pour ce faire, nous réalisons une ACP prenant en compte tous les descripteurs listés sur le tableau 2.8 mesurés sur tous les échantillons afin d'apprécier le regroupement des signaux par populations pour un même type d'échantillon (*clustering*).

Les données sont regroupées sous une matrice M de dimension (n, p) , dont les n individus représentent l'ensemble des signaux reçus et les p variables correspondent aux descripteurs de

ces signaux calculés via AEWIn (tableau 2.8). Nos variables n'ayant pas la même unité, avant de procéder à l'ACP nous devons centrer notre matrice en lui soustrayant le vecteur représentant le centre de gravité du nuage de point $g(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_p)$, puis la réduire en la divisant par l'écart-type correspondant.

La séparation des signaux pour les différents assemblages en clusters distincts sur le plan de l'ACP nous permettra d'envisager d'utiliser ce plan pour l'identification des défauts. En effet, si les clusters formés par les signaux reçus sur chaque échantillon sont distincts l'un de l'autre, ce plan pourrait servir de base pour une projection de nouvelles données non labellisées constituant ainsi une bibliothèque pour une classification supervisée.

Dans cette étude nous nous basons sur le critère de part d'inertie expliquée pour déterminer le nombre de composantes principales à conserver afin de limiter les pertes d'informations. En effet, nous avons expérimentalement comparé les trois critères et avons vu qu'une part d'inertie minimale R_q de 80% est plus discriminant que le critère de Kaiser ou celui de l'éboulis.

L'ACP est réalisée sur les données de nos 7 séries de mesures par échantillon en considérant distinctement les signaux reçus aux deux positions de capteur étudiées. En effet, nous verrons dans le chapitre 3 que mélanger les données des deux capteurs ne nous permettra pas de détecter voir identifier les défauts. Pour s'affranchir de ce biais, nous utilisons une technique de classification supervisée qui est plus robuste que l'ACP.

2.5.5 Classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels

La deuxième méthodologie de diagnostic proposée pour une identification plus fiable et plus robuste des différentes typologies de défauts étudiées est une classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels, décrite en section 1.4.

Pour construire cette forêt, nous utilisons un logiciel *RF-CAM*, codé sous Matlab pour la classification de signaux acoustiques issus de la corrosion [88]. Nous renseignons en données d'entrée les matrices de dimension (n, p) , avec les n signaux reçus sur les p paramètres qui les décrivent. Deux stratégies de classification ont été testées dans notre étude :

- celle où nous renseignons les données calculées par l'AEWin de *Mistras* (tableau 2.8),
- et celle où nous utilisons les données recalculées à partir des formes d'ondes via COSMOS (tableau 2.9).

L'introduction de la deuxième stratégie de classification fait suite à une augmentation de la précision sur certains assemblages lorsqu'on augmente le nombre de descripteurs.

Une majeure partie des données récoltés lors des 7 séries de mesure (minimum 4, dépendant du type d'assemblage) sera utilisée pour l'apprentissage du modèle. Le nombre de séries de mesures restant sera utilisé pour tester le modèle, en rentrant chaque signal sur les arbres constituant la forêt (le modèle), à l'issue desquelles chaque arbre émet un vote. La décision finale sur la classe du signal est prise en tenant compte de deux règles principales :

- **la règle de vote majoritaire (VM)** : qui permet de classer le signal, en tenant compte de la majorité des votes,
- **la règle de vote sécuritaire à 60% (VS60)** : qui, toujours accompagnée d'un seuil (dans notre cas pris égal à 60%), ne permet de désigner une classe pour un signal que lorsque le pourcentage d'arbres ayant voté pour cette classe est supérieur à 60%.

L'utilisation de la règle de vote sécuritaire nous permettrait de diminuer voir d'éviter les éventuelles erreurs de classification. L'inconvénient de cette règle réside dans la possibilité d'obtenir des signaux non classés. Plus le seuil est élevé, plus la règle est sévère, ce qui aura tendance à augmenter le nombre de signaux non classés (taux de rejet).

2.5.6 Modélisation par élément finis de la technique des acousto-ultrasons

Une modélisation par éléments finis de la technique des acousto-ultrasons peut permettre de définir les descripteurs pertinents à analyser en réalisant une étude comparative de deux types de modèle : l'un sain et l'autre avec un défaut simulé. Cette modélisation a été réalisée en collaboration avec *Jialiang Guo* dans le cadre d'un stage au laboratoire MATEIS de l'INSA de Lyon [172]. Elle a concerné les assemblages acier/composite mono-plaque (AC-1P) (figure 2.26) pour le défaut de type vide (type- β 1 et type- β 2).

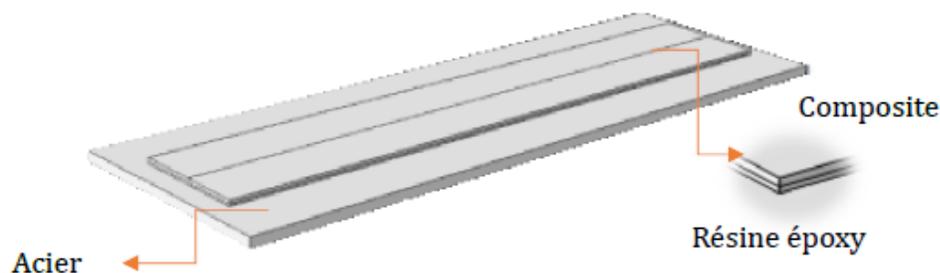


FIGURE 2.26 – Schéma de la modélisation des éprouvettes d'assemblage acier/composite mono-plaque (AC-1P)

Lors de sa propagation, l'onde élastique peut interagir avec la source puis le milieu de propagation où elle peut être atténuée et transmise, et elle peut aussi être colorée par le capteur récepteur et le système d'acquisition (couplant, câbles, pré-amplificateur, etc.). Dans la modélisation par éléments finis que nous réalisons, nous prenons en compte l'aspect propagation dans le milieu puis la réception par un capteur R15. La sensibilité du capteur S9204 en émission n'est pas prise en compte.

2.5.6.1 Modélisation des éprouvettes

Le choix de la forme des mailles a été orienté vers des éléments hexaédriques linéaires C3D8 qui s'adapte bien à la géométrie étudiée et consomment moins de temps de calcul par rapport

aux éléments quadratiques.

La taille des éléments (l_e) doit être choisie en fonction de la plus petite longueur d'onde qui peut traverser la structure γ_{min} . Cette longueur d'onde est relative à la fréquence de 1MHz la plus élevée prise en compte (equation 1.3).

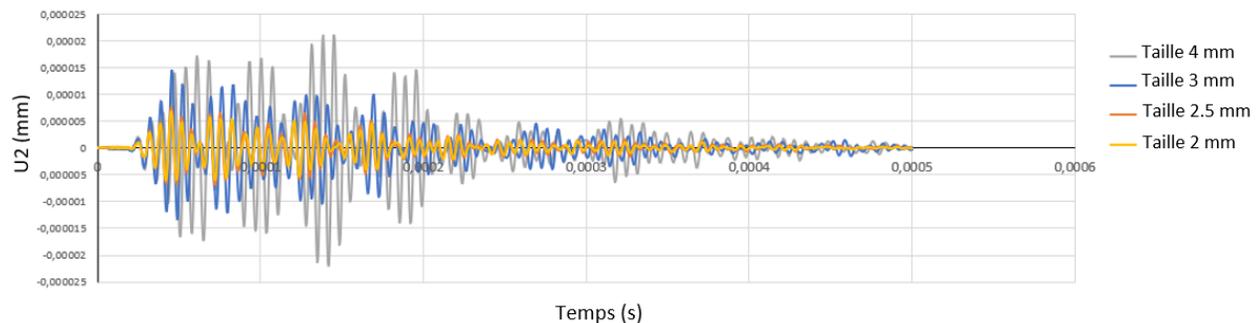
Ainsi, nous calculons pour chacun des matériaux composant notre assemblage les vitesses des ondes de Rayleigh afin d'obtenir les longueurs d'onde minimales correspondantes à chacun d'eux. Puis, un quotient R variant de 5 à 20 est appliqué à ces longueurs d'ondes pour obtenir la fourchette de taille des éléments à considérer pour éviter que l'onde ne se disperse [112] [125] [173]. Dans le tableau 2.10, nous répertorions les différents résultats obtenus.

	C_R (m/s)	γ_{min} (mm)	$l_{e_{min}}$ (R=20) (mm)	$l_{e_{max}}$ (R=5) (mm)
Acier	2975	22.31	1.12	4.46
Composite sens longitudinal	6367	47.754	2.39	9.55
Composite sens transversal	1762	13.22	0.66	2.64
Époxy	1474	11.05	0.55	2.21

TABEAU 2.10 – Vitesse de l'onde de Rayleigh, longueur d'onde minimale des ondes se propageant dans le milieu et taille du maillage recommandées pour les différents matériaux constituant l'assemblage.

Au vu de ces résultats, nous avons réalisé une étude comparative des tailles de maille allant de 1.5 mm à 4 mm en comparant leur temps de calcul ainsi que le signal reçu pour la position du capteur n°2 (à 115 mm de l'émetteur).

Sur la figure 2.27 qui représente ces signaux, nous notons qu'à partir d'une taille de maille de 2.5 mm, les signaux varient de manière conséquente. La différence en temps de calcul entre une taille de maille de 2.5 mm et 2 mm n'étant pas très élevée, nous choisissons de garder cette dernière comme taille des éléments. Cette taille des éléments du maillage correspond à un temps de calcul de 1.25 h.

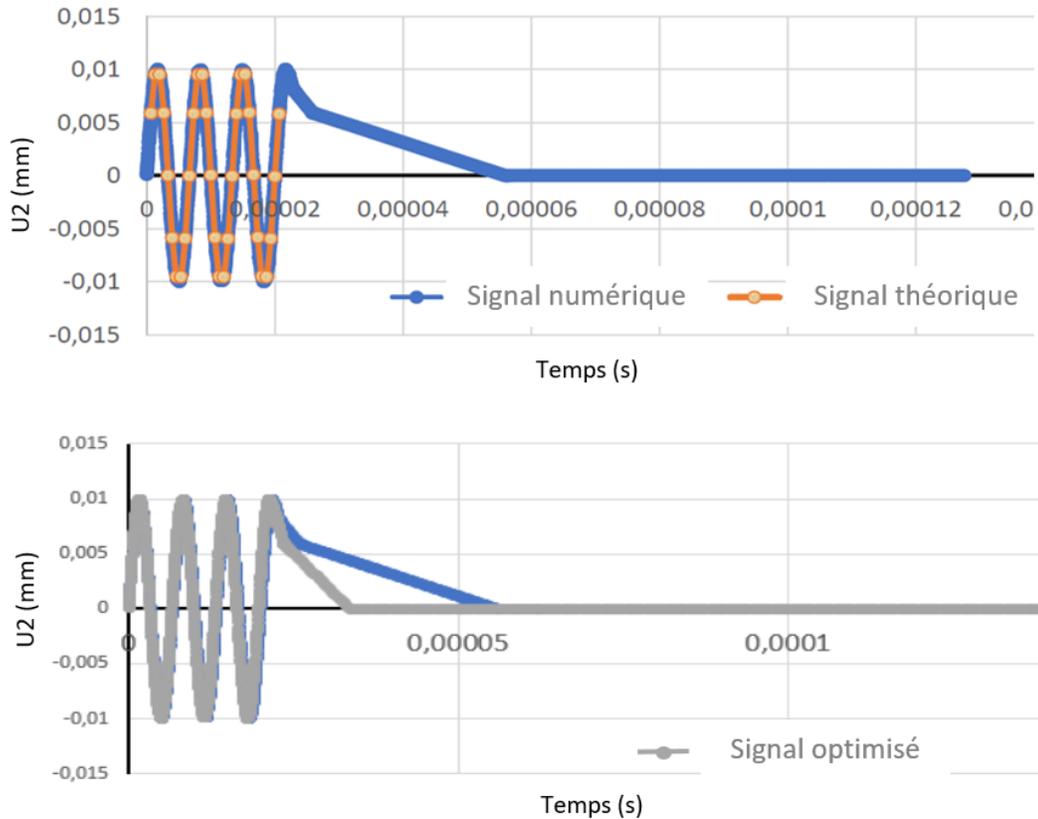


U2 : déplacement vertical en mm

FIGURE 2.27 – Signaux reçus en un seul noeud pour différentes tailles de mailles

2.5.6.2 Modélisation de la source et de la propagation de l'onde

En émission, nous choisissons de modéliser un signal ponctuel sinusoïdal de 150 kHz. Pour faciliter la convergence des calculs, le signal appliqué est progressivement diminué jusqu'à un déplacement nul, ce qui évite une variation trop abrupte du déplacement imposé au niveau du capteur émetteur (en haut de la figure 2.28).



U_2 : déplacement vertical en mm

FIGURE 2.28 – Simulation de l'évolution du déplacement U_2 en fonction du temps : en haut - signal d'émission théorique et signal numérique, en bas - signal optimisé.

Nous avons choisi pour ce signal un pas de temps représentant 20 divisions de la période $T = 6.67 \cdot 10^{-6}$ s (inverse de la fréquence 150kHz) qui est égal à $3.33 \cdot 10^{-7}$ s. Puis, des incréments de 1 à 3 ont été testé pour chaque pas de temps. Les résultats de cette investigation ont montré un signal inchangé, raison pour laquelle, afin d'optimiser le temps de calcul, nous nous limiterons à 1 incrément de pas de temps (signal optimisé en figure 2.28).

Pour modéliser l'atténuation du signal, nous utilisons les coefficients d'atténuation du modèle de Rayleigh. L'avantage de l'utilisation de ce modèle réside dans la facilité de sa mise en place et sa flexibilité permettant d'ajuster les coefficients au niveau d'amortissement recherché dans une plage de pulsation donnée [122] [121].

Dans une étude de Semblat [174], le modèle de l'atténuation de Rayleigh a donné des résultats

équivalents à un modèle de Maxwell généralisé pour un coefficient d'amortissement de 25%. Les coefficients de Rayleigh α et β considérés correspondant aux différents matériaux de notre assemblage sont renseignés dans le tableau 2.11 [112] [125].

Matériaux	Facteur de perte η	α (s)	β (s^{-1})
Acier	10^{-3}	500	$4 \cdot 10^{-10}$
Composite	10^{-1}	10000	$6 \cdot 10^{-10}$
Époxy	-	50000	10^{-8}

TABLEAU 2.11 – Coefficients de Rayleigh et facteurs de perte pour les différents matériaux constituant les assemblages AC-1P

2.5.6.3 Modélisation des capteurs

La modélisation du capteur récepteur est réalisée via trois méthodes :

- la modélisation d'un capteur virtuel parfait sensible à toutes les fréquences qui ferait l'acquisition des signaux sur un seul point de mesure, soit un seul nœud,
- la modélisation d'un capteur surface sensible à toutes les fréquences où l'acquisition se fait en moyennant les valeurs obtenues sur les points d'une surface donnée,
- et la modélisation du capteur de type R15 en prenant en compte la fonction de sensibilité du capteur R15 de Mistras et sa surface.

Pour le capteur surface, le calcul de la valeur moyenne du signal se fait en prenant en compte un facteur k de pondération dépendant de la position du point par rapport au centre du capteur. En effet, le capteur présente un effet d'ouverture qui se traduit par une réponse non uniforme sur toute sa surface active étant plus sensible en son centre. Le capteur R15 qui fait l'objet de notre étude est constitué d'une pastille piézo-électrique de 7.25 mm de rayon d'une bande passante de [50-400] kHz centré sur 150 kHz. L'effet d'ouverture en fonction du rayon r de ce capteur est calculé avec l'équation 2.4 [123].

$$k(r) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-2r + 12)} \quad (2.4)$$

La discrétisation spatiale choisie pour modéliser le capteur de surface est une division en 20 secteurs angulaires ($d\theta$), avec un choix de 10 points selon la direction radiale (dr) (figure 2.29).

Les grandeurs telle que la vitesse sur la surface du capteur sont mesurées en moyennant les vitesses de chaque zone d'influence par pondération du facteur d'ouverture correspondant (équation 2.5).

$$V_{moy} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n k_i \Delta S_i} * \sum_{i=1}^n v_i k_i \Delta S_i \quad (2.5)$$

Avec :

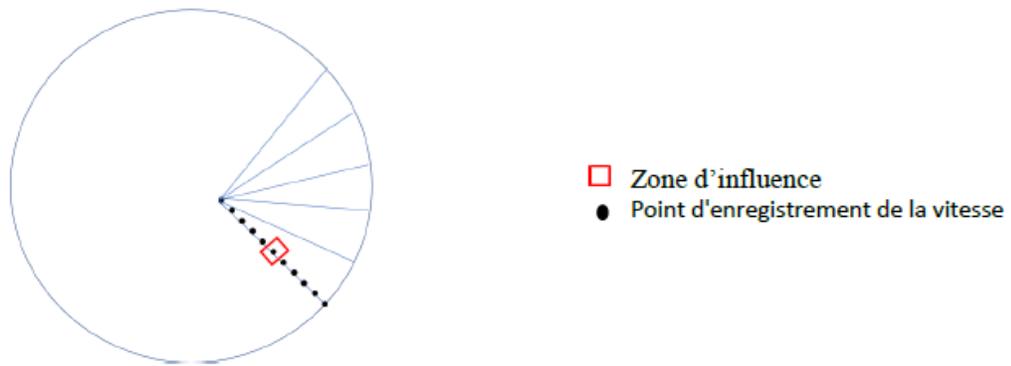


FIGURE 2.29 – Schéma de la modélisation du capteur de surface

- v_i la vitesse au point i ,
- k_i le facteur d'ouverture au point i ,
- n le nombre de points total (ici $10 \cdot 20 = 200$)
- ΔS_i la zone d'influence du point i ($\Delta S_i = r \cdot dr \cdot d\theta$).

Pour modéliser le capteur R15 en réception, la fonction de sensibilité du capteur (figure 2.30) est appliquée au capteur de surface.

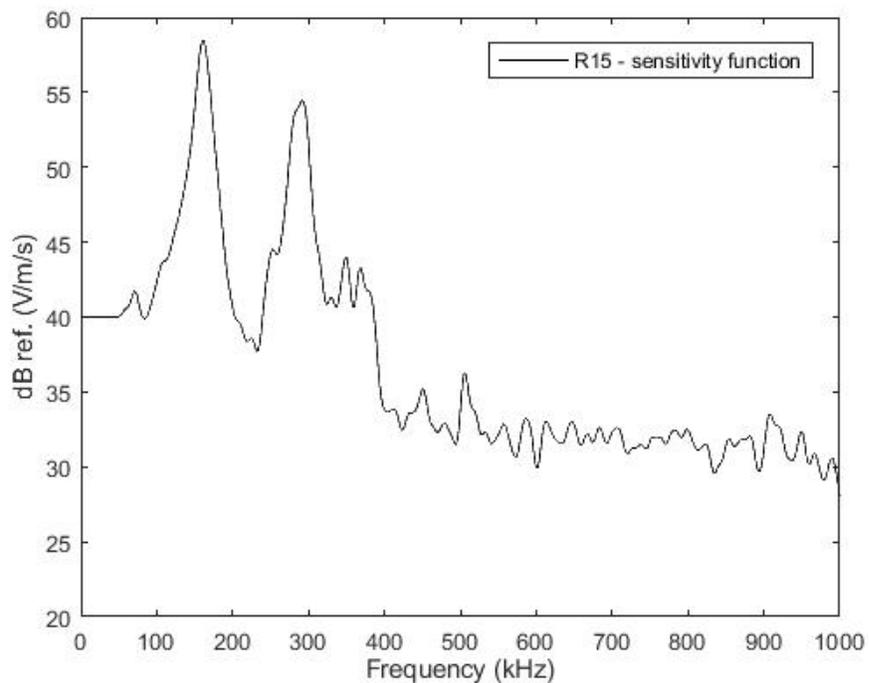


FIGURE 2.30 – Sensibilité en réception du capteur R15 obtenue par calibration sur bloc d'acier à l'aide de la méthode de réciprocité. [125]

2.6 Conclusion

Nous avons défini dans ce chapitre l'ensemble des matériaux utilisés pour la réalisation des éprouvettes ainsi que les défauts simulés dans ces échantillons. Nous avons décrit les essais préliminaires réalisés sur les assemblages acier/composite "mono-plaque" (AC-1P) et béton composite "dallette" (BC-Da) qui ont permis d'effectuer un choix sur la configuration capteur/couplant à utiliser lors des campagnes de mesures, ainsi que les consignes d'émission et de réception pour chaque type d'assemblage.

Nous noterons que les deux types d'assemblage admettent des protocoles assez similaires sauf pour les valeurs des paramètres d'individualisation de salve (PDT, HDT, HLT) et l'amplitude du signal envoyé qui est plus faible dans le cas de l'acier.

Les fiches techniques de l'ensemble des matériaux utilisés dans cette étude sont consultables en annexe, ainsi que les courbes de sensibilité des capteurs utilisés.

Via le protocole de mesure défini, nous avons réalisé 7 séries de mesures indépendantes sur chaque échantillon étudié, avec l'émission et l'acquisition de minimum 10 signaux pour chaque mesure. Les données recueillies à l'issue de ces essais ont été exploitées selon la méthodologie détaillée dans ce chapitre. Cette méthodologie de détection et d'identification des défauts a été mise en oeuvre à partir des données des mesures réalisés sur les échantillons de type "cas d'école" (AC-1P et BC-Da) ; elle est présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC AUX ÉPROUVETTES "MODÈLES"

« La clef de toutes les sciences est sans contredit le point d'interrogation, nous devons la plupart des grandes découvertes au : comment? Et la sagesse dans la vie consiste peut-être à se demander à tout propos : Pourquoi? »

Honoré de Balzac

Sommaire

3.1	Introduction	102
3.2	Méthodologie de diagnostic de l'état de santé d'un joint collé acier/composite (assemblages AC-1P)	103
3.2.1	Évaluation de la répétabilité des mesures sur substrat acier	103
3.2.1.1	Corrélation des signaux collectés sur un même échantillon : analyse dans le domaine temporel	103
3.2.1.2	Analyse de la corrélation dans le domaine fréquentiel	105
3.2.1.3	Comparaison de signaux reçus pour des échantillons différents	106
3.2.2	Proposition d'une méthodologie de détection simple	107
3.2.2.1	Analyse paramétrique pour le capteur n°1 (d = 230 mm)	108
3.2.2.2	Analyse paramétrique des données collectées par le capteur n°2 situé au droit du défaut	110
3.2.2.3	Bilan de l'analyse paramétrique pour la détection des défauts dans un assemblage AC-1P	110
3.2.3	Identification de la nature des défauts dans un assemblage de composite collé sur substrat acier	111
3.2.3.1	Analyse en composantes principales des données	112
3.2.3.2	Classification supervisée (RF) des signaux reçus sur des assemblage AC-1P	114

3.3	Méthodologie de diagnostic de l'état de santé du joint collé composite/béton (assemblages BC-Da)	116
3.3.1	Évaluation de la répétabilité des mesures sur substrat béton	117
3.3.1.1	Corrélation dans le domaine temporel et fréquentiel des signaux enregistrés sur le même échantillon	117
3.3.1.2	Comparaison de signaux enregistrés pour les différents échantillons	118
3.3.2	Détection des défauts par analyse paramétrique	120
3.3.2.1	Analyse paramétrique des données enregistrées par le capteur n°1	120
3.3.2.2	Analyse paramétrique pour la position du capteur n°2	121
3.3.2.3	Bilan de l'analyse paramétrique pour la détection des défauts dans un assemblage BC-Da	122
3.3.3	Identification des défauts dans un assemblage de composite collé sur substrat béton	122
3.3.3.1	Analyse en composantes principales des données collectées sur les assemblages BC-Da	123
3.3.3.2	Classification supervisée des signaux reçus sur les assemblages BC-Da	127
3.4	Conclusion	130

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit les différents échantillons étudiés, leurs dimensions ainsi que les défauts modèles insérés. Nous avons également détaillé le protocole de mesures réalisé sur ces échantillons.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'application d'une méthode de diagnostic pour ces assemblages collés par acousto-ultrasons en vue de détecter et d'identifier de manière robuste tous les types de défauts.

Le chapitre se compose de deux parties : la première traitant les assemblages collés acier/composite (**AC-1P**) constituée de plaque d'acier de 5 mm d'épaisseur sur laquelle une seule plaque de composite d'épaisseur 1.4 mm est collée ; la deuxième partie concernant les assemblages collés béton/composite (**BC-Da**) constitués de dalles en béton de 110 mm d'épaisseur sur lesquelles nous collons une plaque de composite d'épaisseur 1.4 mm.

Dans chaque partie, nous présentons les résultats des traitements réalisés sur les données en vue de détecter et d'identifier tous les défauts modèles. Nous discuterons dans un premier temps sur la répétabilité des mesures qui est primordiale pour proposer une méthode CND fiable. Ensuite, nous aborderons l'analyse des données réalisée à l'aide :

1. d'une analyse mono-paramétrique, méthode simple et intéressante pour une application sur site,
2. d'une classification par analyse en composantes principales (ACP),
3. et d'une classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels.

3.2 Méthodologie de diagnostic de l'état de santé d'un joint collé acier/composite (assemblages AC-1P)

Sur chaque échantillon d'assemblage collé acier-composite mono-plaque (AC-1P), nous avons réalisé sept séries de mesures indépendantes avec un capteur émetteur S9204 et deux capteurs récepteurs R15 placés l'un au centre de l'éprouvette au droit du défaut et l'autre à 230 mm de l'émetteur. Les capteurs sont couplés à l'échantillon avec du phényle salicylate et les configurations et procédures des mesures sont détaillées dans le chapitre précédent.

Dans cette partie, nous aborderons l'aspect de la répétabilité des mesures réalisées sur ces échantillons, puis nous étudierons la capacité de détection et d'identification de l'ensemble des défauts élaborés dans ces assemblages.

3.2.1 Évaluation de la répétabilité des mesures sur substrat acier

Pour disposer d'une méthode de contrôle non destructive robuste et fiable, il convient au préalable de s'assurer de la répétabilité des mesures surtout si l'objectif in-fine est son application sur site. Pour répondre à cette problématique, nous avons réalisé 7 séries de mesures indépendantes par échantillon bien qu'il est tout à fait possible de quantifier la répétabilité ou la reproductibilité d'une même méthode de mesure à partir d'au moins trois séries de mesures par individu [175].

Nous avons évalué la répétabilité de la méthode de mesure via le calcul des coefficients de corrélation temporels et fréquentiels croisés des 70 signaux issus de ces sept séries de mesures (10 tirs par mesure). Ces coefficients de corrélation sont calculés après un pré-traitement des signaux détaillé dans la section 2.5.2 avec l'équation 2.2 de Pearson.

Nous présentons dans cette partie les coefficients dans le domaine temporel puis fréquentiel. Enfin, nous évoquons les distances observées entre les signaux reçus dans des échantillons différents en les comparant aux distances entre signaux reçus dans un même échantillon.

3.2.1.1 Corrélation des signaux collectés sur un même échantillon : analyse dans le domaine temporel

Le calcul des coefficients de corrélation des signaux reçus sur un même échantillon a d'abord été effectué dans le domaine temporel. Le croisement de 70 par 70 signaux donne un total de 2415 coefficients de corrélation par échantillon.

Nous regroupons dans le tableau 3.1 les valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélation observées pour chaque échantillon.

La tendance globale observée sur l'ensemble des échantillons est une valeur moyenne des coefficients de corrélation toujours supérieure à 0.8 pour le capteur n°1 situé à 230mm de l'émetteur. Les valeurs obtenues pour le capteur n°2 situé à 115 mm de l'émetteur au droit du défaut sont

		D = 230 mm	D = 115 mm
		Capteur n°1	Capteur n°2
Sain : type- α	minimum	0.73	0.60
	moyenne	0.88	0.83
Vide centré : type- β 1	minimum	0.63	0.32
	moyenne	0.85	0.60
Tiers vide : type- β 2	minimum	0.60	0.43
	moyenne	0.82	0.70
Souple : type- γ	minimum	0.74	0.65
	moyenne	0.90	0.84
Graisse : type- δ	minimum	0.64	0.58
	moyenne	0.90	0.85

TABEAU 3.1 – Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélations dans le domaine **temporel** pour chaque échantillon **AC-1P**

supérieures à 0.8 sauf en présence d'un défaut de type vide.

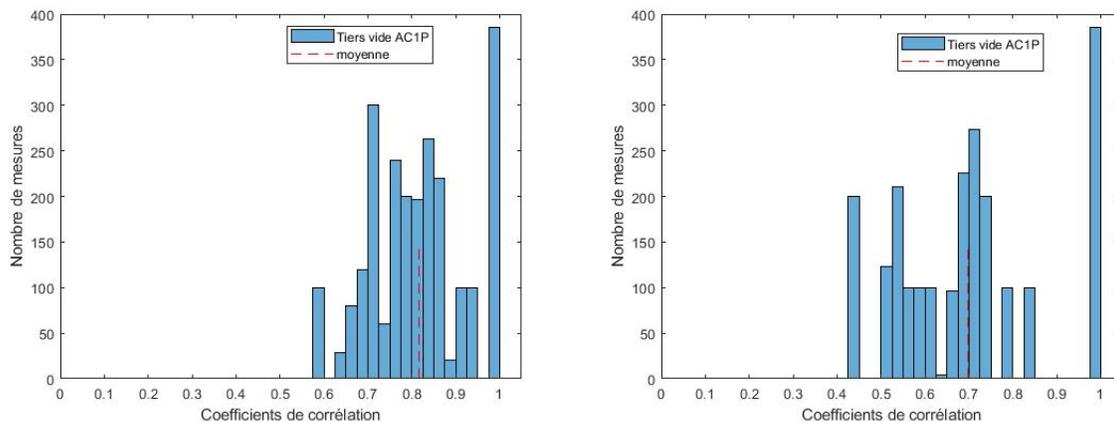


FIGURE 3.1 – Histogrammes de dispersion des coefficients de corrélation **temporels** des signaux reçus dans l'échantillon de type- β 2 pour l'assemblage **AC-1P** : à gauche capteur n°1 (d = 230 mm) et à droite capteur n°2 (d = 115 mm, au droit du défaut)

Sur la figure 3.1, nous représentons la dispersion des 2415 coefficients de corrélation temporels calculés pour les signaux reçus lors des mesures réalisées sur l'échantillon type- β 2. Nous remarquons une variation des coefficients pour la position du capteur n°1 entre 0.6 et 1 avec une moyenne tournant de 0.82. Pour la position du capteur n°2, nous enregistrons les plus faibles valeurs de coefficients de corrélation. Cependant, un petit nombre d'entre elles sont inférieures à 0.5. L'hypothèse expliquant cette variation des mesures est attribué à l'absence de matière qui est susceptible de perturber la propagation du signal. Toutefois, nous notons une moyenne assez élevée dans ce cas, autour de 0.7.

Ces résultats attestent globalement d'une bonne répétabilité des mesures réalisées sur l'échantillon sain AC-1P en comparaison des valeurs de la littérature [170].

3.2.1.2 Analyse de la corrélation dans le domaine fréquentiel

L'histogramme des coefficients de corrélation dans le domaine fréquentiel pour les signaux reçus sur l'échantillon avec un tiers de vide (type- β_2) est représenté sur la figure 3.2. Par comparaison aux valeurs observées sur le domaine temporel, nous remarquons une augmentation de ces coefficients de corrélation qui varient désormais entre 0.83 et 1 pour le capteur n°1, et entre 0.8 et 1 pour le capteur n°2. La tendance est également à la hausse pour les valeurs des co-

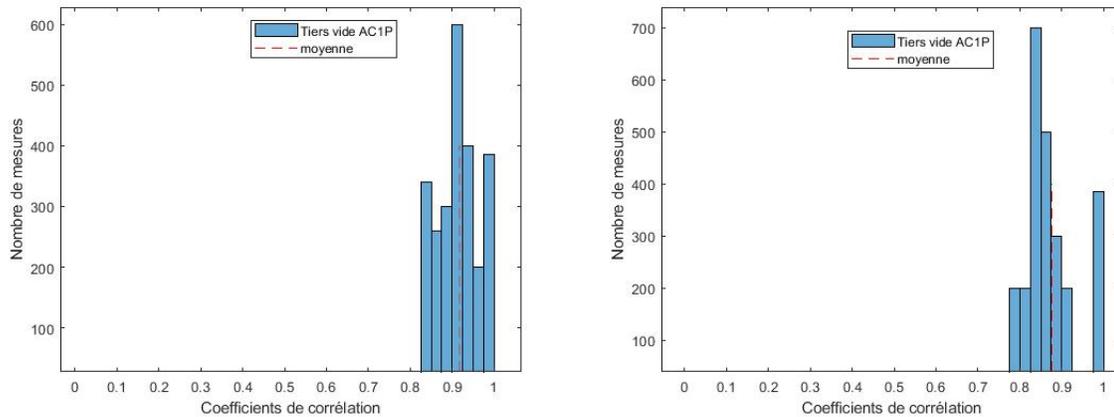


FIGURE 3.2 – Histogrammes de dispersion des coefficients de corrélation **fréquentiels** des signaux reçus dans l'échantillon de type- β_2 de l'assemblage AC-1P : à gauche capteur n°1 et à droite capteur n°2

efficients de corrélations fréquentiels observées pour les autres échantillons (tableau 3.2). Cette hausse des valeurs de coefficient de corrélation s'explique par le fait que le domaine fréquentiel est moins sensible que le domaine temporel aux légères variations. Cependant, les capteurs au droit des défauts de type vide (β_1 et β_2) enregistrent toujours les plus faibles valeurs de coefficients de corrélation avec des moyennes de 0.79 pour β_1 et 0.88 pour β_2 (figure 3.2).

		D = 230 mm Capteur n°1	D = 115 mm Capteur n°2
Sain : type- α	minimum	0.87	0.81
	moyenne	0.94	0.93
Vide centré : type- β_1	minimum	0.85	0.65
	moyenne	0.93	0.79
Tiers vide : type- β_2	minimum	0.83	0.80
	moyenne	0.92	0.88
Souple : type- γ	minimum	0.90	0.88
	moyenne	0.95	0.93
Graisse : type- δ	minimum	0.88	0.84
	moyenne	0.96	0.93

TABLEAU 3.2 – Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélations dans le domaine **fréquentiel** pour chaque échantillon AC-1P

Les valeurs assez élevées des coefficients de corrélation observées dans le domaine temporel comme dans le domaine fréquentiel attestent de la bonne répétabilité des mesures et d'une bonne maîtrise du couplage. En effet, le facteur variant entre les différentes mesures reste la mise en oeuvre du couplage des capteurs par l'opérateur et éventuellement, la variation de la température de la salle (cf section 2.4.1).

3.2.1.3 Comparaison de signaux reçus pour des échantillons différents

Sur les figures 3.3 et 3.4, nous montrons les représentations temps-fréquence des 1000 premières micro-secondes des signaux reçus respectivement par les capteurs n°1 et n°2. Dans cette représentation réalisée avec la méthode de distribution de Pseudo-Wigner-Ville lissé, les signaux reçus sur l'échantillon sain type- α et l'échantillon vide centré type- β 1 sont comparés entre eux.

Nous notons que les représentations des signaux dans le domaine temps-fréquence présentent des différences entre l'échantillon sain et l'échantillon avec défaut principalement pour le capteur n°2. Pour ce capteur situé au droit du défaut de type vide centré (figure 3.4) nous enregistrons une diminution de l'intensité des plus basses fréquences en plus de l'étalement des plus hautes fréquences sur toute la durée du signal.

De manière générale, nous remarquons deux pics fréquentiels, l'un autour de la fréquence de

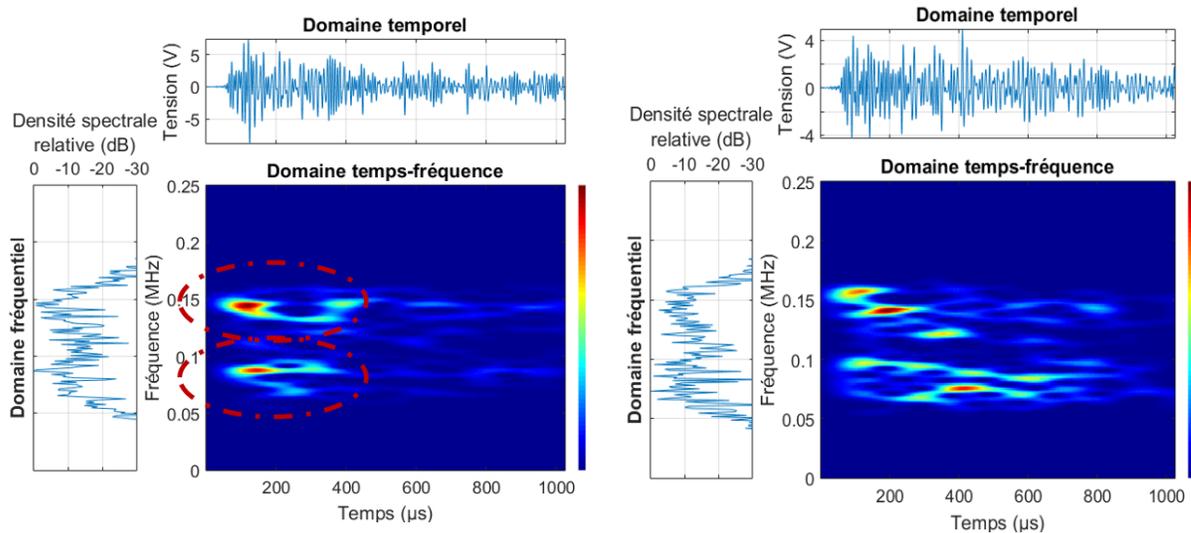


FIGURE 3.3 – Représentation temps fréquence des signaux reçus sur **le capteur n°1** dans les assemblages AC-1P : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon vide centré type- β 1

résonance des capteurs (150 kHz), l'autre aux alentours de 80 kHz. Il semble que la dissipation de cette dernière bande fréquentielle (capteur n°2) ou son décalage dans le temps (capteur n°1), permet de statuer sur la présence ou non de ce type de défaut.

En outre, le calcul des coefficients de corrélation temporels entre signaux reçus sur des échantillons différents lors des trois séries de mesures les plus répétitives par échantillon a été

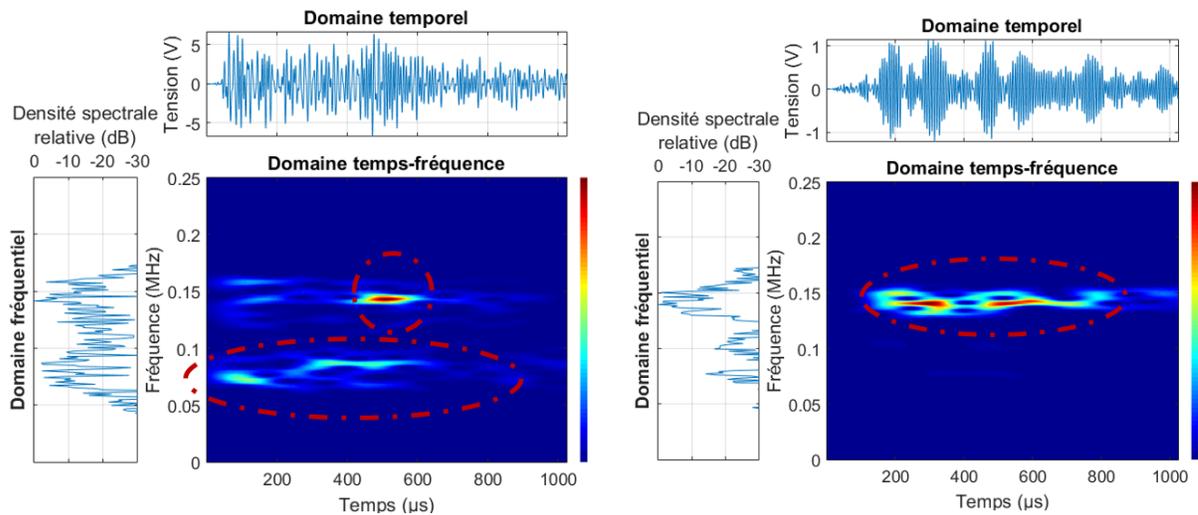


FIGURE 3.4 – Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le **capteur n°2** sur les assemblages **AC-1P** : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon vide centré type- β_1

réalisé pour mettre en évidence les différences observables entre ces signaux. Les valeurs du coefficient de corrélation entre les signaux de l'échantillon sain et les signaux enregistrés à partir de différents échantillons défectueux (première ligne des tableaux 3.3 et 3.4) varient entre plus ou moins 0.29 et 0.49 pour le capteur n°1 et entre 0,19 et 0,34 pour le capteur n°2. La dégradation des valeurs du coefficient de corrélation signifie que la présence du défaut influence les signaux AUS, ce qui est favorable à leur détection. Les coefficients de corrélation entre signaux reçus pour des échantillons défectueux ne sont pas très satisfaisants non plus, ce qui semble révéler un potentiel en terme d'identification de ces défauts.

	α	β_1	β_2	γ	δ
α	0.95	0.37	0.29	0.4	0.49
β_1		0.92	0.31	0.39	0.51
β_2			0.92	0.31	0.36
γ				0.97	0.52
δ					0.94

TABLEAU 3.3 – Valeurs des coefficients de corrélations temporels entre les signaux reçus par le **capteur n°1** pour les différents échantillons **AC-1P**

3.2.2 Proposition d'une méthodologie de détection simple

Une première méthode de diagnostic simple est proposée : une analyse paramétrique qui consiste en une comparaison des paramètres (descripteurs du tableau 2.8) extraits des signaux. Cette comparaison est faite par position de capteur et est représentée sous forme de diagramme en boîte afin d'apprécier la dispersion des données sur les 7 séries de mesures réalisées par échantillon.

	α	β_1	β_2	γ	δ
α	0.94	0.19	0.21	0.34	0.29
β_1		0.65	0.34	0.3	0.26
β_2			0.83	0.25	0.27
γ				0.91	0.31
δ					0.94

TABLEAU 3.4 – Valeurs des coefficients de corrélations temporels entre les signaux reçus par le **capteur n°2** pour les différents échantillons **AC-1P**

3.2.2.1 Analyse paramétrique pour le capteur n°1 (d = 230 mm)

À la position du capteur n°1 (figure 2.17) placé à 230 mm de l'émetteur, les signaux reçus ont interagi avec le défaut qui est situé au centre des deux capteurs piézoélectriques (l'émetteur et le récepteur). L'étude de cette position de capteur est d'autant plus intéressante que sur site la localisation du défaut est supposée être inconnue.

Les valeurs enregistrées pour l'échantillon sain représentent les valeurs de référence. Les paramètres présentant une différence de 20% entre les valeurs observées sur l'échantillon sain et les valeurs observées sur au moins un des échantillons avec des défauts sont dits les plus "pertinents". Au vu de nos résultats, les paramètres les plus pertinents présentés sur la figure 3.5 sont la durée (a2), la force du signal (a4), l'énergie absolue (a5) et le nombre de coups (a6).

Paramètres	Valeurs de référence (α)	Écart à la référence			
		β_1	β_2	γ	δ
a2 - Durée (μ s)	14918	20%	15%	49%	49%
a4 - Force du signal (pV.s)	$2.6 * 10^7$	33%	14%	54%	58%
a5 - Énergie absolue (aJ)	$3.7 * 10^7$	55%	14%	60%	67%
a6 - Nombre de coups	1153	25%	18%	46%	54%
a10 - Fréquence pic (Khz)	137	43%	39%	21%	8%

TABLEAU 3.5 – Valeurs moyennes des paramètres de l'échantillon sain, échantillon de référence et variation des paramètres des échantillons avec défauts des assemblages **AC-1P** pour la position du **capteur n°1**

Le critère de détection que nous nous sommes fixé avec cette méthode est une différence d'au moins 20% entre moyennes observées par paramètre sur l'échantillon sain et l'échantillon avec défaut. Cette différence est calculée avec l'équation 2.3. Les descripteurs qui arrivent à respecter ce critère sur au moins un des défaut sont répertoriés dans le tableau 3.5.

Nous remarquons sur cette figure 3.5 que les défauts de cohésion de type γ et les défauts d'adhésion de type δ sont bien détectables avec les descripteurs du domaine temporel proposés. Par exemple, nous observons une différence de 67% entre les valeurs moyennes des énergies absolues observées pour l'échantillon sain et l'échantillon avec de la graisse à l'interface composite-adhésif et de 60% pour l'échantillon contenant de la colle souple polyuréthane en son centre. Les défauts de type vide sont plus ou moins détectables avec ces descripteurs selon leur taille. Le défaut de type β_1 est facilement détectable avec le nombre de coups, la durée, l'énergie absolue

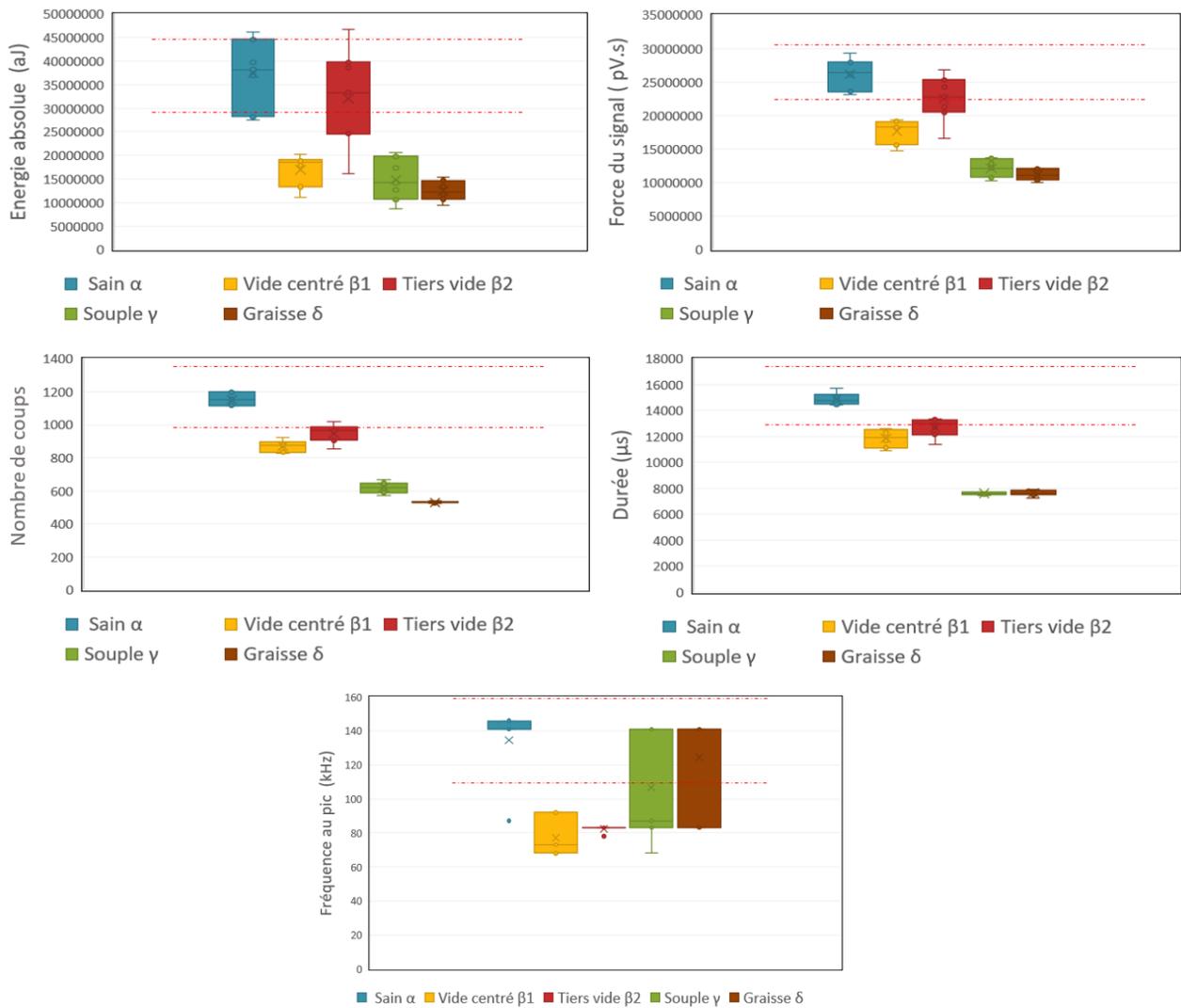


FIGURE 3.5 – Analyse des paramètres **a2**, **a4**, **a5** et **a6** des signaux reçus par le **capteur n°1** sur les échantillons **AC-1P**

et la force du signal pour le critère considéré. Toutefois, le défaut β_2 de taille plus importante, est plus difficile à détecter avec les descripteurs du domaine temporel.

La détection des défauts de type vide (β_1 et β_2) ne semble réellement satisfaisante qu'en utilisant le descripteur fréquence pic comme paramètre de comparaison. Les basses fréquences centrées autour de 80 kHz sont très sensibles à la présence de vide comme nous l'avons montré précédemment sur les figures 3.3 et 3.4. Ceci pourrait expliquer le rôle important que joue ce paramètre dans la détection des défauts de type vide.

Toutefois, nous notons que pour le défaut d'adhésion (différence de 8% observée) ou le défaut de cohésion (différence de 21% observée) ce paramètre du domaine fréquentiel n'est pas pertinent. En effet, le spectre fréquentiel des signaux reçus sur ces deux types d'échantillons montre la présence de deux pics majeurs (autour de 150 kHz et de 80 kHz).

3.2.2.2 Analyse paramétrique des données collectées par le capteur n°2 situé au droit du défaut

Le capteur n°2 est placé au droit du défaut comme illustré sur la figure 2.17. Cette position de capteur nous permet de mesurer l'effet direct de la présence du défaut sur le signal à son centre. Comme pour le capteur n°1, notre objectif premier est de proposer une méthodologie de diagnostic simple et facilement adaptable sur site. Sur la figure 3.6, nous représentons les paramètres les plus pertinents.

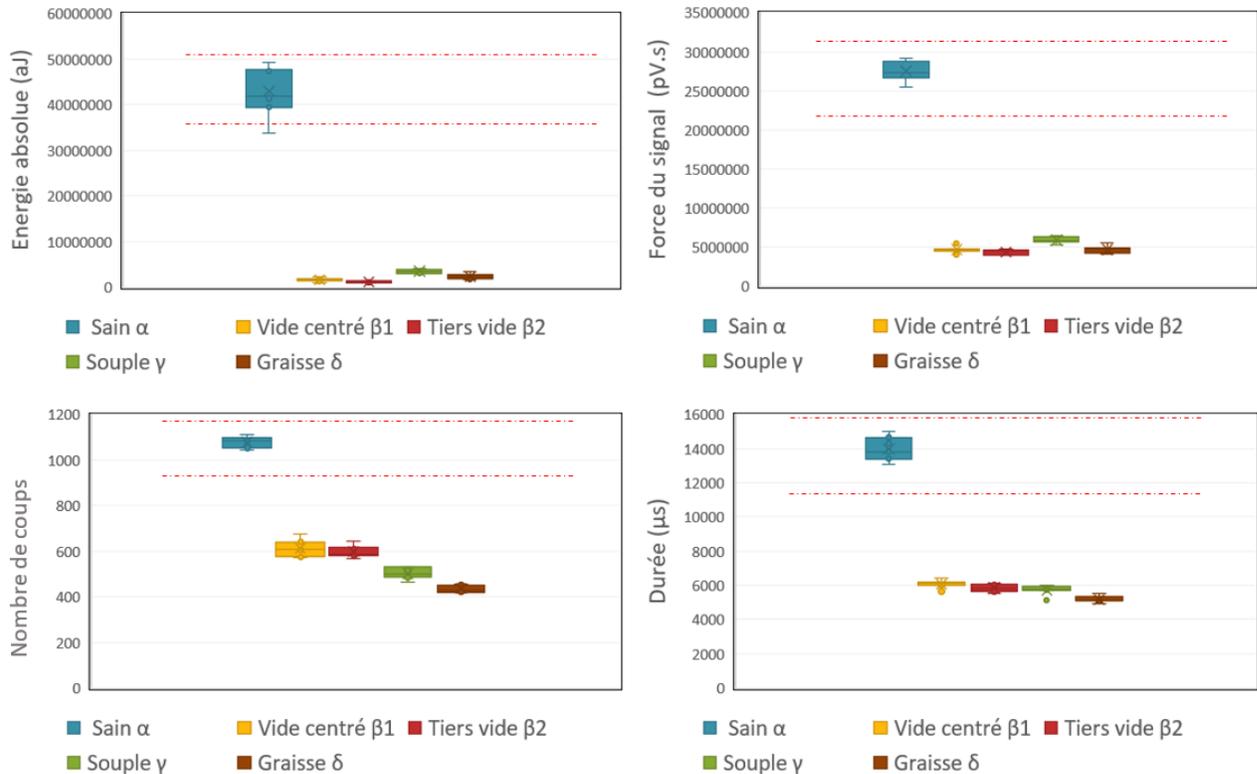


FIGURE 3.6 – Analyse des paramètres **a2**, **a4**, **a5** et **a6** des signaux reçus par le **capteur n°2** sur les échantillons **AC-1P**

Nous remarquons qu'au droit des défauts, le signal est fortement atténué. Ainsi, avec le critère de détection d'une différence de 20% que nous nous sommes fixé et les paramètres choisis, nous arrivons à détecter facilement l'ensemble des défauts étudiés. En guise d'illustration, nous pouvons citer le paramètre d'énergie absolue où nous avons des différences de valeurs moyennes variant entre 92% et 97% (tableau 3.6).

3.2.2.3 Bilan de l'analyse paramétrique pour la détection des défauts dans un assemblage AC-1P

La détection de l'ensemble des défauts étudiés dans un assemblage AC-1P semble possible avec une analyse mono-paramétrique.

La détection est également facilitée à l'épicentre du défaut, ce qui donne de bonnes perspectives

Paramètres	Valeurs de référence (α)	Écart à la référence			
		$\beta 1$	$\beta 2$	γ	δ
a2 - Durée (μ s)	13989	57%	58%	59%	63%
a4 - Force du signal (pV.s]	$2.8 * 10^7$	83%	84%	79%	83%
a5 - Énergie absolue (a]	$4.3 * 10^7$	96%	97%	92%	95%
a6 - Nombre de coups	1080	43%	45%	53%	60%
a9 - Barycentre fréquentiel (Khz)	134	17%	19%	-4%	4%

TABLEAU 3.6 – Valeurs moyennes des paramètres de l'échantillon sain, échantillon de référence et variation des paramètres des échantillons avec défauts des assemblages AC-1P pour la position du capteur n°2

pour une localisation du défaut sur site. Pour cela, un système de mesures mobile devrait bien sûr être envisagé avec un éventuel traitement en temps réel des données.

Nous remarquons également que l'interaction de certains défauts tels que les vides avec le signal qui les traverse se manifeste davantage dans le domaine fréquentiel avec une diminution de l'amplitude des plus basses fréquences au droit de ces défauts et leur amplification à 230 mm de l'émetteur. Ceci rend le descripteur fréquence pic satisfaisant pour les détecter pour la position du capteur n°1. Les autres types de défauts (défauts d'adhésion et de cohésion) ont tendance à atténuer le signal dans le domaine temporel surtout au droit du défaut.

Ainsi, le choix du paramètre à visualiser pour la détection dépend du type de défaut recherché ce qui offre de bons potentiels pour l'identification des défauts (en tout cas en ce qui concerne la distinction des vides par rapport aux autres types de défauts).

Pour procéder à une identification de la nature des défauts, une analyse multi-paramètres de type analyse par composantes principales ou algorithme de classification est présentée dans les sections suivantes.

3.2.3 Identification de la nature des défauts dans un assemblage de composite collé sur substrat acier

La détection de la présence d'un défaut semble possible avec une méthode paramétrique simple sur ce type d'assemblage (AC-1P). Toutefois, cette méthode à elle seule est insuffisante pour déterminer la nature du défaut. Or dans un projet PHM (*Prognostics and health management*), la phase "diagnostic" nécessite une détection puis une identification du défaut afin de pouvoir juger de sa sévérité et de faciliter le pronostic [138].

Durant cette thèse, nous avons exploré deux pistes pour l'identification des défauts :

- une Analyse en Composantes Principales (ACP),
- une classification supervisée utilisant les outils de l'intelligence artificielle : un algorithme de classification par forêt d'arbres décisionnels (RF pour *Random Forest*).

3.2.3.1 Analyse en composantes principales des données

L'ACP décrite dans la section 1.4 est utilisée pour ce type d'assemblage en première approche pour identifier les défauts. Ainsi, les données reçues des 7 séries de mesures réalisées sur l'ensemble des échantillons ont été traitées en différenciant les positions des capteurs n°1 (à 230 mm de l'émetteur) et n°2 (à 115 mm de l'émetteur, au droit du défaut). Nous utilisons les 10 paramètres listés dans le tableau 2.8 pour cette analyse.

3.2.3.1.1 Analyse des données reçues par le capteur n°1

Pour cette ACP, nous avons choisi trois composantes principales (CP) pour respecter le critère de part d'inertie de 80%. En effet, comme on peut le voir sur la figure 3.7 à gauche, la première composante principale englobe 52% de la part d'inertie totale tandis que la deuxième composante principale et la troisième composante principale englobent respectivement 26% et 12% de la part d'inertie totale.

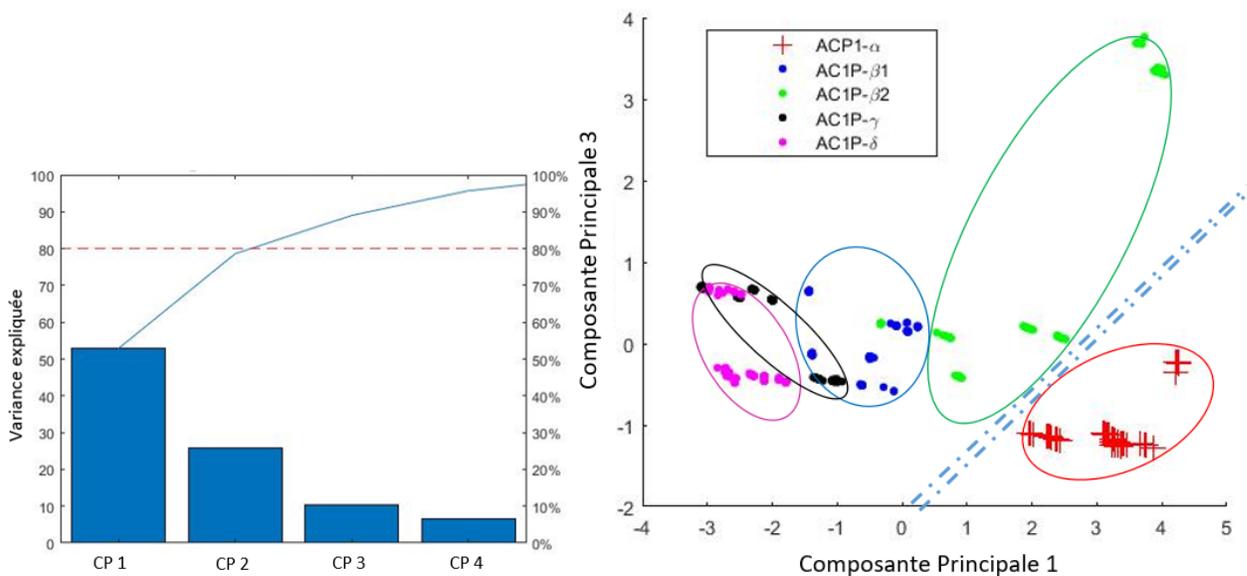


FIGURE 3.7 – Résultats de l'analyse en composantes principales pour les signaux reçus par le **capteur n°1** sur les assemblages **AC-1P** : à gauche répartition des parts d'inerties par CP, à droite représentation des signaux dans le plan CP1/CP3

Les signaux, sur la figure 3.7, sont représentés sous forme de croix rouges pour ceux reçus de l'échantillon sain, et sous forme de points pour ceux reçus des échantillons avec un défaut. La figure 3.7 représentant les données dans le plan CP1/CP3 met en évidence que les signaux reçus dans l'échantillon de référence (type- α) sont discernables de ceux formés par les signaux reçus dans les échantillons avec un défaut.

L'identification des défauts est moins évidente au vu des recouvrements observés entre les clusters des signaux de type- γ et de type- δ . Toutefois, le regroupement des clusters de type- β est satisfaisant puisqu'il s'agit des mêmes types de défaut mais de taille différente.

De manière générale, nous notons qu'il est difficile de positionner une frontière facilement exploitable entre les différents clusters. Pour cette position, l'ACP ne semble pas réussir à identifier nettement les défauts.

3.2.3.1.2 Analyse des données reçues par le capteur n°2

La même méthodologie est appliquée pour la classification par ACP des signaux reçus par le capteur n°2 placé au droit du défaut.

Dans ce cas, nous avons comptabilisé avec les deux premières composantes principales une part d'inertie totale de 82% comme nous pouvons le voir sur la figure 3.8. Par conséquent, nous représentons les signaux reçus sur ce capteur suivant ces deux premières CP.

Sur la figure 3.8, nous remarquons que le cluster formé par les signaux reçus sur l'échantillon

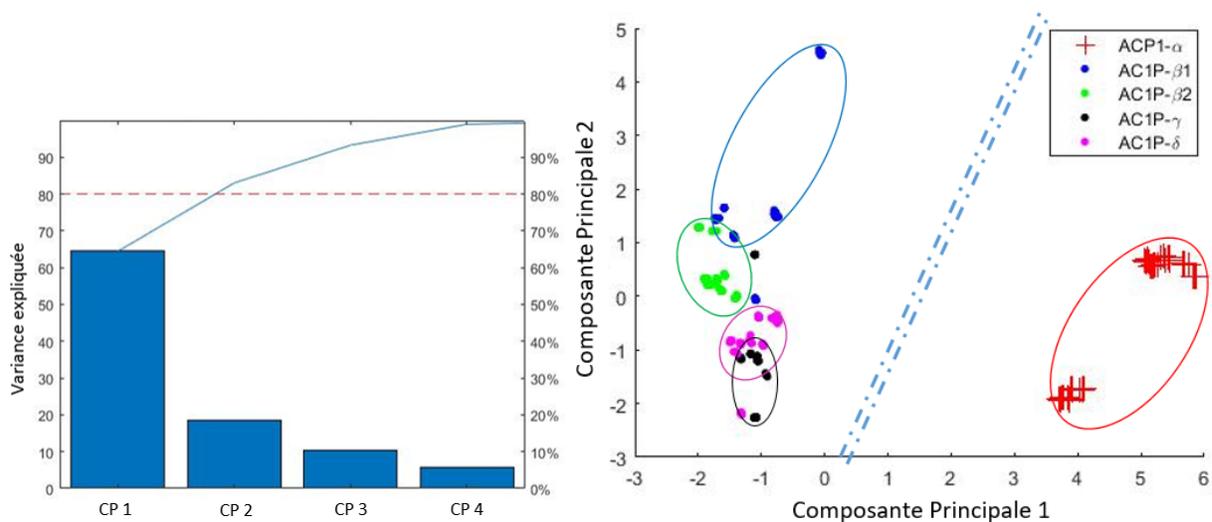


FIGURE 3.8 – Résultats de l'analyse en composantes principales pour les signaux reçus par le capteur n°2 sur les assemblages AC-1P : à gauche répartition des parts d'inerties par CP, à droite représentation des signaux dans le plan CP1/CP2

de type- α est bien discernable des autres clusters. Ceci est cohérent avec la bonne détection de l'ensemble des défauts étudiés.

Nous remarquons également un regroupement des clusters de la même typologie de défauts, notamment les clusters type- β 1 et type- β 2.

3.2.3.1.3 Bilan de l'ACP pour les signaux reçus sur les assemblages AC-1P

De manière générale nous constatons que, sur les résultats des ACP réalisées séparément par position de capteur, pour ce type d'assemblage, la détection des défauts est très satisfaisante avec cette méthodologie, mais que leur identification n'est pas facilement réalisable.

En effet, pour les deux positions de capteur, les clusters des signaux reçus sur l'échantillon de type- α (croix rouges) sont séparés de ceux des signaux reçus sur les échantillons présentant des

défauts. Ainsi, en utilisant un critère simple de délimitation des frontières, nous pouvons envisager une excellente détection de tous les défauts étudiés.

Toutefois, les clusters formés par les signaux reçus sur les échantillons présentant des défauts ne peuvent pas être distingués nettement les uns des autres.

L'identification des défauts n'a pu être réalisée avec cette méthodologie pour ce type d'assemblage. Nous évaluons dans la suite le potentiel offert par l'utilisation d'un algorithme de classification supervisée avec les méthodes de l'intelligence artificielle comme les forêts d'arbres décisionnels pour identifier les défauts pour ce type d'assemblage.

3.2.3.2 Classification supervisée (RF) des signaux reçus sur des assemblage AC-1P

Cette classification est réalisée en utilisant l'algorithme de classification de la forêt d'arbres décisionnels développé par *Breiman* [161]. Pour cela, nous avons utilisé un logiciel développé au laboratoire MATEIS, sous Matlab, RFCAM [88].

Des matrices formées des signaux en ligne (par les paramètres qui les décrivent en colonne) constituent les données d'entrée dans RFCAM. Nous pouvons ainsi envisager deux stratégies de classification : l'une utilisant les données de descripteurs extraits du logiciel AEWin de Mistras (tableau 2.8), et l'autre les descripteurs recalculés à partir des formes d'ondes numérisées (tableau 2.9).

Dans les deux stratégies adoptées, la classification s'est faite sans distinction de la position des capteurs.

Les données des sept séries de mesures indépendantes réalisées sur les assemblages AC-1P sont d'abord récupérées sous forme de matrice avec les 10 descripteurs fournis par Mistras en colonne.

Les 4 premières séries de mesures sur chaque échantillon ont servi à générer le modèle constitué de 100 arbres de décisions, avec un choix aléatoire de 3 descripteurs sur chaque noeud.

Les données des trois séries de mesures restantes (5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème}) sont utilisées pour tester le modèle.

Dans le tableau 3.7, nous représentons les résultats de classement par vote majoritaire (VM) et vote sécuritaire à 60% (VS60).

Les taux de reconnaissances et d'erreurs liés à cette classification sont consignés dans le tableau 3.8.

Nous constatons de manière globale que les signaux sont majoritairement bien classés avec des taux de reconnaissance de 100% pour les signaux issus des échantillons de type- α (sans défaut) et de type- γ (défaut de cohésion). Pour les autres types d'échantillon, nous enregistrons un taux de reconnaissance par vote majoritaire entre 82 et 88%.

La prise de décision à l'aide du vote sécuritaire ne permet de labéliser le signal que si le pourcentage d'arbres votant pour la classe est supérieur à un seuil de 60%. L'utilisation de cette règle de vote permet de conforter la prise de décision, mais conduit toutefois au rejet des quelques

		Classe Sain		Classe Vide centré		Classe Tiers vide		Classe Colle souple		Classe Graisse	
		VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60
Essais à classer	type α	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-
	type $\beta 1$	-	-	56	44	-	-	8	-	-	-
	type $\beta 2$	-	-	11	-	53	53	-	-	-	-
	type γ	-	-	-	-	-	-	66	66	-	-
	type δ	-	-	-	-	-	-	11	11	53	42

TABEAU 3.7 – Résultats de classification par forêt d’arbres décisionnels des données **Mistras** pour les signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages **AC-1P**

		Vote majoritaire		Vote sécuritaire à 60%		
		Taux de reconnaissance	Taux d’erreur	Taux de reconnaissance	Taux d’erreur	Taux de rejet
Essais	type α	100%	0%	100%	0%	0%
	type $\beta 1$	88%	12%	69%	0%	31%
	type $\beta 2$	82%	17%	83%	0%	17%
	type γ	100%	0%	100%	0%	0%
	type δ	83%	17%	62%	21%	17%

TABEAU 3.8 – Taux de reconnaissance et d’erreur de la classification des données **Mistras** des signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages **AC-1P**

signaux qui ne satisfont pas ce critère. Ainsi, nous notons pour cette classification des taux de rejet allant jusqu’à 31%.

Mis à part les signaux de type- δ pour lesquels nous avons une augmentation du taux d’erreur pour cette règle, tous les autres signaux sont bien classés avec des taux d’erreur nuls.

À l’aide du logiciel Cosmos développé à MATEIS [88] [176], nous calculons sur chaque signal numérisé un ensemble de 22 descripteurs listés dans le tableau 2.9.

Le tableau 3.9 regroupe le résultat de classification, et le tableau 3.10 présente les différents taux d’erreur et de reconnaissance correspondants.

Ces tableaux montrent que le passage par la forme d’onde des signaux n’est que légèrement satisfaisant pour ce type d’assemblage. En effet, nous notons une amélioration du degré d’identification des signaux issus des échantillons de type- δ pour les deux règles de vote. Toutefois, nous remarquons une augmentation des taux de rejet jusqu’à 53%.

La classification supervisée par forêt d’arbres décisionnels semble satisfaisante pour les deux

		Classe Sain		Classe Vide centré		Classe Tiers vide		Classe Colle souple		Classe Graisse	
		VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60
Essais à classer	type α	63	57	-	-	-	-	-	-	-	-
	type $\beta 1$	-	-	42	30	22	-	-	-	-	-
	type $\beta 2$	10	-	-	-	43	40	11	-	-	-
	type γ	-	-	-	-	-	-	55	43	11	-
	type δ	-	-	-	-	-	-	-	-	64	61

TABLEAU 3.9 – Résultats de classification par forêt d’arbres décisionnels des données recalculées sur les formes d’ondes pour les signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-1P

		Vote majoritaire		Vote sécuritaire à 60%		
		Taux de reconnaissance	Taux d’erreur	Taux de reconnaissance	Taux d’erreur	Taux de rejet
Essais	type α	100%	0%	89%	0%	11%
	type $\beta 1$	66%	34.4%	47%	0%	53%
	type $\beta 2$	67%	32.8%	63%	0%	37%
	type γ	83%	16.7%	65%	0%	35%
	type δ	100%	0%	95%	0%	5%

TABLEAU 3.10 – Taux de reconnaissance et d’erreur de la classification des données recalculées sur les formes d’ondes pour les signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-1P

stratégies de classification adoptées avec des taux de reconnaissance élevés.

Quelques erreurs de classification ont été enregistrées dans les deux cas. Toutefois, la prise de décision sur le label des signaux est dans tous les cas possible avec une règle de vote majoritaire, décisions qui peuvent être validées par le vote sécuritaire SV60.

3.3 Méthodologie de diagnostic de l’état de santé du joint collé composite/béton (assemblages BC-Da)

Sur les échantillons d’assemblage béton-composite (BC-Da), nous avons réalisé sept séries de mesures indépendantes suivant le protocole défini dans la section 2.3.2. Ainsi, une disposition des capteurs comme illustrée sur la figure 2.17 a été adoptée, avec en émission un capteur S9204, et deux capteurs R15 en réception. Le couplant utilisé pour les coupler aux échantillons est du phényle salicylate.

3.3.1 Évaluation de la répétabilité des mesures sur substrat béton

3.3.1.1 Corrélation dans le domaine temporel et fréquentiel des signaux enregistrés sur le même échantillon

Nous résumons dans le tableau 3.11 les valeurs moyennes et minimales observées pour les coefficients de corrélation calculés dans le domaine temporel.

Nous observons de très bonnes valeurs pour les coefficients de corrélation temporels, qui varient de manière générale entre 0.6 et 1 avec des moyennes autour de 0.85 exception faite des signaux enregistrés par le capteur n°2 lorsque ce dernier est placé au droit des défauts de type- β (vide centré et tiers vide).

Les coefficients de corrélation temporels calculés pour le substrat béton sont du même ordre de grandeur que ceux calculés pour le substrat acier (tableau 3.1) avec les valeurs les plus faibles observées pour le capteur placé au droit des vides.

Nous regroupons dans le tableau 3.12 les valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélation fréquentiels observées sur chaque échantillon.

On constate que ces valeurs ont nettement augmenté par rapport aux valeurs de coefficients de corrélation dans le domaine temporel. Elles varient entre 0.8 et 1 avec des moyennes autour de 0.95, ce qui représente de très bons résultats pour apprécier la distance faible entre ces signaux et donc la bonne répétabilité des mesures.

En somme, les valeurs observées pour les coefficients de corrélation temporels et fréquentiels nous permettent d'attester de la bonne répétabilité des mesures.

		D = 230 mm	D = 115 mm
		Capteur n°1	Capteur n°2
Sain : type- α	minimum	0.68	0.78
	moyenne	0.86	0.93
Vide centré : type- β 1	minimum	0.81	0.49
	moyenne	0.91	0.76
Tiers vide : type- β 2	minimum	0.62	0.42
	moyenne	0.84	0.74
Souple : type- γ	minimum	0.66	0.77
	moyenne	0.82	0.93
Graisse : type- δ	minimum	0.57	0.70
	moyenne	0.82	0.92

TABLEAU 3.11 – Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélations dans le domaine **temporel** pour chaque échantillon **BC-Da**

		D = 230 mm	D = 115 mm
		Capteur n°1	Capteur n°2
Sain : type- α	minimum	0.88	0.90
	moyenne	0.94	0.97
Vide centré : type- β 1	minimum	0.94	0.81
	moyenne	0.97	0.91
Tiers vide : type- β 2	minimum	0.88	0.75
	moyenne	0.94	0.88
Souple : type- γ	minimum	0.83	0.88
	moyenne	0.92	0.95
Graisse : type- δ	minimum	0.79	0.89
	moyenne	0.91	0.96

TABLEAU 3.12 – Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélations **fréquentiels** pour chaque échantillon **BC-Da** par position de capteur

3.3.1.2 Comparaison de signaux enregistrés pour les différents échantillons

Dans cette section, nous présentons la comparaison entre signaux reçus pour des échantillons BC-Da sain et avec défaut.

Une première visualisation des signaux dans le domaine temporel, fréquentiel puis temps-fréquence révèle des différences notoires entre signaux reçus sur des échantillons différents. Sur les figures 3.9 et 3.10, nous représentons pour chaque position de capteur les signaux reçus sur les échantillons sain de référence et de type- δ (défaut d'adhésion) dans le domaine temporel, fréquentiel, et temps-fréquence par la distribution de Pseudo-Wigner-Ville lissé.

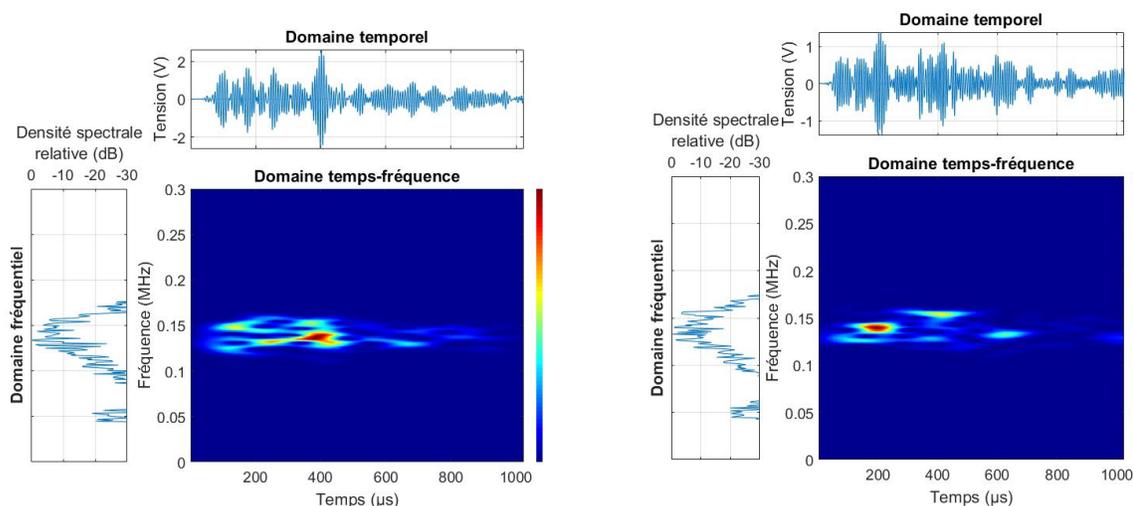


FIGURE 3.9 – Représentation temps fréquence des signaux reçus sur **le capteur n°1** dans les assemblages **BC-Da** : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon avec de la graisse type- δ

En ce qui concerne la position du capteur n°1 situé à 230 mm de l'émetteur (figure 3.9), nous remarquons une apparition tardive du pic en fréquence, environ 136 kHz pour l'échantillon de

type- α , qui n'intervient qu'à partir de 400 μ s alors que pour le cas de l'échantillon de type- δ elle intervient au bout de 200 μ s à environ 130kHz.

Le spectre fréquentiel n'est pas très différent pour ces deux signaux, néanmoins nous remarquons des différences notables dans le domaine temporel quant à l'intensité des signaux et l'agencement des trains d'onde.

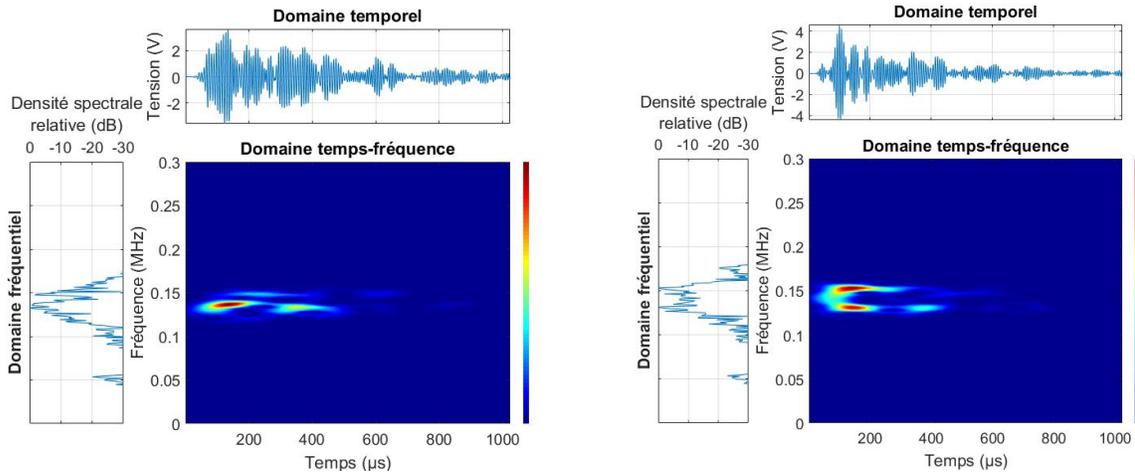


FIGURE 3.10 – Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°2 sur les assemblages BC-Da : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon avec de la graisse type- δ

Pour la position du capteur n°2 qui est au droit du défaut (figure 3.10), la variation des signaux dans le domaine temporel est plus importante. Nous obtenons une différence remarquable sur le spectre fréquentiel avec la présence d'un second pic à 152 kHz pour le signal reçu sur l'échantillon de type- δ .

Les différences observées sur ces signaux reçus dans des échantillons différents apparaissent également dans les coefficients de corrélation dans le domaine temporel moyennés sur un calcul entre les signaux reçus lors des trois séries de mesures les plus répétitives pour chaque échantillon (tableaux 3.13 et 3.14).

	α	β_1	β_2	γ	δ
α	0.91	0.31	0.46	0.32	0.28
β_1		0.94	0.3	0.33	0.3
β_2			0.95	0.37	0.34
γ				0.87	0.31
δ					0.91

TABLEAU 3.13 – Valeurs des coefficients de corrélations dans le domaine temporel entre signaux reçus pour différents échantillons BC-Da par le capteur n°1

Le résultat de ce calcul montre une dégradation des valeurs de coefficients de corrélation temporels comparés à leurs valeurs lorsque les signaux sont reçus du même échantillon (tableau 3.11). En effet, ces coefficients se situent entre 0.28 et 0.46 pour la position du capteur n°1 et 0.29

	α	β_1	β_2	γ	δ
α	0.92	0.29	0.46	0.34	0.31
β_1		0.91	0.27	0.36	0.31
β_2			0.9	0.31	0.33
γ				0.86	0.30
δ					0.79

TABLEAU 3.14 – Valeurs des coefficients de corrélations dans le domaine temporel entre signaux reçus pour différents échantillons **BC-Da** par le **capteur n°2**

et 0.46 pour la position du capteur n°2. Ce résultat révèle le potentiel qu’offre la technique des AUS à détecter voir identifier les défauts dans le joint de colle.

3.3.2 Détection des défauts par analyse paramétrique

3.3.2.1 Analyse paramétrique des données enregistrées par le capteur n°1

Pour les sept séries de mesures réalisées par échantillon, nous avons comparé les valeurs moyennes observées pour chaque paramètre ainsi que leur dispersion. Les résultats obtenus avec les paramètres les plus pertinents sont présentés sur la figure 3.11.

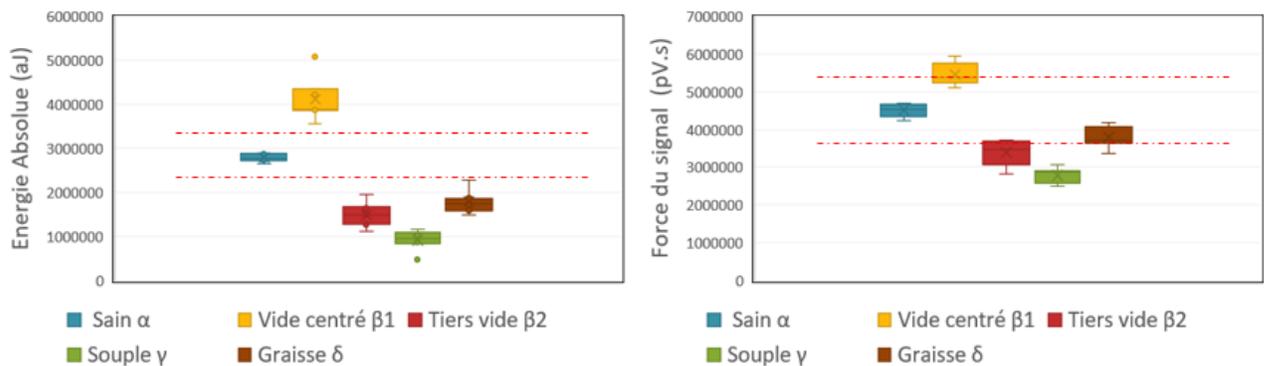


FIGURE 3.11 – Analyse des paramètres **a4 et a5** des signaux reçus par le **capteur n°1** sur les échantillons **BC-Da**

Le critère proposé dans le chapitre 2 pour une détection fiable du défaut est que la différence entre deux valeurs moyennes calculée avec l'équation 2.3 soit supérieure à 20%. Pour une différence comprise entre 10% et 20% le défaut est peu détectable, et non détectable si elle est inférieure à 10%.

Au vu des résultats de cette étude paramétrique présentée sur la figure 3.11, avec l'énergie absolue comme descripteur de comparaison, les boîtes correspondantes aux signaux reçus dans les échantillons avec défauts sont toutes hors des frontières des plus ou moins 20% (pointillés en rouge) de la moyenne observée sur les signaux reçus dans l'échantillon sain.

En somme, tous les défauts étudiés semblent détectables avec ce paramètre. En guise d'illustration, le plus faible écart observé pour ce paramètre est de 36% entre les signaux de l'échantillon

sain et ceux de l'échantillon avec un défaut d'adhésion de type- δ .

La force du signal permet de bien distinguer le défaut de type- γ (défaut de cohésion) et les défauts de type- β (vides) dans une moindre mesure.

Nous renseignons dans le tableau 3.15 les différences des valeurs moyennes calculées pour les paramètres les plus pertinents (a4 et a5) entre les échantillons avec défauts et l'échantillon sain.

Paramètres	Valeurs de référence (α)	Écart à la référence			
		$\beta 1$	$\beta 2$	γ	δ
a4 - Force du signal (pV.s)	$4.5 * 10^6$	-21%	25%	39%	16%
a5 - Énergie absolue (aJ)	$2.8 * 10^6$	-48%	47%	67%	36%

TABLEAU 3.15 – Valeurs moyennes des paramètres de l'échantillon sain, échantillon de référence et variation des paramètres des échantillons avec défauts des assemblages BC-Da pour la position du capteur n°1

3.3.2.2 Analyse paramétrique pour la position du capteur n°2

La méthodologie de diagnostic pour la détection des défauts par analyse paramétrique a été également appliquée pour les signaux reçus sur le capteur n°2 placé au droit du défaut.

Sur la figure 3.12 nous présentons les résultats obtenus pour les paramètres les plus pertinents.

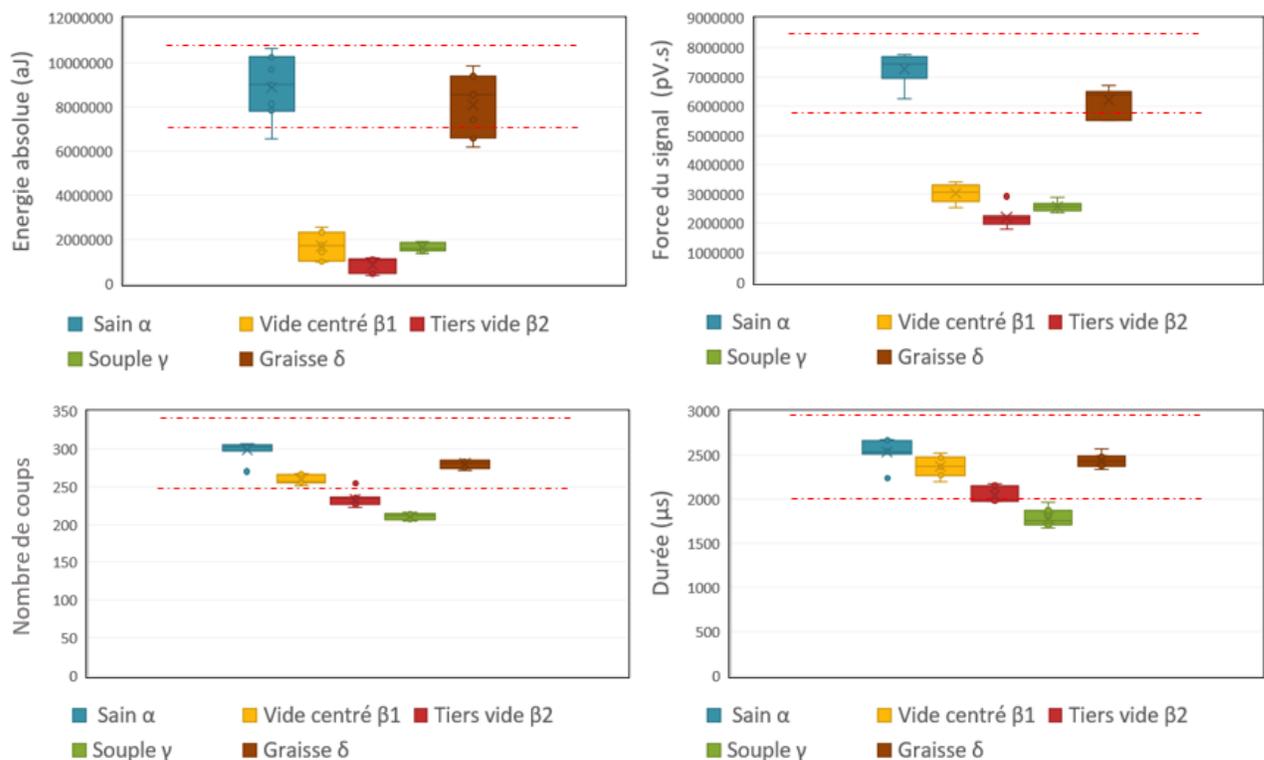


FIGURE 3.12 – Analyse des paramètres a2, a4, a5 et a6 des signaux reçus par le capteur n°2 sur les échantillons BC-Da

Selon le critère de détection que l'on s'est fixé, tous les défauts sont détectables pour cette position de capteur exception faite du défaut de type- δ . Pour ce dernier nous notons que, pour tous les paramètres considérés, sa valeur moyenne est comprise entre les deux pointillés rouge qui sont les limites de la détection.

En effet, dans le tableau 3.16 regroupant les différences calculées pour chaque échantillon, l'écart le plus important enregistré pour le défaut d'adhésion est de 14% lorsqu'on considère le paramètre a4 comme comparateur.

Paramètres	Moyennes dans α	Différences à α			
		$\beta 1$	$\beta 2$	γ	δ
a2 - Durée (μ s)	2539	7%	19%	30%	4%
a4 - Force du signal (pV.s)	$7.3 * 10^6$	58%	70%	64%	14%
a5 - Énergie absolue (aJ)	$8.9 * 10^6$	81%	90%	81%	9%
a6 - Nombre de coup	299	13%	22%	29%	6%

TABLEAU 3.16 – Valeurs moyennes des paramètres de l'échantillon sain, échantillon de référence et variation des paramètres des échantillons avec défauts des assemblages **BC-Da** pour la position du **capteur n°2**

Lorsque le capteur est situé au droit du défaut, nous remarquons généralement une atténuation du signal due à la présence du défaut exception faite pour le défaut d'adhésion (δ). Cette atténuation permet avec le critère simple que l'on s'est imposé (différence de 20%) de détecter aisément les vides ($\beta 1$ et $\beta 2$) et le défaut de cohésion (γ) à l'aide de l'énergie du signal.

3.3.2.3 Bilan de l'analyse paramétrique pour la détection des défauts dans un assemblage BC-Da

Une analyse paramétrique a été proposée pour sa simplicité et donc sa bonne faculté à être exportée sur site. Elle a révélé pour les mesures réalisées sur les assemblages collés béton-composite une bonne détection des défauts, exception faite du défaut d'adhésion pour le capteur n°2.

Généralement, nous remarquons que l'énergie absolue est le paramètre le plus sensible à la présence du défaut. Il peut jouer le rôle d'indicateur. Pour ce type d'assemblage, le défaut d'adhésion est le plus difficile à détecter pour les deux positions de capteurs.

Les paramètres identifiés pertinents pour les substrats acier ne le sont pas forcément pour ce type d'assemblage. Ce résultats semblent montrer la difficulté de généraliser la solution pour tous les types d'assemblage.

3.3.3 Identification des défauts dans un assemblage de composite collé sur substrat béton

Avec l'analyse paramétrique, le défaut d'adhésion reste peu détectable pour la position du capteur n°2. De plus, cette méthode seule ne permet pas de statuer sur l'identité du défaut diag-

nostiqué d'où l'intérêt de recourir aux méthodes multi-paramétriques : une analyse par composantes principales ou un algorithme de classification par forêt d'arbres décisionnels.

3.3.3.1 Analyse en composantes principales des données collectées sur les assemblages BC-Da

La classification non supervisée pour les signaux reçus sur les assemblages BC-Da est menée via une analyse par composantes principales (ACP) décrite dans la section 1.4.

À cet effet, les données reçues des 7 séries de mesures réalisées sur l'ensemble des échantillons composant ces assemblages ont été traitées en différenciant les positions des capteurs n°1 (placé à 230 mm de l'émetteur) et n°2 (placé à 115 mm de l'émetteur, au droit du défaut).

3.3.3.1.1 Classification non supervisée des signaux reçus par le capteur n°1

Avant de procéder à l'ACP, la matrice constituée des signaux reçus pour cette position de capteur a été réduite et centrée selon la méthodologie détaillée en chapitre 2.

Dix paramètres calculés via le logiciel Aewin de Mistras ont été retenus pour décrire ces signaux. Ces descripteurs sont listés dans le tableau 2.8.

Le choix du nombre de composantes principales (CP) est basé sur un critère de part d'inertie minimale de 80%. Pour cette position de capteur, trois composantes principales sont nécessaires, ce qui correspond à une part d'inertie de 90% comme illustré à gauche de la figure 3.13.

L'objectif de l'ACP étant de regrouper au mieux les signaux ayant la même origine en clusters, nous présentons sur la droite de la figure 3.13 le plan constitué des CP1 et CP2 pour lequel, la distinction est optimale.

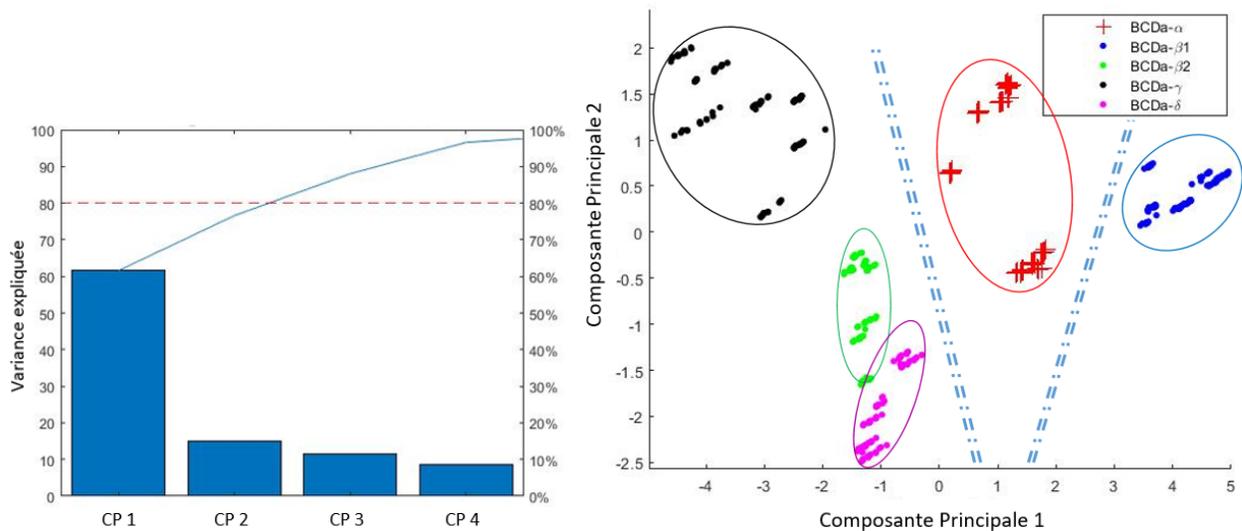


FIGURE 3.13 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le capteur n°1 sur les assemblages BC-Da : à gauche répartition des parts d'inerties par CP, à droite représentation des signaux suivant les CP1 et CP2

Ce résultat (figure 3.13) met en évidence une bonne distinction des signaux enregistrés en

présence de défauts de ceux collectés sur l'éprouvette de référence. L'identification de la nature du défaut semble prometteuse hormis pour les défauts $\beta 2$ et δ .

En d'autres termes, pour cette position de capteur, il semble possible d'identifier l'ensemble des défauts étudiés en utilisant cette méthodologie. Il reste à définir une frontière plus nette entre les défauts d'adhésion et de tiers vide.

3.3.3.1.2 Classification non supervisée des signaux reçus par le capteur n°2

Nous avons reconduit la méthodologie précédente sur les signaux reçus par le capteur n°2 qui se situe au centre de l'éprouvette, au droit des défauts.

Dans ce cas de figure, nous avons pu nous limiter à deux CP pour obtenir une part d'inertie de 86% (figure 3.14 à gauche) suffisante pour valider notre choix.

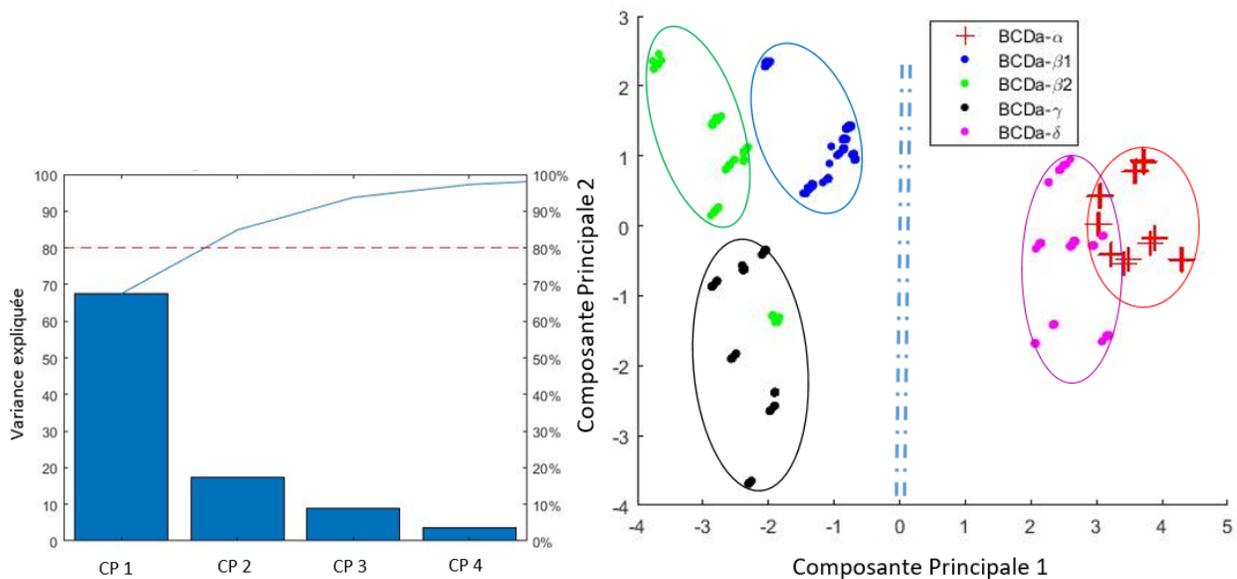


FIGURE 3.14 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le **capteur n°2** sur les assemblages **BC-Da** : à gauche répartition des parts d'inerties par CP, à droite représentation des signaux suivant les CP1 et CP2

Nous notons ici (figure 3.14 à droite) une distinction entre le cluster formé des signaux reçus dans l'échantillon sain de type- α et les clusters formés des signaux reçus dans les échantillons avec défauts. Toutefois, il existe une proximité non négligeable des clusters des signaux de type- δ et de type- α . Cette première analyse corrobore les résultats de la détection par analyse paramétrique étudiée dans la section précédente.

Les clusters formés des signaux reçus dans les échantillons avec défauts sont bien discernables entre eux. Nous pouvons conclure dès lors que l'ACP montre un bon potentiel pour la bonne identification de l'ensemble des défauts étudiés lorsque le capteur est placé au droit du défaut.

3.3.3.1.3 Bilan de l'ACP des signaux reçus sur les assemblages BC-Da

La méthodologie d'identification par ACP proposée semble être satisfaisante pour ce type d'assemblage collé (Béton-composite). En effet, nous pouvons, pour les deux positions de capteur, établir des plans exploitables pour l'identification de tous les défauts étudiés en distinguant les clusters que forment leurs signaux entre eux.

Cette analyse peut être plus approfondie à ce stade en cherchant une représentation simplifiée du plan des deux composantes principales où on a une plus grande distinction entre clusters. Cette simplification peut se faire via une réduction des variables qui forment par combinaison linéaire les CP en cherchant à conserver celles qui ont plus de poids sur ces CP.

Ensuite, un regroupement des données des deux capteurs est évoqué pour augmenter la robustesse de la méthodologie.

3.3.3.1.3.1 Réduction des variables de l'ACP

Afin d'optimiser l'analyse pour une éventuelle application sur site, nous avons cherché à obtenir les mêmes séparations des clusters des signaux par type de défaut en réduisant les variables de l'ACP. Pour ce faire, nous avons utilisé les résultats de l'ACP pour définir une relation entre les descripteurs grâce aux cercles de corrélation qui représentent leurs poids suivant les composantes principales. Puis, une sélection des deux descripteurs les plus discriminants et portant majoritairement les deux premières composantes principales est réalisée sur la base de deux règles :

- On conçoit que deux descripteurs sont fortement corrélés lorsque le degré de corrélation qui correspond au cosinus de l'angle β les séparant (voir figure 3.15) est supérieur à 95%. Le descripteur qui sera retenu entre les deux est celui qui a un plus grand poids dans la combinaison linéaire composant les deux axes.
- Les descripteurs pour lesquels les distances entre les différentes mesures observées lors de l'analyse paramétrique sont faibles ou inexistantes seront peu ou pas discriminants dans l'ACP. Ils seront plus proches du centre du cercle et nous pourrons ainsi les retirer.

Dans l'exemple de la figure 3.15, le descripteur choisi pour porter l'axe des abscisses est le barycentre fréquentiel (*C-FRQ*) et celui choisi pour porter l'axe des ordonnées est le nombre de coups au pic (*PCNTS*).

Dans le cas des ACP réalisées pour les assemblages BC-Da, pour les deux positions de capteur, nous répertorions dans le tableau 3.17 les poids normalisés des variables sur les composantes principales correspondantes aux plans présentés sur les figures 3.13 et 3.14.

L'analyse du tableau 3.17 nous révèle que pour les deux positions de capteur, les premières composantes principale (CP1) sont majoritairement portées par les paramètres a_3 , a_4 et a_5 et les deuxièmes composantes principales (CP2) portées par les paramètres a_7 et a_8 (en vert dans le tableau). Ces descripteurs pourront être les seuls conservés pour une représentation simplifiée des clusters.

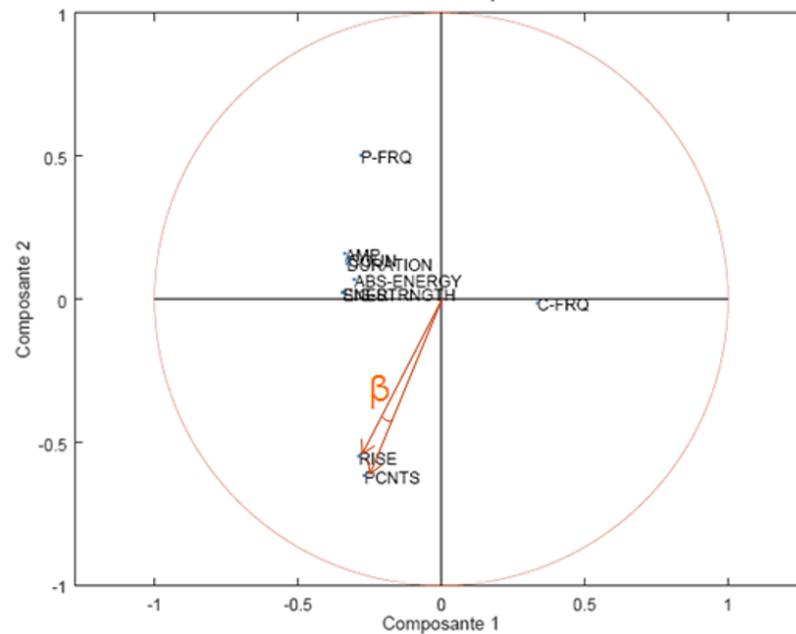


FIGURE 3.15 – Exemple de cercle de corrélation des paramètres du signal d'une ACP

	Capteur n°1		Capteur n°2	
	CP1	CP2	CP1	CP2
a1 - Amplitude (<i>dB</i>)	0.35	0.04	0.34	-0.10
a2 - Durée (μ s)	0.34	0.16	0.31	0.32
a3 - Énergie (μ V.s/ <i>coup</i>)	0.37	0.02	0.38	0.01
a4 - Force du signal (<i>pV.s</i>)	0.37	0.02	0.38	0.01
a5 - Énergie absolue (<i>aJ</i>)	0.37	0.07	0.37	-0.04
a6 - Nombre de coups	0.34	0.30	0.35	0.25
a7 - Temps de montée (μ s)	-0.24	0.62	-0.24	0.55
a8 - Nombre de coups au pic	-0.24	0.61	-0.26	0.51
a9 - Barycentre fréquentiel (<i>kHz</i>)	-0.29	-0.10	-0.32	-0.35
a10 - Fréquence pic (<i>kHz</i>)	-0.19	-0.32	-0.02	-0.39

TABLEAU 3.17 – Poids normalisés des descripteurs pour les composantes principales CP1 et CP2 pour les données reçues sur les échantillons BC-Da

Les paramètres a3, a4 et a5 sont très corrélés ainsi que le sont les paramètres a7 et a8. La forte corrélation entre deux paramètres nous permet de n'en conserver qu'un sans risquer une perte d'information majeure sur la séparation des clusters observée sur les plans des ACP.

Nous pouvons ainsi faciliter la représentation des données en représentant les signaux suivant les paramètres a4 (force du signal en *pV.s*) et a7 (temps de montée en μ s) (figure 3.16).

Nous noterons que cette répartition des signaux reçus pour chaque échantillon n'est pas éloignée de celle observée sur les figures 3.13 et 3.14. Ainsi, nous parvenons avec deux descripteurs à proposer un plan montrant le potentiel de détection de l'ensemble des défauts recherchés et une identification plus ou moins facile en fonction de la position du capteur.

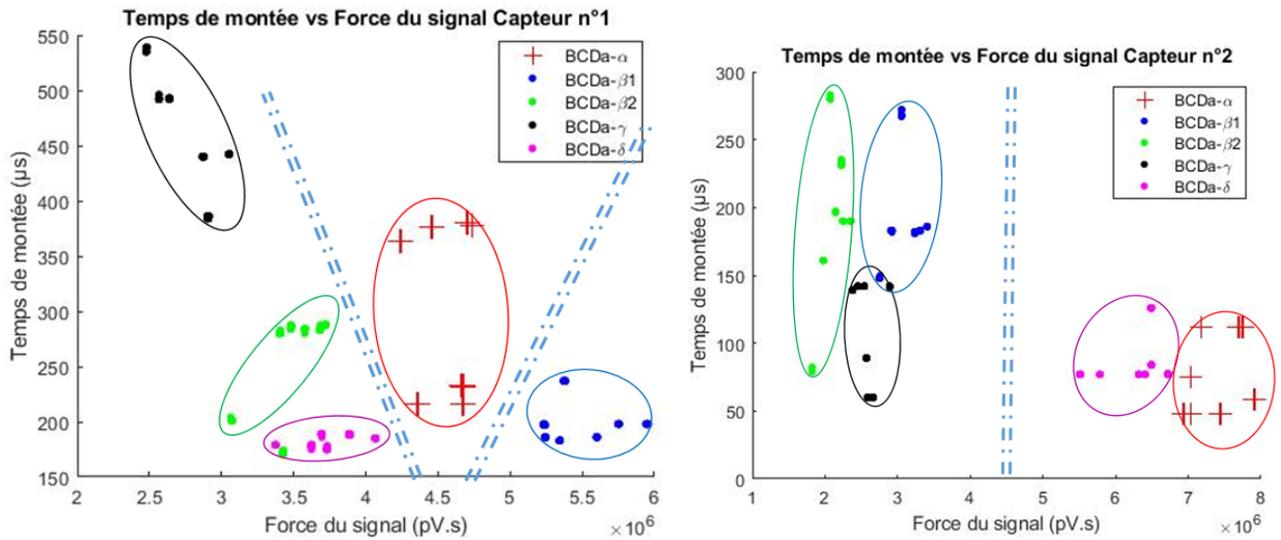


FIGURE 3.16 – Représentations dans un plan 2D [Temps de montée (μs) , Force du signal (pV.s)] des signaux reçus pour les différents assemblages BC-Da : à gauche capteur n°1 et à droite capteur n°2

Cette réduction des variables pourrait être un compromis entre l’analyse paramétrique et l’ACP alliant la simplicité de l’un et l’efficacité de l’autre quant à l’identification des défauts.

3.3.3.1.3.2 Combinaison des données sur les deux positions de capteur

La combinaison des données des signaux reçus pour les deux positions de capteur est motivée par une quête de robustesse de la méthodologie.

À cet effet, nous réalisons une ACP où les données des signaux reçus pour les deux positions de capteur sont fusionnées. Nous représentons sur la figure 3.17 le plan formé par les deux premières composantes principales.

Nous remarquons que les clusters formés de signaux reçus sur les mêmes échantillons mais à des positions de capteur différentes ne sont pas regroupés. Ce résultat souligne les limites de la méthodologie traitant simultanément les données des deux positions de capteur.

Pour augmenter la robustesse de la méthodologie d’identification, il est envisagé de recourir à l’algorithme de classification par forêt d’arbres décisionnels afin de combiner les données des deux capteurs pour l’apprentissage.

3.3.3.2 Classification supervisée des signaux reçus sur les assemblages BC-Da

La seconde méthodologie d’identification proposée est une classification supervisée par forêt d’arbres décisionnels suivant deux stratégies évoqués en amont : l’une admettant comme données d’entrée les descripteurs extraits de AEWIN et l’autre les descripteurs recalculés à partir des formes d’ondes.

Lors des sept séries de mesures réalisées sur les assemblages BC-Da, les quatre premières ont servi à la génération de 100 arbres et les trois séries de mesures restantes ont servi à tester le mo-

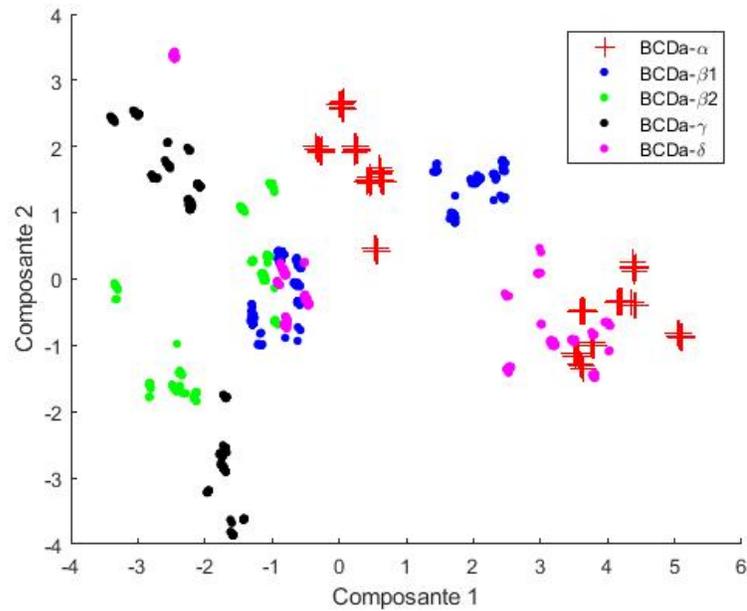


FIGURE 3.17 – Représentation de la répartition suivant le plan formé des CP1 et CP2 des signaux reçus sur les assemblages **BC-Da** pour les deux positions de capteur

dèle. Sur chaque noeud d'arbre, nous programmons un choix aléatoire de 3 ou 4 descripteurs qui participeront à la génération des branches.

Dans le tableau 3.18, nous présentons les résultats de la classification (classification à partir des descripteurs d'AEWIN) des signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur chaque échantillon suivant les deux règles de votes établies dans le chapitre 2 : une règle de vote majoritaire (VM) et une règle de vote sécuritaire à 60% (VS60).

		Classe Sain		Classe Vide centré		Classe Tiers vide		Classe Colle souple		Classe Graisse	
		VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60
Essais à classer	type α	96	76	-	-	-	-	1	-	1	1
	type β1	-	-	106	62	-	-	-	-	-	-
	type β2	-	-	-	-	74	58	-	-	-	-
	type γ	-	-	-	-	-	-	104	77	-	-
	type δ	-	-	-	-	20	-	-	-	72	66

TABEAU 3.18 – Résultats de classification par forêt d'arbres décisionnels des données extraites d'AEWIN pour les signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages **BC-Da**

Nous noterons que les signaux reçus sur l'ensemble des échantillons testés sont essentiellement rangés dans leur classe respective. Les signaux reçus de l'échantillon de type-δ ont enregistré les moins bons résultats en considérant la règle de vote majoritaire avec 20 signaux

rangés dans la classe "tiers vide" plutôt que dans la classe "graisse".

Ces 20 signaux représentent 22% des signaux reçus de l'échantillon de type- δ comme on peut le voir dans le tableau 3.19 regroupant les taux de reconnaissance et taux d'erreur observés durant cette classification.

D'une manière générale, nous avons pour la règle de vote majoritaire, de bons taux de recon-

		Vote majoritaire		Vote sécuritaire à 60%		
		Taux de reconnaissance	Taux d'erreur	Taux de reconnaissance	Taux d'erreur	Taux de rejet
Essais	type α	94%	6%	75%	1%	24%
	type $\beta 1$	100%	0%	58%	0%	42%
	type $\beta 2$	100%	0%	78%	0%	22%
	type γ	100%	0%	74%	0%	26%
	type δ	78%	22%	72%	0%	28%

TABLEAU 3.19 – Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données extraite d'AEWIN pour les signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages BC-Da

naissance variant entre 78% et 100% pour cette stratégie de classification. Ce résultat permet de prendre une décision sur la labélisation des signaux.

L'application de la règle de vote sécuritaire nous permet de ne pas prendre en considération certains classements si le pourcentage d'arbres votant n'atteint pas le seuil fixé (égal à 60% dans ce cas). Cette faculté qu'offre cette règle nous permet d'éliminer les erreurs de classification; c'est le cas notamment pour les 20 signaux évoqués précédemment rangés dans la classe "tiers vide" plutôt que dans la classe "graisse".

La seconde stratégie de classification proposée utilise comme données d'entrée pour le logiciel RFCAM les 22 descripteurs calculés à partir des formes d'ondes par le logiciel Cosmos (tableau 2.9). Les résultats de cette classification sont répertoriés dans le tableau 3.20 pour les deux règles de prise de décision.

Nous remarquons ici que les erreurs de classification sont plus récurrentes que dans la première stratégie de classification. En guise d'illustration, nous avons pour le vote majoritaire 12 signaux rangés dans la classe 'graisse" alors qu'ils proviennent de l'échantillon sain de type- α . Ce résultat est mis en lumière dans le tableau 3.10 regroupant les taux de bonne reconnaissance et d'erreur observés pour cette stratégie de classification.

L'objectif de la seconde stratégie de classification est de pouvoir intégrer par le calcul des descripteurs qui ne sont pas pris en compte dans AEwin. Nous notons cependant que contrairement au cas du substrat acier, ce changement de stratégie de classification n'est pas tout à fait satisfaisant pour le substrat béton.

Toutefois, comme pour la première stratégie, nous notons que les taux de reconnaissance déterminés nous permettent de prendre une décision de labélisation correcte même avec le vote

		Classe Sain		Classe Vide centré		Classe Tiers vide		Classe Colle souple		Classe Graisse	
		VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60
Essais à classer	type α	90	72	-	-	-	-	1	-	12	10
	type $\beta 1$	-	-	106	57	-	-	-	-	-	-
	type $\beta 2$	-	-	-	-	74	73	-	-	-	-
	type γ	-	-	-	-	-	-	104	80	-	-
	type δ	-	-	-	-	27	-	-	-	65	49

TABLEAU 3.20 – Résultats de classification par forêt d’arbres décisionnels des données calculées à partir des formes d’ondes pour les signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages BC-Da

		Vote majoritaire		Vote sécuritaire à 60%		
		Taux de reconnaissance	Taux d’erreur	Taux de reconnaissance	Taux d’erreur	Taux de rejet
Essais	type α	88%	12%	71%	10%	19%
	type $\beta 1$	100%	0%	54%	0%	46%
	type $\beta 2$	100%	0%	99%	0%	1%
	type γ	100%	0%	77%	0%	23%
	type δ	71%	29%	53%	0%	47%

TABLEAU 3.21 – Taux de reconnaissance et d’erreur de la classification des données calculées à partir des formes d’ondes pour les signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages BC-Da

majoritaire. En somme, nous pouvons conclure que l’ensemble des défauts étudiés sont identifiés avec succès via cette méthodologie.

3.4 Conclusion

Ce chapitre présente l’exploitation des résultats obtenus lors de la mise en place de la méthodologie d’auscultation par acousto-ultrasons sur des assemblages modèles. Ces assemblages sont constitués des matériaux classiquement rencontrés dans le génie civil *i.e.* des plaques d’acier (AC-1P) et des dalles en béton (BC-Da) sur lesquelles on a collé une plaque de composite. Chaque type d’échantillon correspond à un état de santé : un état sain dit de type- α et quatre états défectueux ($\beta 1$, $\beta 2$, γ et δ). Sept séries de mesures indépendantes ont été réalisées sur chaque échantillon pour deux positions de capteur différentes.

La répétabilité des mesures a été validée par le calcul des coefficients de corrélation temporels et fréquentiels croisés entre signaux reçus dans un même échantillon et par position de capteur. Les résultats ont montré des valeurs de coefficients très élevées avec des moyennes supérieures à 0.7 pour la plupart. Nous noterons que la répétabilité des mesures a été plus sa-

tisfaisante dans le cas du substrat béton.

Nous avons également constaté une décroissance significative des valeurs de coefficients de corrélation temporels lorsqu'ils mesurent la distance entre deux signaux reçus dans des échantillons différents. Ce dernier aspect des résultats est mis en avant lors de la visualisation des signaux dans le domaine temporel, fréquentiel et temps-fréquence.

La méthodologie de diagnostic proposée consiste en deux volets : une première partie concernant la détection des défauts et une seconde leur identification. Pour la détection des défauts, une analyse paramétrique a été proposée basée sur la comparaison des valeurs moyennes observées par paramètres sur les signaux reçus dans les différents échantillons avec celles de l'échantillon de référence. La simplicité de cette méthodologie permet une utilisation simple sur site ou en industrie. Toutefois, il convient de déterminer pour chaque type de substrat et pour le défaut recherché, le paramètre le plus pertinent pour effectuer cette comparaison. Nous avons, dans notre cas, réalisé cette analyse en comparant les 10 paramètres fournis directement par le logiciel d'acquisition des signaux (AEWin).

L'énergie absolue est parfois suffisante pour détecter la quasi totalité des défauts pour les deux types de substrats. Toutefois, la détection du défaut de type- β_2 ("tiers vide") pour le substrat acier nécessite l'utilisation du paramètre fréquence au pic comme comparateur. Dans l'ensemble, tous les défauts sur les deux substrats sont détectables pour la position du capteur n°1 (à 230 mm de l'émetteur) et leur détection s'accroît pour la position du capteur n°2 qui est au droit du défaut hormis pour le défaut de type- δ (défaut d'adhésion) sur le substrat béton.

Pour l'identification des défauts, une première méthodologie est basée sur une analyse en composantes principales qui a pour objectif de représenter les signaux sur le plan des deux composantes principales formées par la combinaison linéaire des 10 paramètres qui décrivent les signaux. Cette représentation doit être la plus pertinente possible, c'est à dire permettre la meilleure distinction des clusters formés par les signaux reçus d'un même échantillon.

Dans cette optique, nous avons réalisé des ACP par position de capteur pour les différents substrats et avons observé une bonne séparation des clusters formés par les signaux reçus sur échantillons sains des clusters formés par les signaux reçus sur échantillons défectueux. Ce résultat corrobore la détection de l'ensemble des défauts déterminée en analyse paramétrique. Pour le substrat béton, nous remarquons que les clusters des signaux reçus sur échantillons défectueux sont distincts entre eux, ce qui ne fut pas forcément le cas pour le substrat acier. En d'autres termes, nous arrivons à identifier aisément l'ensemble des défauts étudiés dans le cas des substrats en béton et dans une moindre mesure pour l'acier.

L'analyse a été approfondie pour le substrat béton en proposant une méthodologie annexe de réduction des variables des plans d'ACP qui permettent une bonne identification des défauts. Cette méthodologie annexe comprend la détermination des poids des variables pour chaque composante principale, puis la sélection des variables les plus discriminantes pour l'axe considéré. Cette méthodologie s'est avérée efficace car nous retrouvons les mêmes répartitions des clusters dans les plans réduits que dans les plans initiaux des ACP.

Une seconde méthode pour l'identification des défauts a été proposée consistant en une

classification des signaux utilisant un algorithme de forêt d'arbres décisionnels. L'utilisation de cette seconde méthodologie nous permet à travers les outils de l'intelligence artificielle de s'affranchir de la position du capteur en fusionnant les données collectées par les deux capteurs. Nous avons généré des forêts d'arbres de décision avec une partie des données des mesures, l'autre partie ayant servi à tester le modèle.

Pour les deux types de substrat, nous obtenons des taux de reconnaissance assez élevé avec le vote majoritaire permettant une prise de décision correcte sur la labélisation des signaux. Le vote sécuritaire à un seuil de 60% permet de s'affranchir de quelques erreurs de classification mais avec des taux de rejet qui peuvent être assez significatifs (jusqu'à 54%).

La méthodologie de diagnostic proposée semble adéquate pour les deux types de substrats pour la détection et l'identification de l'ensemble des défauts étudiés. Toutefois, il est nécessaire d'élargir son application aux éprouvettes acier/composite "multi-plaque" (AC-3P) et béton/composite "poutre" (BC-Po) afin d'évaluer sa robustesse et ses limites.

CHAPITRE 4

ÉVALUATION DES LIMITES DE LA MÉTHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC PROPOSÉE POUR DES ASSEMBLAGES D'ÉCHELLE PLUS IMPORTANTE

« Si l'on considérait une théorie comme parfaite, et si on cessait de la vérifier par l'expérience scientifique, elle deviendrait une doctrine. »

Claude Bernard

Sommaire

4.1	Introduction	135
4.2	Évaluation de l'effet de la proximité d'un assemblage défectueux : Application de la méthodologie sur les assemblages AC-3P	135
4.2.1	Évaluation de la répétabilité des mesures	136
4.2.1.1	Évaluation de la corrélation entre les signaux reçus sur une même éprouvette : domaines temporel et fréquentiel	136
4.2.1.2	Comparaison entre deux signaux reçus sur des assemblages différents	137
4.2.2	Effets du changement d'échelle sur la détection des défauts	138
4.2.2.1	Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°1	138
4.2.2.2	Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°2	140
4.2.2.3	Synthèse sur la détection des défauts dans les assemblages AC-3P141	
4.2.3	Effets du changement d'échelle sur l'identification des défauts	142
4.2.3.1	Analyse en composantes principales	142
4.2.3.2	Évaluation de l'identification par classification supervisée par une forêt d'arbres décisionnels	145
4.2.3.3	Bilan de l'évaluation de l'effet du changement d'échelle sur l'identification des défauts	148

Chapitre 4. Évaluation des limites de la méthodologie de diagnostic proposée pour des assemblages d'échelle plus importante

4.3	Évaluation de l'effet de la présence de plusieurs défauts sur un même linéaire de composite : Application sur les assemblages BC-Po	148
4.3.1	Évaluation de la répétabilité des mesures	149
4.3.1.1	Évaluation dans le domaine temporel et fréquentiel de la similitude des signaux reçus sur une même zone d'étude	149
4.3.1.2	Comparaison entre des signaux reçus sur des zones d'étude différentes	150
4.3.2	Évaluation des effets de la combinaison des défauts sur leur détection	151
4.3.2.1	Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°1	152
4.3.2.2	Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°2	153
4.3.2.3	Synthèse sur la détection des défauts dans les assemblages BC-Po	155
4.3.3	Évaluation de l'identification des défauts dans les assemblages BC-Po	156
4.3.3.1	Identification par ACP	156
4.3.3.2	Évaluation de l'identification par classification supervisée par une forêt d'arbres décisionnels	160
4.3.3.3	Bilan de l'évaluation de l'effet de la combinaison des défauts sur leur identification	162
4.4	Conclusion	162

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en place une méthodologie de diagnostic (détection et identification des défauts) pour des assemblages collés du génie civil. Ces assemblages sont constitués de plaques d'acier et de dalles en béton sur lesquelles on colle des plaques de composite en simulant sur certains échantillons les principaux types de défauts qu'on rencontre dans un joint de colle. La méthodologie proposée s'est montrée efficace pour détecter et identifier l'ensemble des défauts étudiés pour les éprouvettes "modèles" analysées.

Dans ce chapitre, nous allons évaluer la robustesse de cette méthodologie en l'appliquant à des assemblages contenant plusieurs défauts. La motivation de cette évaluation est une potentielle existence de linéaires de plaques de composite collées côte à côte sur des ouvrages in situ. En outre, la méthodologie proposée doit rester efficace même dans le cas où il y aurait deux ou plusieurs défauts différents dans un même linéaire de composite ou dans des linéaires parallèles.

Les échantillons étudiés dans ce chapitre sont constitués de plaques d'acier sur lesquelles trois linéaires de composite sont collés (AC-3P), et de poutres en béton armé sur lesquelles un linéaire de composite est collé (BC-Po). Pour ce dernier, différentes combinaisons de défauts sont testées.

Sept séries de mesures ont été réalisées sur ces assemblages et la méthodologie de traitement a été éprouvée via une évaluation de la répétabilité des mesures, de la détection des défauts et enfin de leur identification.

4.2 Évaluation de l'effet de la proximité d'un assemblage défectueux : Application de la méthodologie sur les assemblages AC-3P

Le même dispositif de mesure réalisée sur les assemblages AC-1P a été appliqué sur les assemblages collés acier-composite "multi-plaques" (AC-3P).

Comme illustré sur la figure 2.6, nous avons pour ce type d'assemblage trois plaques d'acier carrées de 350 mm de côté et de 20 mm d'épaisseur dénommées PAC1, PAC2 et PAC3. Sur la première plaque d'acier (PAC1), nous avons un assemblage collé sain (type- α) avec deux autres assemblages contenant des vides de tailles différentes (défauts type- β 1 et type- β 2). Sur la deuxième plaque (PAC2), nous avons un assemblage collé sain avec deux autres assemblages collés avec défauts, l'un avec un défaut de cohésion (défaut type- γ) et l'autre un défaut d'adhésion (défaut type- δ). Enfin, sur la troisième plaque d'acier (PAC3) nous n'avons qu'un assemblage collé sain qui servira de témoin. Ainsi, sur l'ensemble de nos éprouvettes, nous disposons de la représentation de tous les types de défauts avec pour chaque PAC la présence d'un assemblage sain qui

servira de référence.

Nous disposons d'un capteur émetteur S9204 et de deux capteurs R15 l'un placé à 115 mm de l'émetteur au droit du défaut (capteur n°2) et l'autre placé à 230 mm de l'émetteur (capteur n°1). Ces distances entre capteurs ainsi que leur alignement ont été maintenus constant durant les sept séries de mesures indépendantes réalisées sur ces éprouvettes, avec les consignes d'émission et de réception utilisées dans le chapitre 3.

4.2.1 Évaluation de la répétabilité des mesures

4.2.1.1 Évaluation de la corrélation entre les signaux reçus sur une même éprouvette : domaines temporel et fréquentiel

Dans le tableau 4.1, nous regroupons les valeurs minimales et moyennes observées pour les coefficients de corrélation dans les domaines temporel et fréquentiel pour les différents assemblages et les différentes positions de capteur.

			Temporel		Fréquentiel	
			D = 230 mm Capteur n°1	D = 115 mm Capteur n°2	D = 230 mm Capteur n°1	D = 115 mm Capteur n°2
PAc 1	Type- α 1	minimum	0.81	0.82	0.91	0.91
		moyenne	0.91	0.93	0.96	0.97
	Type- β 1	minimum	0.7	0.44	0.9	0.79
		moyenne	0.89	0.67	0.95	0.87
	Type- β 2	minimum	0.76	0.23	0.9	0.82
		moyenne	0.9	0.74	0.95	0.88
PAc 2	Type- α 2	minimum	0.77	0.75	0.92	0.9
		moyenne	0.92	0.87	0.97	0.95
	Type- γ	minimum	0.68	0.67	0.84	0.87
		moyenne	0.91	0.9	0.96	0.96
	Type- δ	minimum	0.5	0.49	0.85	0.81
		moyenne	0.86	0.77	0.95	0.91
PAc 3	Type- α 3	minimum	0.56	0.54	0.83	0.85
		moyenne	0.86	0.84	0.94	0.93

TABEAU 4.1 – Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélation dans le domaine temporel et fréquentiel pour chaque assemblage AC-3P par position de capteur

À l'exception des défauts de type vide (type- β) pour le capteur situé au droit du défaut (capteur n°2), les coefficients de corrélation varient entre 0.6 et 1 avec des moyennes autour de 0.9. Nous remarquons les mêmes tendances que dans le chapitre précédent. Pour ces assemblages, nous retrouvons les plus faibles valeurs de coefficients de corrélation au droit des vides comme pour les assemblages de référence étudiés dans le chapitre 3 (AC-1P et BC-Da).

Lorsqu'on applique cette évaluation des similitudes dans le domaine fréquentiel, nous obtenons une réelle augmentation des valeurs des coefficients de corrélation. Nous notons que les coefficients de corrélation fréquentiels varient majoritairement entre 0.8 et 1 et leurs moyennes sont autour de 0.95.

4.2.1.2 Comparaison entre deux signaux reçus sur des assemblages différents

En prenant l'exemple des figures 4.1 et 4.2, nous faisons la comparaison respectivement pour le capteur n°1 et n°2, des signaux reçus d'un assemblage sain et des signaux reçus d'un assemblage avec un défaut de type "tiers vide" (β_1) tous les deux situés sur la première plaque d'acier (PAC1).

On remarque que pour le capteur n°1 placé à 230 mm de l'émetteur le spectre fréquentiel n'est pas très affecté par la présence du défaut avec des pics fréquentiels voisins de la fréquence de résonance du capteur (150 kHz). Le domaine temporel quant à lui est affecté par la présence du défaut pour cette position de capteur par la diminution de l'amplitude du signal d'un facteur de 2.

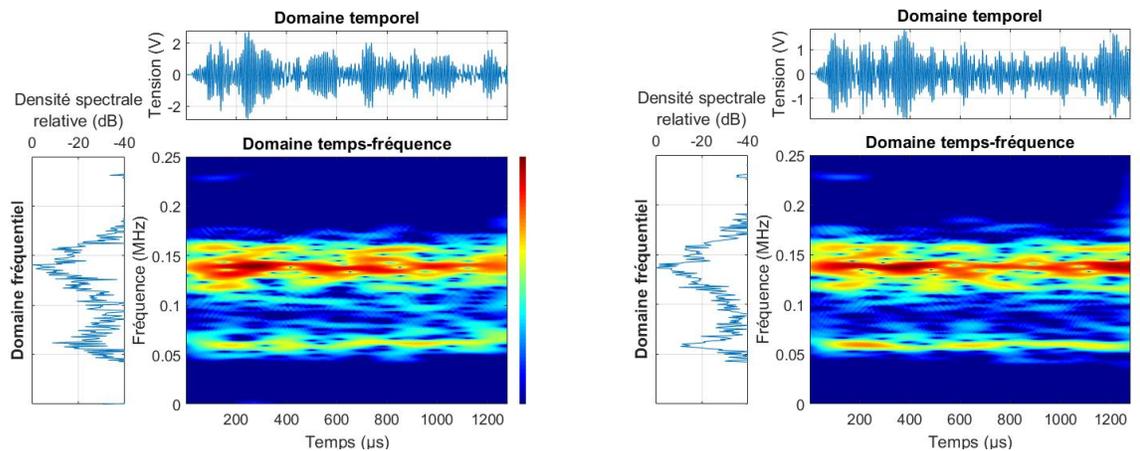


FIGURE 4.1 – Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°1 dans les assemblages AC-3P : à gauche l'échantillon sain type- α et à droite l'échantillon tiers vide type- β_1

Sur la position du capteur n°2 au droit du défaut, nous relevons les mêmes tendances sur le domaine temporel que celles du capteur n°1 (atténuation de l'intensité du signal). Dans le domaine fréquentiel, il semble également que la présence du défaut affecte les mesures avec une quasi-disparition des plus basses fréquences autour de 50 kHz. Sur cette figure, nous pouvons également constater une apparition de plus hautes fréquences autour de 250 kHz dû à la présence du défaut de type "vide".

Les différences observées sur les signaux reçus dans des assemblages présentant différents défauts sont corroborées par les résultats du calcul de leurs coefficients de corrélation temporels. La valeur observée la plus élevée est de 0.55 entre les signaux reçus dans les assemblages de type- α_2 et de type- δ de la plaque d'acier n°2 pour la position du capteur n°1 (tableau 4.2). Nous regroupons dans ces tableaux (tableaux 4.2 et 4.3), respectivement pour les capteurs n°1

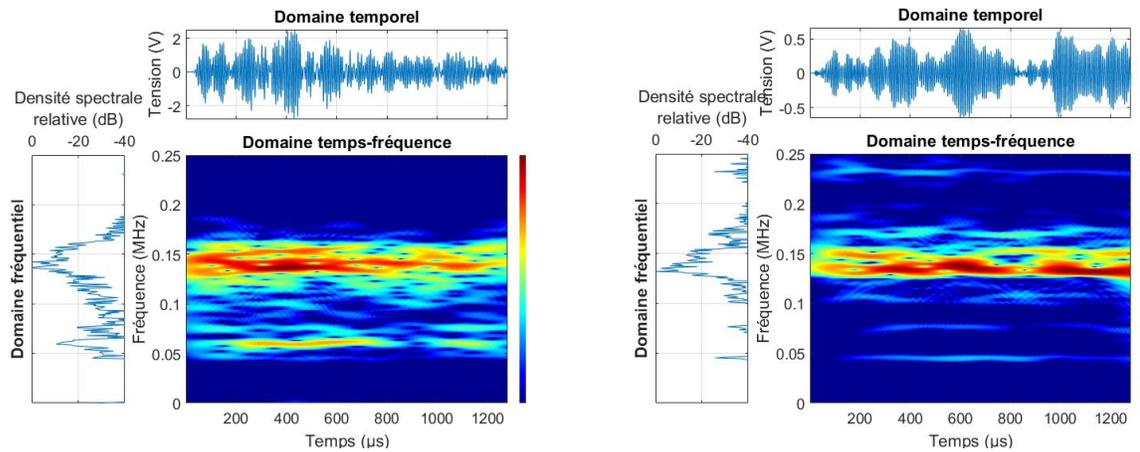


FIGURE 4.2 – Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°2 dans les assemblages AC-3P : à gauche l'échantillon sain type-α et à droite l'échantillon tiers vide type-β1

et n°2, les résultats des calculs de coefficients de corrélation temporels croisés entre les signaux reçus lors des trois séries de mesures les plus répétables réalisées dans différents assemblages.

	type-α1	type-β1	type-β2
type-α1	0.96	0.43	0.26
type-β1		0.95	0.29
type-β2			0.97

(a) Plaque d'acier n°1

	type-α2	type-γ	type-δ
type-α2	0.98	0.47	0.55
type-γ		0.98	0.41
type-δ			0.97

(b) Plaque d'acier n°2

	type-α1	type-α2	type-α3
type-α1	0.96	0.27	0.31
type-α2		0.98	0.24
type-α3			0.97

(c) Comparaison des trois assemblages de référence

TABEAU 4.2 – Valeurs des coefficients de corrélation temporels entre signaux reçus dans différents assemblages AC-3P pour la position de capteur n°1

Une comparaison de ces valeurs de coefficients de corrélation à celles obtenues entre signaux reçus dans un même assemblage nous montre que les mesures indépendantes réalisées sur les assemblages AC-3P sont bien répétables. Ainsi, nous pouvons appliquer la méthodologie de diagnostic proposée pour évaluer la détection et l'identification des défauts qui sont simulés dans nos assemblages AC-3P.

4.2.2 Effets du changement d'échelle sur la détection des défauts

4.2.2.1 Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°1

L'analyse mono-paramétrique a révélé que les paramètres les plus pertinents pour distinguer le signal reçu sur les assemblages sains du signal reçu sur les assemblages défectueux sont

Chapitre 4. Évaluation des limites de la méthodologie de diagnostic proposée pour des assemblages d'échelle plus importante

	type- α 1	type- β 1	type- β 2		type- α 2	type- γ	type- δ
type- α 1	0.97	0.22	0.32	type- α 2	0.97	0.47	0.44
type- β 1		0.58	0.24	type- γ		0.74	0.59
type- β 2			0.76	type- δ			0.92

(a) Plaque d'acier n°1

	type- α 1	type- α 2	type- α 3
type- α 1	0.97	0.28	0.25
type- α 2		0.97	0.18
type- α 3			0.97

(b) Plaque d'acier n°2

(c) Comparaison des trois assemblages de référence

TABLEAU 4.3 – Valeurs des coefficients de corrélation temporels entre signaux reçus dans différents assemblages AC-3P pour la position de **capteur n°2**

les paramètres énergétiques (a3 l'énergie, a4 la force du signal et a5 l'énergie absolue) et les paramètres caractérisant le début du signal (a7 le temps de montée et a8 le nombre de coups au pic). Sur la figure 4.3 présentant les résultats de cette comparaison pour l'énergie absolue et le nombre de coups au pic, nous constatons que les données sont regroupées en fonction de leur plaque d'acier (PAC) d'appartenance.

Paramètres	PAC n°1			PAC n°2			PAC n°3
	Ref α 1	Diff β 1	Diff β 2	Ref α 2	Diff γ	Diff δ	Ref α 3
a3 - Énergie (μ V.s)	5269.9	4.1%	12.3%	451	24.2%	-22.8%	11014.6
a4 - Force du signal (pV.s)	$3.3 * 10^7$	4.1%	12.3%	$2.8 * 10^6$	24.2%	-22.8%	$6.9 * 10^7$
a5 - Énergie absolue (aJ)	$1.58 * 10^7$	13.1%	30.4%	$7.36 * 10^5$	44.6%	-32.4%	$3.6 * 10^7$
a7 - Temps de montée (μ s)	224.4	-38.2%	-22.1%	127	-134.3%	-18.7%	454
a8 - Nombre de coups au pic	31	-40.7%	-19.6%	17	-142.1%	-22.3%	60

TABLEAU 4.4 – Différences des valeurs moyennes par paramètre observées entre zones saines et zones avec défauts des assemblages AC-3P pour la position du **capteur n°1**

À l'aide du critère de détection basé sur une différence à $\pm 20\%$, nous constatons que les défauts de type γ et δ simulés sur la plaque d'acier PAC2 sont facilement détectables pour cette position de capteur (tableau 4.4).

Dans ce même tableau, nous notons que les défauts de type- β sur la première plaque d'acier (PAC1) sont détectables en utilisant le temps de montée (a7) et le nombre de coups au pic (a8) comme comparateur. Cependant, comme nous pouvons le voir sur la figure 4.3, ce paramètre est très dispersé ce qui limite fortement son utilisation en tant que descripteur pour l'analyse

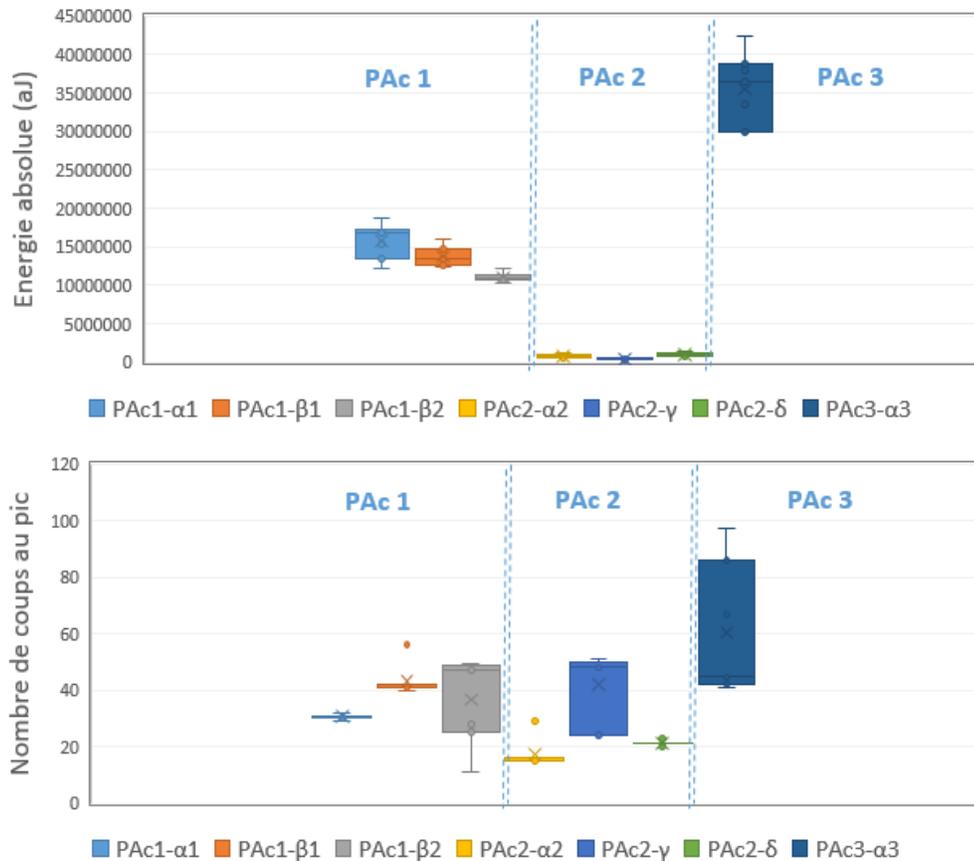


FIGURE 4.3 – Analyse des énergies absolues et des nombres de coups au pic des signaux reçus par le **capteur n°1** sur les assemblages **AC-3P**

mono-paramétrique.

4.2.2.2 Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°2

L'analyse paramétrique appliquée aux signaux reçus par le capteur placé au droit du défaut révèle des résultats plutôt similaires à ceux observés sur les assemblages AC-1P. La présence du défaut atténue le signal sur le capteur n°2 en diminuant les valeurs des paramètres énergétiques, de la durée et du nombre de coups du signal. Dans cette application, en plus de ces paramètres, nous observons que les paramètres décrivant le début du signal ainsi que le barycentre fréquentiel peuvent également être pertinents pour la détection de certains défauts. Enfin, sur la figure 4.4, il semble que l'ensemble des défauts étudiés soient détectables sur la base du critère de 20%.

Le calcul des différences via l'équation 2.3 dont les résultats sont regroupés dans le tableau 4.5 confirme la capacité de détection de l'ensemble des défauts étudiés pour cette position de capteur.

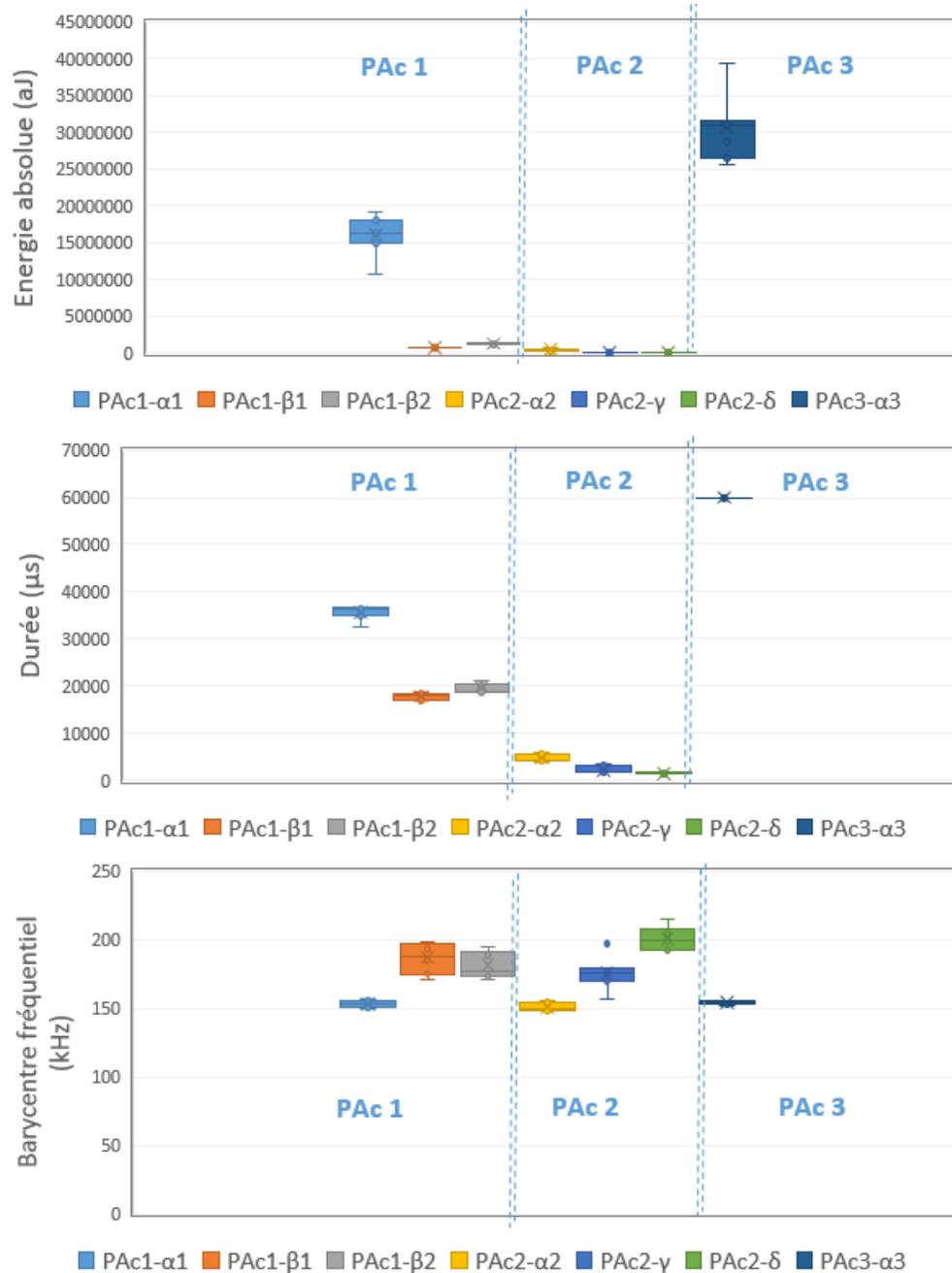


FIGURE 4.4 – Analyse des paramètres **a2**, **a5** et **a9** des signaux reçus par le **capteur n°2** sur les échantillons **AC-3P**

4.2.2.3 Synthèse sur la détection des défauts dans les assemblages AC-3P

Pour les échantillons simples (AC-1P), nous avons vu que tous les défauts sont en définitive détectables en utilisant les paramètres **a2**, **a4**, **a5**, **a6** et **a10** déterminés dans le chapitre 3. Aucune différence manifeste due au changement d'échelle et à la présence d'un défaut dans un linéaire voisin (AC-3P) n'a été observée sur l'efficacité de la méthodologie à détecter les différents types de défauts étudiés en utilisant une analyse mono-paramétrique.

Toutefois, nous notons sur cette analyse que les valeurs des paramètres dans les 3 assemblages

Paramètres	PAC n°1			PAC n°2			PAC n°3
	Ref α 1	Diff β 1	Diff β 2	Ref α 2	Diff γ	Diff δ	Ref α 3
a2 - Durée (μ s)	35622.5	49.9%	44.1%	4723.3	56.6%	69.1%	59997.7
a3 - Énergie (μ V.s)	5204	80.1%	72%	308.1	71.1%	73.3%	10574.4
a4 - Force du signal (pV.s)	$3.3 * 10^7$	80.1%	72%	$1.9 * 10^6$	71.1%	73.3%	$6.6 * 10^7$
a5 - Énergie absolue (aJ)	$1.6 * 10^7$	95.7%	92.1%	$4 * 10^5$	89.2%	87.5%	$3.1 * 10^7$
a6 - Nombre de coups	2968	42.7%	32.6%	304.7	47.8%	52.2%	6429
a7 - Temps de montée (μ s)	408.1	18.3%	-3.1%	67.1	-66.5%	-193.7%	176.9
a8 - Nombre de coups au pic	59	10.2%	-8.6%	10	-62.9 %	-219.7%	25
a9 - Barycentre fréquentiel (KHz)	153	-22.3%	-18.8%	151	-16.6%	-33.3%	154

TABLEAU 4.5 – Différences des valeurs moyennes par paramètre observées entre zones saines et zones avec défauts des assemblages AC-3P pour la position du capteur n°2

sains ne sont pas du même ordre de grandeur hormis pour les descripteurs du domaine fréquentiel (barycentre fréquentiel et fréquence pic).

Ceci semble traduire le fait que la présence de linéaire de composite à proximité, en plus des effets de changement d'échelle et des effets de bord, joue un rôle important dans la propagation du signal. Cet effet est plus marqué dans le domaine temporel.

4.2.3 Effets du changement d'échelle sur l'identification des défauts

4.2.3.1 Analyse en composantes principales

L'analyse par composantes principales (ACP) est effectuée sur les signaux reçus lors des sept séries de mesures sur tous les assemblage AC-3P par plaque d'acier, en prenant en compte les 10 paramètres de AEWIn (tableau 2.8) qui les décrivent. Ces ACP ont été réalisées en considérant distinctement les deux positions de capteur.

4.2.3.1.1 ACP par plaque des signaux reçus par le capteur n°1

Sur la position du capteur n°1, les résultats des ACP réalisées sont illustrés sur la figure 4.5. Nous représentons suivant les deux premières composantes principales la répartition des signaux reçus sur les assemblages de la plaque d'acier (PAC) n°1 à gauche, et sur les assemblages de la PAC n°2 à droite.

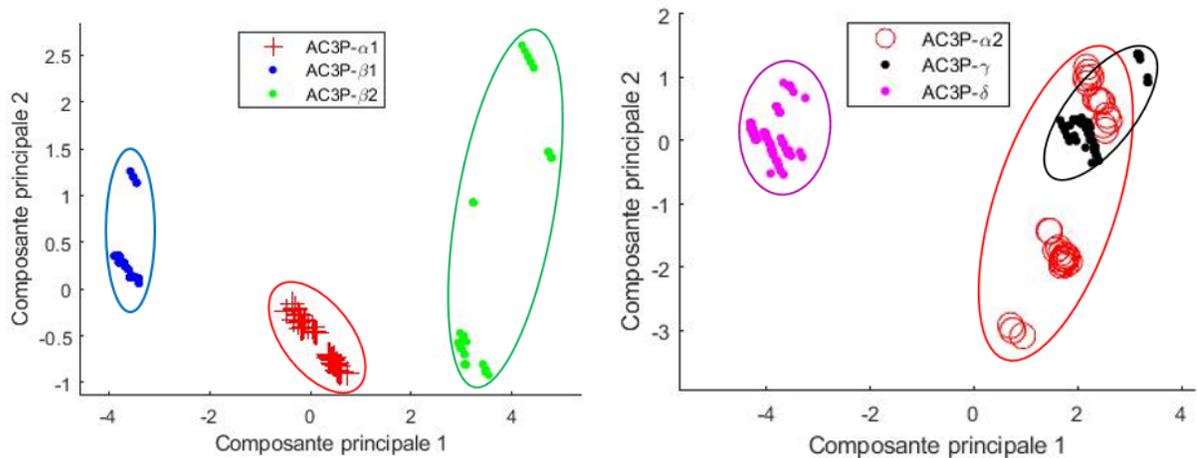


FIGURE 4.5 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le **capteur n°1** sur les assemblages **AC-3P** par plaque d'acier (Pac) : à gauche Pac n°1 et à droite Pac n°2

Nous notons sur cette figure que pour la Pac n°1, il est facile de discerner les clusters formés des signaux reçus dans les assemblages sains de type- α de ceux formés des signaux reçus dans les assemblages avec défauts. Ceci est différent pour la Pac n°2 où les clusters des signaux de l'assemblage de type- α et de l'assemblage avec un défaut de type- γ sont entremêlés. Concernant ce type de défaut, et pour cette position de capteur, la méthode de l'ACP sur ce type de substrat rencontre des limites lorsqu'on applique un changement d'échelle et avec des linéaires de composite à proximité l'un de l'autre.

4.2.3.1.2 ACP par plaque des signaux reçus par le capteur n°2

Pour les ACP réalisées avec les données reçues par le capteur situé au droit du défaut, les répartitions des signaux reçus dans les plans formés par deux composantes principales sont présentées sur la figure 4.6.

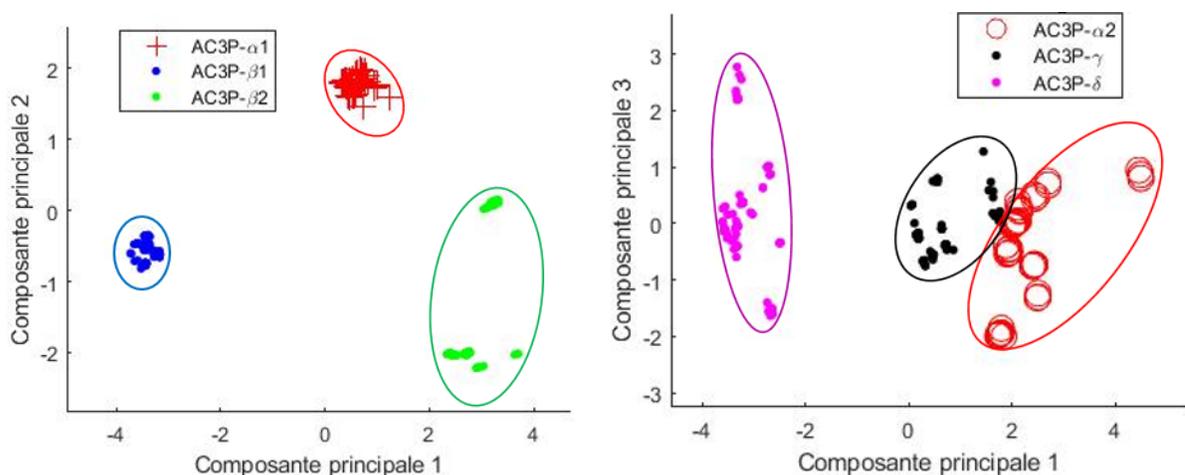


FIGURE 4.6 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le **capteur n°2** sur les assemblages **AC-3P** par plaque d'acier (Pac) : à gauche Pac n°1 et à droite Pac n°2

Nous remarquons sur cette figure que, pour les deux plaques d'acier, les clusters formés par les signaux collectés dans les assemblages avec défauts (β_1 , β_2 , γ et δ) sont bien séparés des clusters des signaux reçus dans les assemblages sains (α_1 , α_2). De plus, on arrive à distinguer facilement les clusters formés par les signaux collectés dans les assemblages avec défaut entre eux. Comme lors de son application sur les assemblages du même type de substrat étudiés au chapitre 3 (AC-1P), pour cette position de capteur, la méthodologie montre un bon potentiel pour la distinction et donc l'identification de l'ensemble des défauts.

4.2.3.1.3 ACP globale des signaux reçus par les capteurs n°1 et n°2

Dans cette section, nous réalisons une ACP globale tenant en compte simultanément des données des mesures réalisées sur tous les assemblages de toutes les plaques d'acier. Nous représentons sur la figure 4.7 les résultats de la répartition des clusters des signaux reçus sur les différents assemblages pour les positions de capteur n°1 et n°2.

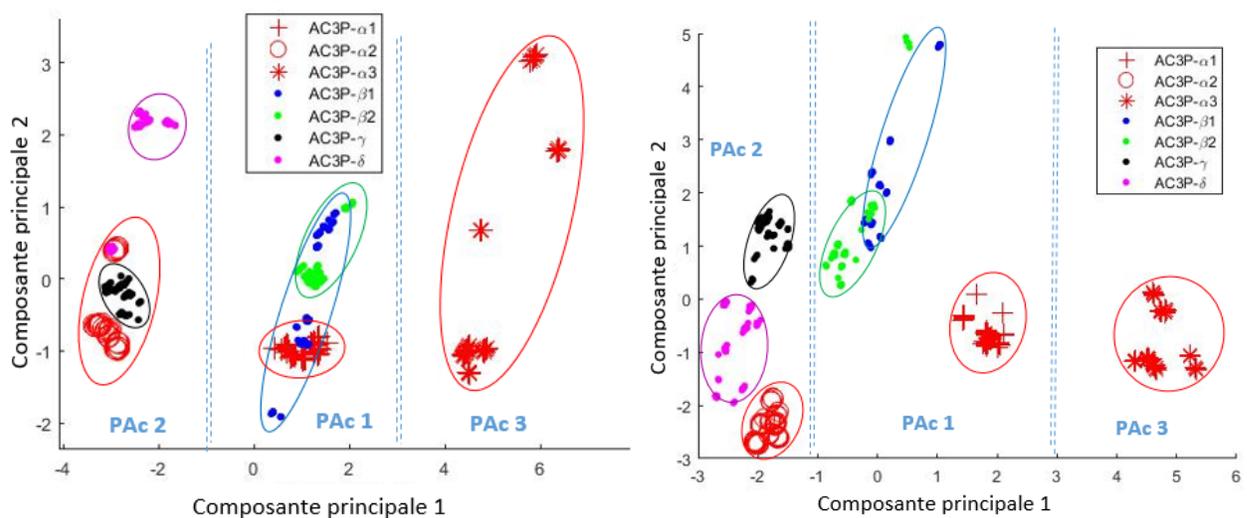


FIGURE 4.7 – Résultats ACP pour les signaux reçus sur tous les assemblages AC-3P : à gauche capteur n°1, à droite capteur n°2

Nous constatons sur cette figure que pour les deux positions de capteur nous avons un regroupement des clusters en fonction de leur plaque d'acier d'appartenance. Ceci nous renseigne sur le fait que la géométrie a une influence majeure sur le signal qui s'y propage. De plus, nous remarquons pour la position du capteur n°1, que les clusters d'échantillons ne sont plus distincts. Pour la position du capteur n°2 au droit du défaut, nous arrivons à discerner les clusters les uns des autres. Ceci montre que le potentiel d'une bonne identification des défauts est conservé sur cette position de capteur.

Ces résultats révèlent des limites quant à la nécessité de choisir un référentiel différent pour tout nouveau milieu d'étude. L'approche de l'identification des défauts par une classification supervisée pourrait éventuellement surmonter cet obstacle.

4.2.3.2 Évaluation de l'identification par classification supervisée par une forêt d'arbres décisionnels

La seconde méthode d'identification proposée est une classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels qui prend en compte les signaux sans distinction de la position du capteur. Cette classification est réalisée via le logiciel RFCAM suivant deux modes en fonction des données d'entrée considérées : le mode 1 en utilisant les descripteurs extraits d'AEWIN et le mode 2 en utilisant les descripteurs calculés à partir des formes d'onde.

À cet effet, cinq classes ont été constituées pour la phase d'apprentissage représentant les quatre assemblages avec défaut (Type- β 1, Type- β 2, Type- γ et Type- δ) et une classe de référence.

Chaque classe avec défaut a été entraînée par les données collectées lors des quatre premières séries de mesures réalisées sur les assemblages correspondants. La classe de référence a été entraînée avec les données de six séries de mesures, en prenant les trois premières séries réalisées sur les assemblages sains de la PAC1 (Type- α 1) et de la PAC2 (Type- α 2).

Le modèle ainsi constitué est composé de 200 Arbres avec une sélection aléatoire prévue à chaque nœud de l'arbre de 3 descripteurs pour le mode 1 et 4 descripteurs pour le mode 2.

Ce modèle a été par la suite testé avec les données des 3 séries de mesures restantes réalisées sur les assemblages avec défaut, des 4 séries de mesures restantes réalisées sur les assemblages sains des PAC1 et PAC2, et enfin des 7 séries de mesures réalisées sur l'assemblage sain témoin de la PAC3 (Type- α 3) qui n'ont pas servi à l'apprentissage du modèle.

Pour le premier mode, nous regroupons les résultats de classification suivant les deux règles de vote dans le tableau 4.6. Les taux de reconnaissance et d'erreur correspondants sont répertoriés dans le tableau 4.7.

		Classe Sain		Classe vide centré		Classe tiers vide		Classe souple		Classe Graisse	
		VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60
Essai sur PAC n°1	Type- α 1	46	46	20	19	21	-	-	-	-	-
	Type- β 1	-	-	71	71	-	-	-	-	-	-
	Type- β 2	11	11	-	-	55	55	-	-	-	-
Essai sur PAC n°2	Type- α 2	53	32	-	-	-	-	22	22	11	11
	Type- γ	-	-	-	-	-	-	56	46	8	8
	Type- δ	11	-	-	-	-	-	21	21	33	32
Essai sur PAC n°3	Type- α 3	157	157	-	-	-	-	-	-	-	-

TABLEAU 4.6 – Résultats de la classification par forêt d'arbres décisionnels des données extraites d'AEWIN des signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages AC-3P

Globalement, nous notons une bonne classification de l'ensemble des signaux avec une

		Vote majoritaire		Vote sécuritaire à 60%		
		Taux de reconnaissance	Taux d'erreur	Taux de reconnaissance	Taux d'erreur	Taux de rejet
Essai sur PAC n°1	Type- α 1	53%	47%	53%	22%	25%
	Type- β 1	100%	0%	100%	0%	0%
	Type- β 2	83%	17%	83%	17%	0%
Essai sur PAC n°2	Type- α 2	62%	38%	37%	38%	24%
	Type- γ	88%	12%	72%	13%	16%
	Type- δ	51%	49%	49%	32%	18%
Essai sur PAC n°3	Type- α 3	100%	0%	100%	0%	0%

TABLEAU 4.7 – Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données **extraites d'AEWIN** des signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages **AC-3P**

prise de décision facile à partir du vote majoritaire mis à part pour l'identification des assemblages de type- α 1 et de type- δ . La prise de décision est tout de même réalisable pour ces derniers et davantage confortée par la règle de vote SV60 où nous avons des taux de reconnaissance largement supérieurs aux taux d'erreur. Notons toutefois que les pourcentages des signaux rejetés restent assez faible (de 0 à 25%). Comparée à la classification réalisée sur les assemblages AC-1P dans le chapitre 3, nous enregistrons tout de même de moins bons résultats concernant ce type de substrat.

Nous notons également dans le tableau 4.6 que les signaux collectés dans l'assemblage sain de la PAC3 qui n'ont pas participé à l'apprentissage du modèle sont tous parfaitement rangés dans la classe "sain".

En dépit des bons résultats obtenus, nous noterons que les effets de la proximité des linéaires de composite et ceux du changement d'échelle sont notoires. En effet, nous remarquons que les erreurs de classification commises sont toutes en faveur d'une classe dont le linéaire de composite est voisin (appartenant à la même plaque d'acier). Par exemple, c'est le cas des 8 signaux reçus dans l'échantillon de type- γ et rangés dans la classe "graisse" qui appartiennent à une même plaque d'acier. C'est également le cas pour les 21 signaux reçus sur l'échantillon Type- α 1 et rangés dans la classe "tiers vide".

Pour le deuxième mode de classification, nous renseignons dans les tableaux 4.8 et 4.9 les résultats suivant les deux règles de vote ainsi que les taux de reconnaissance et d'erreur constatés.

Le mode de classification via les données calculées à partir des formes d'ondes améliore l'identification du défaut de type- δ sur ce type de substrat comme constaté dans le chapitre 3 (application sur les assemblages AC-1P). Nous remarquons que la classification des signaux

Chapitre 4. Évaluation des limites de la méthodologie de diagnostic proposée pour des assemblages d'échelle plus importante

		Classe Sain		Classe vide centré		Classe tiers vide		Classe souple		Classe Graisse	
		VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60
Essai sur PAC n°1	Type- α 1	79	55	8	-	-	-	-	-	-	-
	Type- β 1	-	-	71	60	-	-	-	-	-	-
	Type- β 2	-	-	14	7	52	36	-	-	-	-
Essai sur PAC n°2	Type- α 2	86	74	-	-	-	-	-	-	-	-
	Type- γ	-	-	-	-	-	-	53	32	11	-
	Type- δ	15	-	-	-	-	-	5	-	45	44
Essai sur PAC n°3	Type- α 3	119	28	-	-	38	-	-	-	-	-

TABLEAU 4.8 – Résultats de la classification par forêt d'arbres décisionnels des données **Cosmos** des signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages **AC-3P**

		Vote majoritaire		Vote sécuritaire à 60%		
		Taux de reconnaissance	Taux d'erreur	Taux de reconnaissance	Taux d'erreur	Taux de rejet
Essai sur PAC n°1	Type- α 1	91%	9%	63%	0%	37%
	Type- β 1	100%	0%	85%	0%	15%
	Type- β 2	79%	21%	55%	10%	35%
Essai sur PAC n°2	Type- α 2	100%	0%	86%	0%	14%
	Type- γ	83%	17%	50%	0%	50%
	Type- δ	69%	31%	68%	0%	32%
Essai sur PAC n°3	Type- α 3	76%	33%	18%	0%	82%

TABLEAU 4.9 – Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données **Cosmos** des signaux reçus lors des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} séries de mesures effectuées sur les assemblages **AC-3P**

collectés sur l'assemblage de type- δ s'est améliorée en vote majoritaire passant de 51% à 69% de taux de reconnaissance, ce qui permet de prendre facilement la bonne décision pour la labélisation des signaux. De plus, on note une diminution des taux d'erreur qui sont quasiment tous nuls pour la règle de vote SV60 avec toutefois d'importants taux de rejet allant jusqu'à 82% (signaux collectés sur l'assemblage sain de la PAC3).

4.2.3.3 Bilan de l'évaluation de l'effet du changement d'échelle sur l'identification des défauts

Nous avons vu que le changement d'échelle et la proximité de linéaires de composite rendait l'identification des défauts plus difficile. Pour la première méthode d'identification proposée consistant en une analyse par composantes principales, les signaux reçus pour des assemblages avec défauts peuvent nettement être discernables par ACP par plaque d'acier pour la position du capteur n°2 qui est placée au droit du défaut. Cependant, pour la position du capteur n°1 à 230 mm de l'émetteur, nous notons sur le plan de l'ACP des assemblages de la plaque d'acier n°2 que les clusters des signaux reçus sur l'assemblage avec un défaut de cohésion ne sont pas discernables des signaux reçus sur l'assemblage sain. Ceci rend la détection de ce défaut impossible alors que c'était le cas dans le chapitre 3. De plus, une limite sur le choix d'une référence commune se pose vu que les clusters des signaux reçus sur les assemblages sains des différentes plaques d'acier ne se superposent pas dans une ACP globale.

Pour la seconde méthode d'identification consistant en une classification supervisée par l'algorithme de forêt d'arbres décisionnels, il est possible d'identifier les défauts avec des taux de reconnaissance assez élevés pour prendre une bonne décision sur la classe d'appartenance des signaux. Toutefois, nous notons que les erreurs de classement ont été à chaque fois commises en faveur des classes portées par des linéaires de composite voisins.

Nous pouvons donc affirmer que le changement d'échelle combiné à la proximité des linéaires de composite semblent affecter l'efficacité de la méthodologie mais n'empêche pas la détection et l'identification de l'ensemble des typologies de défauts étudiés.

4.3 Évaluation de l'effet de la présence de plusieurs défauts sur un même linéaire de composite : Application sur les assemblages BC-Po

Afin d'évaluer l'effet de la présence de plusieurs défauts sur un même linéaire de renfort composite, nous disposons de poutres en béton armé de longueur 3,4 m sur lesquelles nous collons une plaque de composite de 3 m de long en incorporant des défauts à 75 cm des extrémités comme illustré sur la figure 2.7.

Nous disposons d'une zone saine au centre de chaque poutre qui constituera notre zone de référence dite de type- α . Une combinaison des trois types de défauts est réalisée par couple dans chaque poutre. Nous avons ainsi sur chaque poutre une délimitation de trois zones d'essai dont deux avec défauts et une zone saine dont :

- sur la poutre n°1 des zones contenant les défauts de type β (vide) et γ (défaut de cohésion),
- sur la poutre n°2 des zones contenant les défauts de type γ et δ (défaut d'adhésion),
- et enfin sur la poutre n°3 des zones contenant les défauts de type β et δ .

Le protocole de mesure est le même que celui adopté pour les assemblages collés béton-composite en "dalette" (BC-Da). Nous disposons d'un capteur S9204 en émission et de deux capteurs R15 en réception couplés à l'échantillon avec du phényle salicylate, le capteur n°1 étant placé à 230 mm de l'émetteur et le capteur n°2 à 115 mm au droit du défaut.

Sept séries de mesures indépendantes ont été réalisées avec ce protocole sur les assemblages béton-composite "poutre" (BC-Po). La méthodologie de diagnostic proposée dans le chapitre précédent est appliquée afin d'évaluer sa robustesse face à la présence d'un autre défaut dans le même linéaire de composite.

4.3.1 Évaluation de la répétabilité des mesures

4.3.1.1 Évaluation dans le domaine temporel et fréquentiel de la similitude des signaux reçus sur une même zone d'étude

La répétabilité des mesures est évaluée en calculant les coefficients de corrélation entre les signaux reçus sur une même zone d'étude durant les sept séries de mesures. Les valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélation temporel et fréquentiel croisés des 70 signaux reçus par zone d'étude sont répertoriées dans le tableau 4.10.

			Temporel		Fréquentiel	
			D = 230 mm Capteur n°1	D = 115 mm Capteur n°2	D = 230 mm Capteur n°1	D = 115 mm Capteur n°2
Poutre 1	Zone- α	minimum	0.43	0.34	0.8	0.81
		moyenne	0.62	0.7	0.9	0.9
	Zone- β	minimum	0.53	0.29	0.83	0.61
		moyenne	0.83	0.64	0.93	0.82
	Zone- γ	minimum	0.38	0.69	0.73	0.78
		moyenne	0.8	0.9	0.9	0.92
Poutre 2	Zone- α	minimum	0.28	0.42	0.78	0.79
		moyenne	0.72	0.8	0.9	0.92
	Zone- γ	minimum	0.3	0.34	0.75	0.77
		moyenne	0.64	0.69	0.87	0.88
	Zone- δ	minimum	0.48	0.38	0.8	0.77
		moyenne	0.74	0.73	0.9	0.88
Poutre 3	Zone- α	minimum	0.4	0.36	0.78	0.7
		moyenne	0.7	0.65	0.9	0.86
	Zone- β	minimum	0.63	0.29	0.8	0.61
		moyenne	0.85	0.64	0.94	0.81
	Zone- δ	minimum	0.28	0.43	0.68	0.69
		moyenne	0.68	0.67	0.86	0.84

TABLEAU 4.10 – Valeurs moyennes et minimales des coefficients de corrélation dans les domaines temporel et fréquentiel des signaux reçus pour chaque zone des assemblages BC-Po

Les coefficients de corrélation temporels déterminés pour ce type d'assemblage varient entre

0.3 et 1 avec des moyennes autour de 0.7. Ces valeurs sont légèrement inférieures à celles que nous avons observées dans le chapitre 3 (BC-Da).

Dans le domaine fréquentiel, les valeurs des coefficients de corrélation ont augmenté par rapport au domaine temporel qui est plus sensible. Nous notons ici des coefficients de corrélation variant entre 0.7 et 1 avec des moyennes autour de 0.9.

4.3.1.2 Comparaison entre des signaux reçus sur des zones d'étude différentes

Nous présentons sur les figures 4.8 et 4.9, respectivement pour les positions de capteur n°1 et n°2, la comparaison entre les signaux reçus sur la zone saine et la zone contenant un vide pour la poutre n°3.

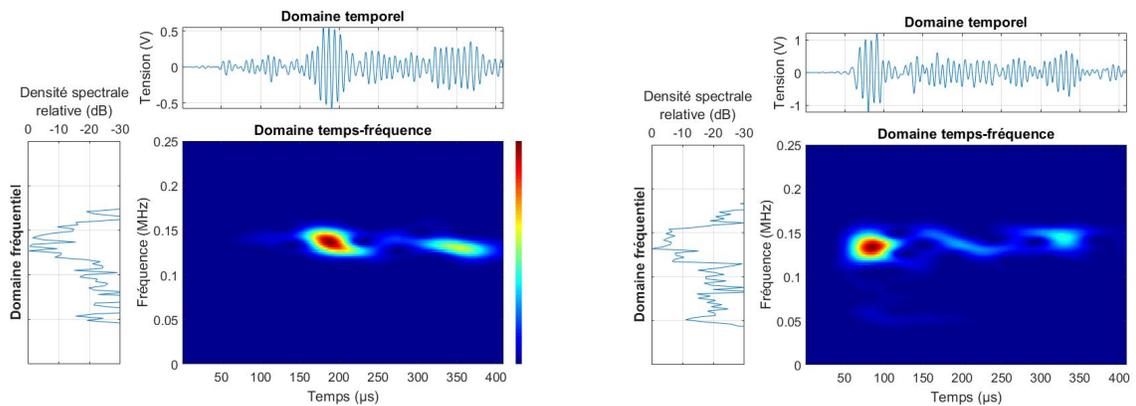


FIGURE 4.8 – Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°1 dans deux zones de la poutre n°3 des assemblages BC-Po : à gauche zone d'étude de référence type- α et à droite zone contenant un vide en son centre type- β

Pour la position du capteur n°1 à 230 mm de l'émetteur, nous notons un délai sur l'apparition du paquet d'onde portant la fréquence au pic (≈ 150 kHz) sur la zone saine où il n'intervient qu'à partir de 200 μ s alors que sur la zone- β on l'enregistre à partir de 100 μ s. Par conséquent, nous remarquons que les deux signaux sont largement différents sur le domaine temporel tout en conservant cependant les mêmes allures dans le domaine fréquentiel. L'hypothèse émise pour expliquer cette observation est qu'à cette distance les effets de la présence du défaut sur le domaine fréquentiel sont inhibés par le milieu de propagation alors que dans le domaine temporel plus sensible, ces effets sont toujours présents.

Pour le capteur n°2, la présence du défaut a des effets sur le signal transmis dans le domaine fréquentiel comme dans le domaine temporel. Nous constatons un rétrécissement de la bande spectrale qui est tout de même toujours centrée sur la fréquence de résonance du capteur à 150 kHz. Sur le domaine temporel, nous remarquons l'apparition de plusieurs paquets portant cette fréquence qui se manifeste sur la représentation temps-fréquence par la présence d'une bande allant de 50 μ s à 250 μ s.

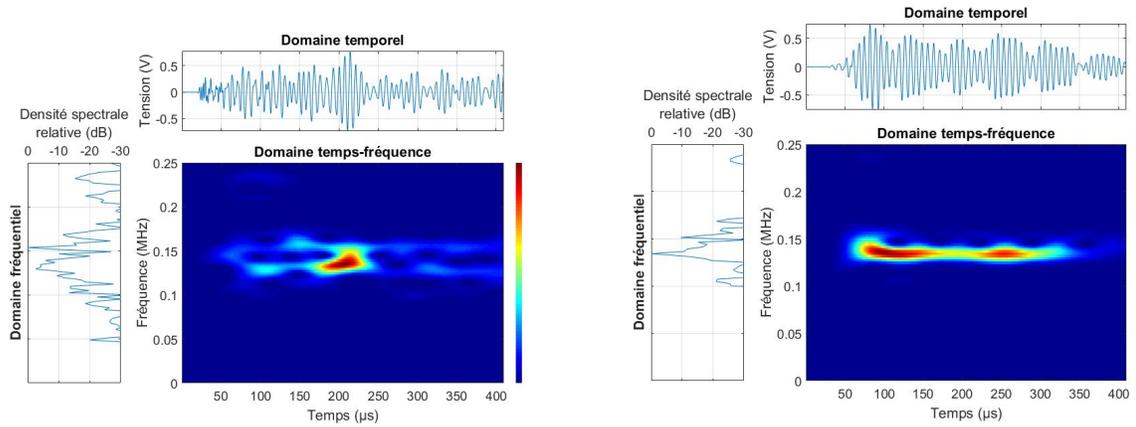


FIGURE 4.9 – Représentation temps fréquence des signaux reçus sur le capteur n°2 dans deux zones de la poutre n°3 des assemblages BC-Po : à gauche zone d'étude de référence type- α et à droite zone contenant un vide en son centre type- β

Les différences observées sont corroborées par le calcul des coefficients de corrélation temporels inter-zones présentés dans les tableaux 4.11 et 4.12 pour les deux positions de capteur. Nous notons sur ces tableaux une nette dégradation de ces valeurs. La présence du défaut affecte ainsi le signal d'où le potentiel de la technique AUS à le détecter voir l'identifier. Nous notons également que les signaux reçus dans les différentes zones saines (type- α) sont très différents (coefficients variant entre 0.33 et 0.43). Ceci impliquerait que la référence est à considérer pour chaque poutre de manière distincte.

Nous allons, en prenant en compte cette remarque, dans la section suivante évaluer la méthodologie de diagnostic proposée pour les mesures réalisées sur ces assemblages BC-Po.

	zone- α 1	zone- β 1	zone- γ 1		zone- α 2	zone- γ 2	zone- δ 2
zone- α 1	0.71	0.48	0.49	zone- α 2	0.85	0.39	0.41
zone- β 1		0.91	0.55	zone- γ 2		0.82	0.39
zone- γ 1			0.82	zone- δ 2			0.77

(a) Poutre n°1

	zone- α 3	zone- β 3	zone- δ 3		zone- α 1	zone- α 2	zone- α 3
zone- α 3	0.66	0.37	0.33	zone- α 1	0.71	0.38	0.43
zone- β 3		0.88	0.41	zone- α 2		0.85	0.33
zone- δ 3			0.74	zone- α 3			0.66

(b) Poutre n°2

(c) Poutre n°3

(d) Comparaison entre les zones saines des différentes poutres

TABLEAU 4.11 – Valeurs des coefficients de corrélation temporels entre signaux reçus sur les différentes zones des assemblages BC-Po pour la position de capteur n°1

4.3.2 Évaluation des effets de la combinaison des défauts sur leur détection

	zone- α 1	zone- β 1	zone- γ 1		zone- α 2	zone- γ 2	zone- δ 2
zone- α 1	0.84	0.39	0.54	zone- α 2	0.87	0.41	0.7
zone- β 1		0.76	0.65	zone- γ 2		0.81	0.39
zone- γ 1			0.93	zone- δ 2			0.96

(a) Poutre n°1			(b) Poutre n°2			
	zone- α 3	zone- β 3	zone- δ 3	zone- α 1	zone- α 2	zone- α 3
zone- α 3	0.79	0.38	0.41	zone- α 1	0.84	0.41
zone- β 3		0.82	0.53	zone- α 2		0.87
zone- δ 3			0.7	zone- α 3		0.79

(c) Poutre n°3			(d) Comparaison entre les zones saines des différentes poutres			
	zone- α 1	zone- α 2	zone- α 3	zone- α 1	zone- α 2	zone- α 3
zone- α 1	0.84	0.41	0.37	zone- α 1	0.84	0.41
zone- α 2		0.87	0.38	zone- α 2		0.87
zone- α 3			0.79	zone- α 3		0.79

TABLEAU 4.12 – Valeurs des coefficients de corrélation temporels entre signaux reçus sur les différentes zones des assemblages **BC-Po** pour la position de **capteur n°2**

4.3.2.1 Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°1

Sur la figure 4.10, nous représentons les résultats de la comparaison entre signaux reçus dans les différentes zones de nos assemblages pour deux des paramètres les plus pertinents pour discriminer les zones saines des zones avec défauts via une représentation par diagramme en boîte.

L'analyse de cette figure se fera par poutre représentée par l'association de trois colonnes de données successives avec une première concernant les signaux reçus dans la zone saine et les deux autres les signaux reçus dans les zones avec des défauts. La figure comporte aussi les pointillés représentant le critère de détection fixé par la méthodologie (écart de plus ou moins 20% par rapport à la zone saine) dont la couleur rouge représente la poutre n°1, la bleue la poutre n°2 et la jaune la poutre n°3.

Nous remarquons sur la figure 4.10 que pour les poutres n°1 et n°3, tous les défauts étudiés sont détectables avec la force du signal (a4) comme indicateur. Pour la poutre n°2 combinant les défauts de cohésion (type- γ) et d'adhésion (type- δ), nous avons une différence maximale de -10.5% entre la zone- α et la zone- γ sur ce paramètre a4. Nous notons que pour détecter les défauts dans cette poutre selon les critères que nous nous sommes fixés, on peut utiliser le temps de montée (a7) comme indicateur avec lequel nous observons une différence de 37.5% pour le défaut de type- δ .

Dans le tableau 4.13, nous répertorions les différences entre zones saines et zones défectueuses par poutre pour les paramètres les plus pertinents.

Nous remarquons dans ce tableau que les paramètres énergétiques (a3, a4 et a5) ont un comportement proche ainsi que le temps de montée et le nombre de coups au pic, ces paramètres étant très fortement corrélés. Nous notons également pour cette position de capteur que le signal est plus atténué dans la zone saine. Cette remarque n'était vraie sur les assemblages BC-Da que pour le défaut de type- β 1 (vide centré).

En définitive, si on considère le critère que l'on s'est fixé, pour la position du capteur placée à 230 mm de l'émetteur, tous les défauts sont détectables malgré la présence d'un autre défaut

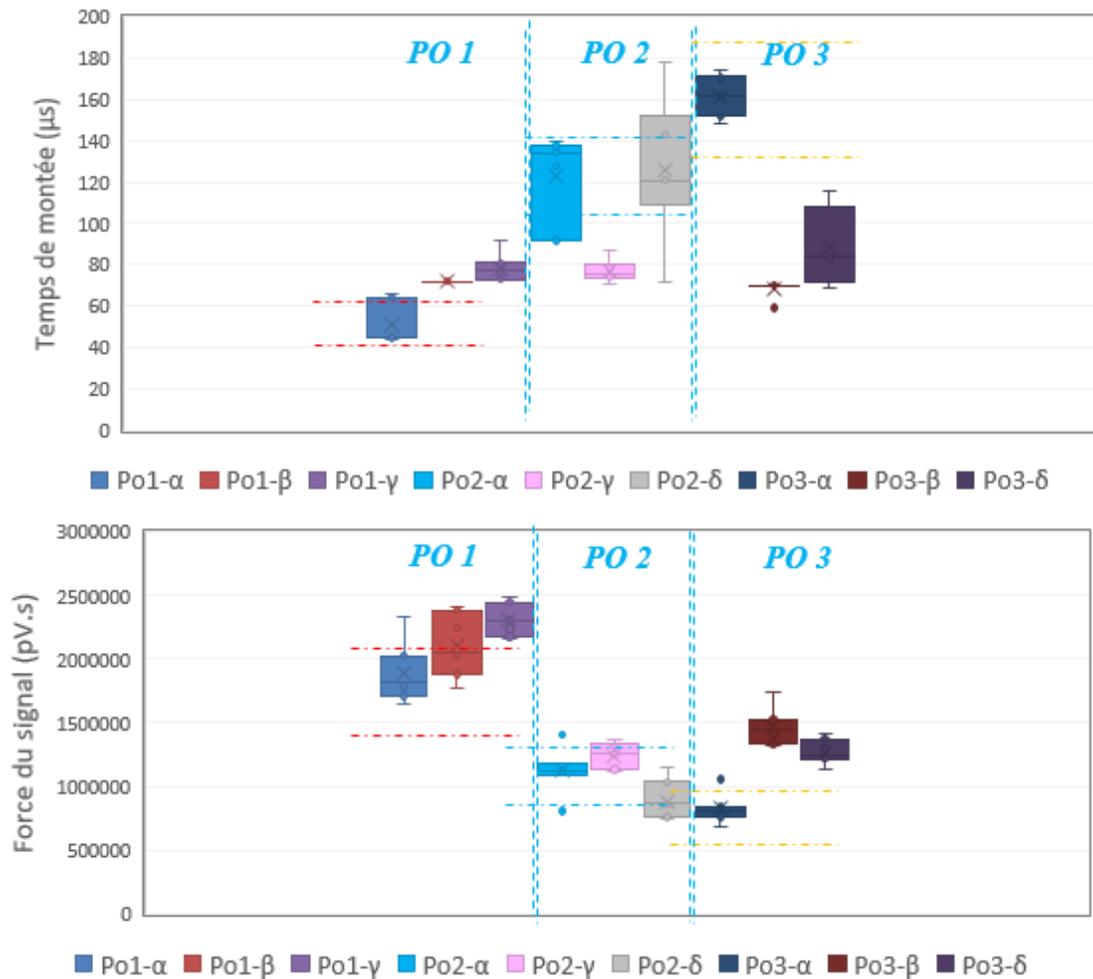


FIGURE 4.10 – Analyse des paramètres **a4** et **a5** des signaux reçus par le **capteur n°1** sur les différentes zones d'étude des assemblages **BC-Po**

sur le même linéaire de composite et ceci avec toutes les combinaisons de couple de défauts réalisées. Cependant, nous ne retrouvons pas les mêmes signatures du défaut par rapport aux configurations du chapitre 3.

4.3.2.2 Analyse paramétrique des signaux reçus par le capteur n°2

Pour le capteur situé au droit des défauts, nous appliquons la même méthodologie. La figure 4.11 donne les résultats de cette comparaison présentée sous forme de diagramme en boîte pour deux des paramètres les plus pertinents à savoir la force du signal (**a4**) et le temps de montée (**a7**).

Nous notons que sur les deux premières poutres, les défauts étudiés sont bien détectables pour cette position de capteur avec le paramètres **a4** (la force du signal) comme indicateur. Ceci n'est pas le cas par contre pour le défaut de type- β dans la troisième poutre où nous avons obtenu une différence entre zone- α et zone- β de 18% pour ce paramètre; ce qui est légèrement

Paramètres	Poutre n°1			Poutre n°2			Poutre n°3		
	Ref α	Diff β	Diff γ	Ref α	Diff γ	Diff δ	Ref α	Diff β	Diff δ
a3 - Énergie (μ V.s)	301	-12.2%	-22.7%	179	-10.5%	21.1%	131	-78.0%	-54.5%
a4 - Force du signal (pV.s)	1.9 *10 ⁶	-12.2%	-22.7%	1.1 *10 ⁶	-10.5%	21.0%	8.2 *10 ⁵	-77.6%	-54.4%
a5 - Énergie absolue (a)	9.4 *10 ⁵	-42.6%	-36.4%	2.3 *10 ⁵	7.1%	2.0%	2.7 *10 ⁵	-60.4%	36.7%
a7 - Temps de montée (μ s)	51	-41.3%	-52.8%	123	37.5%	-2.6%	162	57.7%	45.5%
a8 - Nombre de coups au pic	7	-61.4%	-69.8%	16	39.4%	-13.6%	21	60.3%	40.3%

TABLEAU 4.13 – Différences des valeurs moyennes par paramètre observées entre zones saines et zones avec défauts des assemblages **BC-Po** pour la position du **capteur n°1**

inférieur au critère que l'on s'est fixé. Ce défaut dans cette poutre est par contre bien détecté avec le temps de montée (a7) pour lequel nous observons une différence de 31.2% entre la zone- α et la zone- β . Notons toutefois que ce paramètre a7 est très dispersé pour cette position de capteur et dans la poutre n°3.

Le tableau 4.13 résume les valeurs obtenues par le calcul des différences entre zones saines et zones défectueuses par poutre pour les paramètres les plus pertinents permettant de détecter les défauts.

Paramètres	Poutre n°1			Poutre n°2			Poutre n°3		
	Ref α	Diff β	Diff γ	Ref α	Diff γ	Diff δ	Ref α	Diff β	Diff δ
a2 - Durée (μ s)	2361	27.6%	28.4%	2147	13.0%	6.9%	1865	13.6%	17.5%
a3 - Énergie (μ V.s)	442.9	67.7%	35.5%	426.8	37.5%	25.4%	215	17.4%	26.8%
a4 - Force du signal (pV.s)	2.7 *10 ⁶	67.3%	36.1%	2.6 *10 ⁶	40.6%	25.6%	1.3 *10 ⁶	18.0%	24.4%
a5 - Énergie absolue (a)	2.3 *10 ⁶	87.5%	34.5%	1.8 *10 ⁶	64.4%	36.3%	4.8 *10 ⁵	7.4%	48.8%
a6 - Nombre de coups	214	22.1%	18.9%	220	7.2%	5.9%	200	7.7%	13.4%
a7 - Temps de montée (μ s)	28.3	-122%	-49.8%	32	-75.1%	-41.3%	122	31.2%	47.3%
a8 - Nombre de coups au pic	5	-125%	-48.7%	5	-61.3%	-42.5%	22	44.4%	44.1%

TABLEAU 4.14 – Différences des valeurs moyennes par paramètre observées entre zones saines et zones avec défauts des assemblages **BC-Po** pour la position du **capteur n°2**

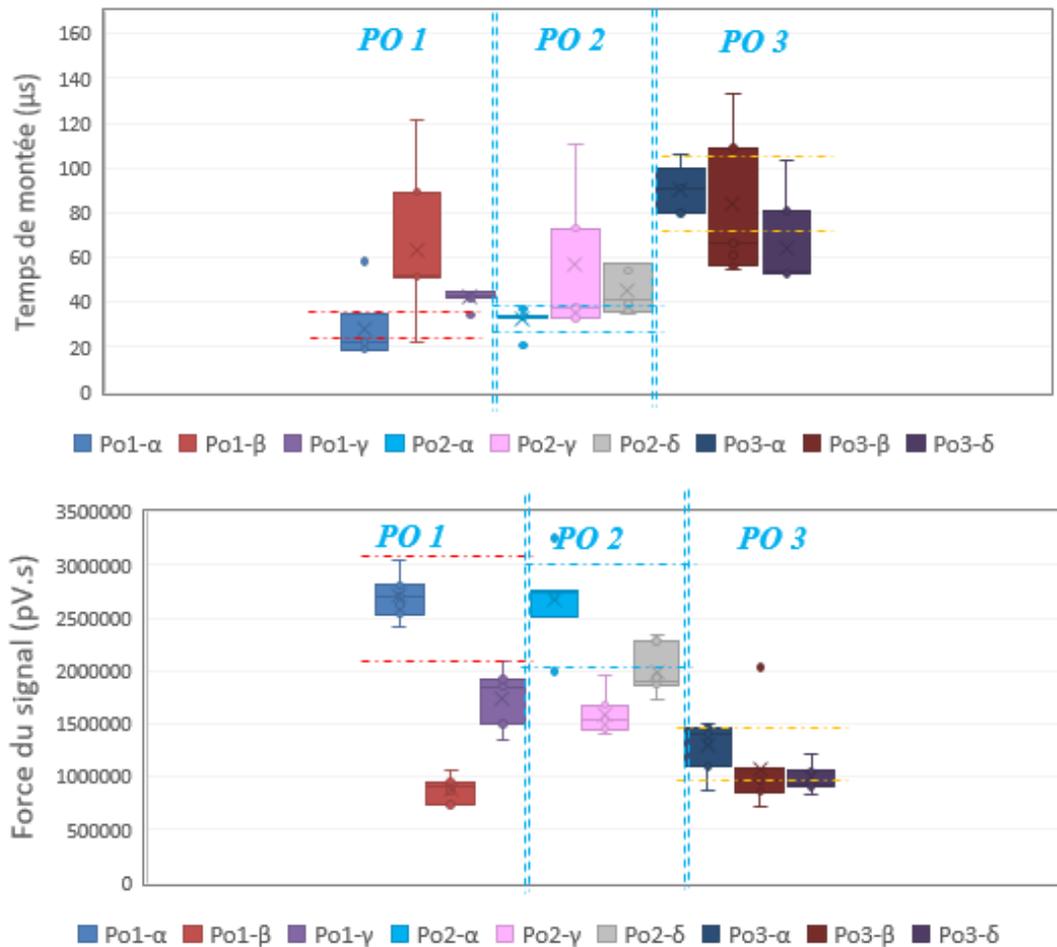


FIGURE 4.11 – Analyse des paramètres a_4 et a_5 des signaux reçus par le capteur n°2 sur les différentes zones d'étude des assemblages BC-Po

4.3.2.3 Synthèse sur la détection des défauts dans les assemblages BC-Po

L'analyse paramétrique a été conduite pour les mesures réalisées sur les assemblages béton-composite "poutre" afin d'évaluer les effets d'un changement d'échelle sur un substrat béton et la présence de plusieurs défauts sur le même linéaire de composite.

Nous avons constaté que l'ensemble des combinaisons de défauts étudiées était détectables pour les deux positions de capteur comme cela a été le cas dans le chapitre 3 (assemblages BC-Da). Notons toutefois que selon la combinaison de défauts réalisée, la pertinence des paramètres à utiliser comme indicateur varie et est tributaire de la position du capteur.

Nous remarquons ainsi que les paramètres jugés les plus pertinents dans le chapitre 3 (assemblages BC-Da) ne le sont pas nécessairement pour les éprouvettes BC-Po. De même, l'atténuation du signal constaté sur certains descripteurs pour la position du capteur n°1 sur les assemblages BC-Da, n'est pas retrouvée dans notre cas. Enfin, le défaut d'adhésion qui semblait être le plus difficile à détecter pour les assemblages BC-Da l'est moins dans cette application de la méthodologie.

En outre, nous observons que le changement d'échelle et la combinaison de défauts dans un même assemblage affecte de manière peu significative l'efficacité de la méthodologie quant à la détection des défauts.

4.3.3 Évaluation de l'identification des défauts dans les assemblages BC-Po

4.3.3.1 Identification par ACP

4.3.3.1.1 ACP par poutre des signaux reçus par le capteur n°1

Nous réalisons sur chaque poutre une ACP des données reçues par le capteur n°1 placé à 230 mm de l'émetteur. Pour toutes les ACP, nous avons du choisir jusqu'à trois composantes principales pour atteindre la part d'inertie minimale de 80% fixée. Les répartitions des signaux dans le plan de l'ACP pour les poutres n°1, n°2 et n°3 sont respectivement représentées sur les figures 4.12, 4.13 et 4.14.

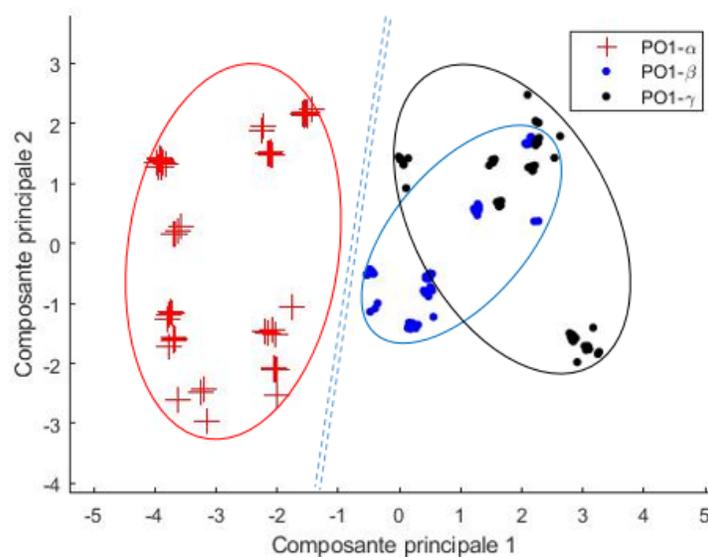


FIGURE 4.12 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le **capteur n°1** sur les zones d'étude de la **poutre n°1** d'assemblage **BC-Po** : représentation des signaux suivant les CP1 et CP2

Ces figures montrent de manière générale une séparation des clusters formés par les signaux reçus sur les zones saines (croix en rouge) des clusters des signaux reçus sur les zones d'étude présentant des défauts. Ainsi, nous pouvons conclure que l'ACP permet de discerner les signaux reçus d'un échantillon sain des signaux reçus d'un échantillon avec défaut et semble donc en mesure de détecter la présence d'un défaut pour cette position de capteur sur les trois poutres. Sur les poutres n°2 et n°3 (figure 4.13 et 4.14), nous enregistrons une bonne séparation des clusters. Cette remarque est tout à fait contraire dans le cas de la poutre n°1 (figure 4.12) où nous avons les deux clusters associés aux défauts qui se superposent.

En outre, contrairement aux résultats de l'ACP dans le chapitre 3 (BC-Da), pour cette position de capteur nous n'arrivons pas à discerner nettement les clusters des signaux reçus dans les

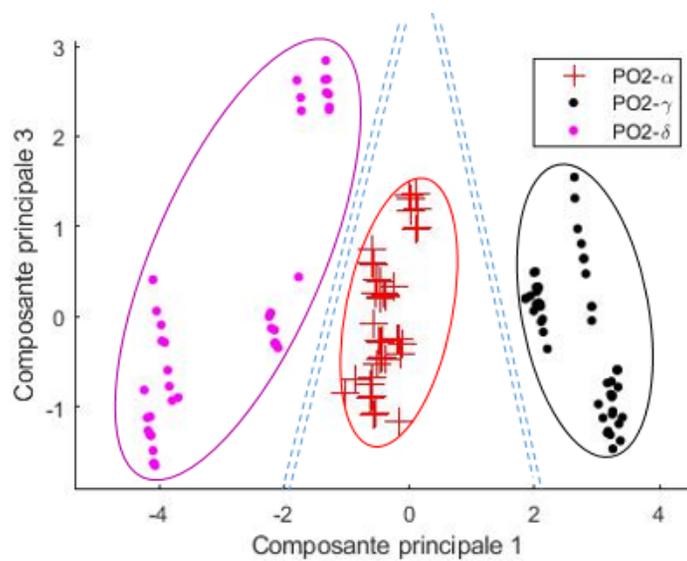


FIGURE 4.13 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le **capteur n°1** sur les zones d'étude de la **poutre n°2** d'assemblage **BC-Po** : représentation des signaux suivant les CP1 et CP3

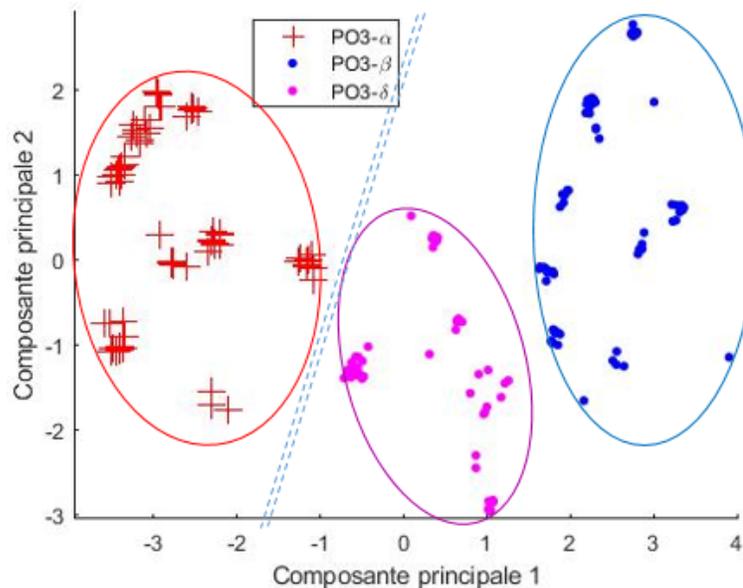


FIGURE 4.14 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le **capteur n°1** sur les zones d'étude de la **poutre n°3** d'assemblage **BC-Po** : représentation des signaux suivant les CP1 et CP2

échantillons avec défaut pour tous les cas étudiés (cas des défauts de type "vide" et de cohésion de la poutre n°1 faisant exception).

4.3.3.1.2 ACP par poutre des signaux reçus par le capteur n°2

La méthode précédente a été appliquée sur les données des mesures effectuées pour le capteur placé au droit du défaut pour les trois poutres étudiées. Les résultats sont présentés sur les figures 4.15, 4.16 et 4.17.

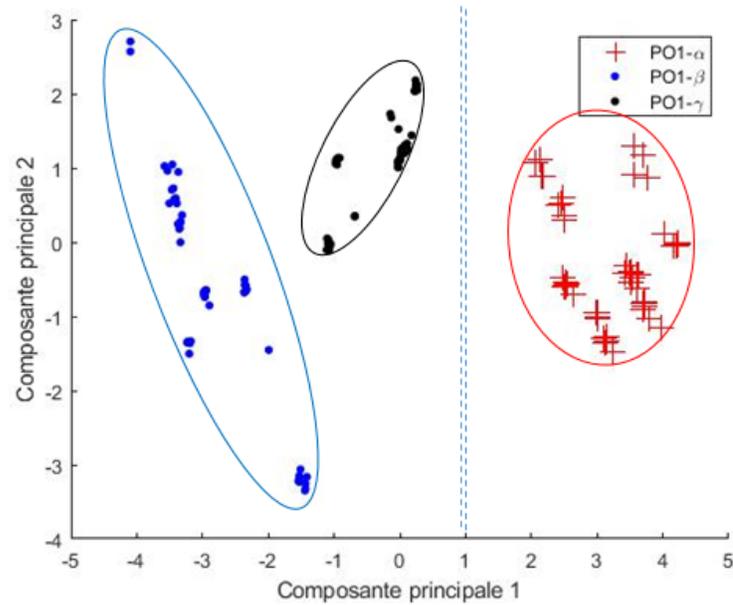


FIGURE 4.15 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le **capteur n°2** sur les zones d'étude de la **poutre n°1** d'assemblage **BC-Po** : représentation des signaux suivant les CP1 et CP2

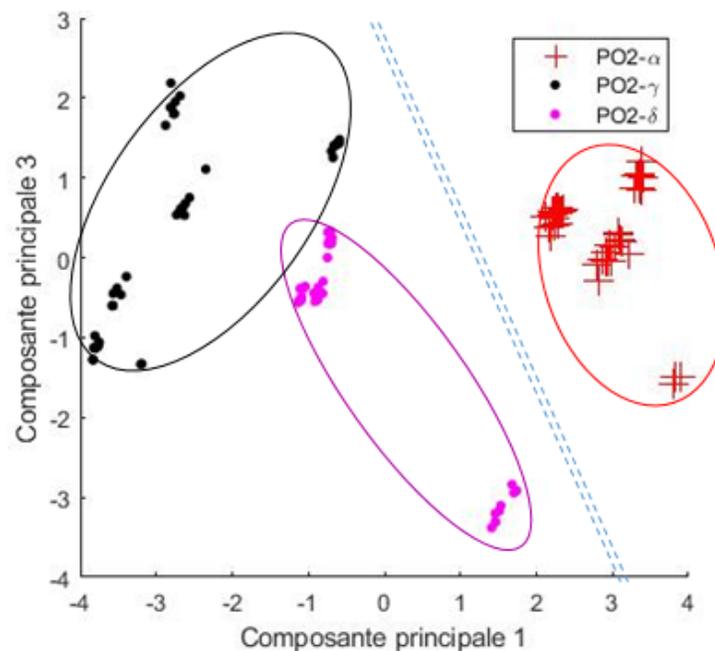


FIGURE 4.16 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le **capteur n°2** sur les zones d'étude de la **poutre n°2** d'assemblage **BC-Po** : représentation des signaux suivant les CP1 et CP3

Par comparaison avec les données collectées pour le capteur n°1, nous constatons une meilleure distinction des clusters pour la poutre n°1 (figure 4.15). Pour la poutre n°2 (figure 4.16), les clusters des signaux collectés sur des zones avec défaut sont également bien discernables entre eux et du cluster des signaux de la zone saine. La détection et l'identification des défauts dans ces poutres semblent donc très satisfaisantes pour cette position de capteur.

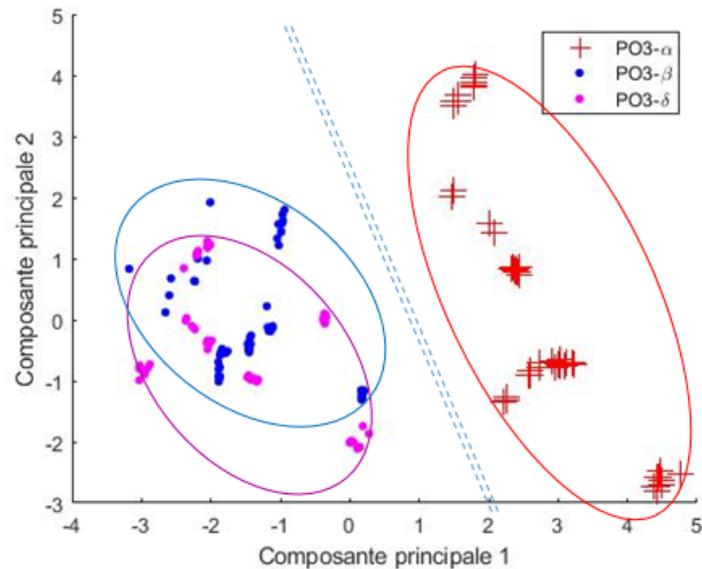


FIGURE 4.17 – Résultats ACP pour les signaux reçus par le **capteur n°2** sur les zones d'étude de la **poutre n°3** d'assemblage **BC-Po** : représentation des signaux suivant les CP1 et CP2

Nous noterons pour la poutre n°3 (figure 4.17) que le cluster formé par les signaux reçus sur la zone avec un défaut d'adhésion (points en magenta) n'est pas bien discernable du cluster des signaux collectés sur la zone contenant un défaut de type "vide" (points en bleu).

Nous pouvons malgré l'effet d'échelle faire un rapprochement entre ce résultat et celui concernant les assemblage BC-Da, du même substrat. En effet, dans le chapitre 3, pour cette position de capteur nous avons constaté que le défaut d'adhésion était plus difficile à détecter avec l'ACP.

4.3.3.1.3 ACP globales des signaux reçus par les capteurs n°1 et n°2

Des ACP globales, par position de capteur, tenant compte des mesures réalisées sur les neuf zones des trois poutres ont été réalisées. Leurs résultats sont présentés sur la figure 4.18.

Nous constatons sur les plans formés de deux composantes principales des ACP que nous n'avons pas la même répartition spatiale des clusters formés par les signaux reçus sur un même type de zone. Nous avons tout de même sur la position du capteur n°2 les clusters des signaux des zones contenant des défauts de type- β (vide) et de type- γ (cohésion) qui semblent se regrouper.

Tel que nous l'avions observé auparavant sur le substrat acier, ces résultats mettent en évidence les limites de la méthode quant à l'obtention d'une référence commune. Dans ce cas également nous allons tenter de surmonter cette difficulté par le recours à la classification supervisée.

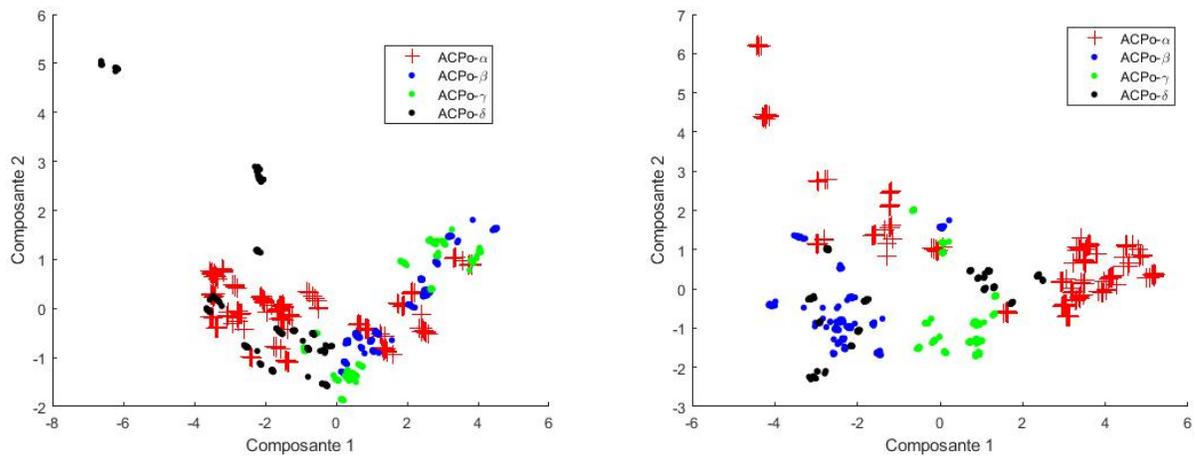


FIGURE 4.18 – Résultats ACP pour les signaux reçus sur tous les assemblages **BC-Po** : à gauche **capteur n°1**, à droite **capteur n°2**

4.3.3.2 Évaluation de l'identification par classification supervisée par une forêt d'arbres décisionnels

Nous construisons notre modèle de classification suivant 4 classes avec pour la classe "sain" l'utilisation de deux séries de mesures réalisées sur chaque zone saine des trois poutres, et pour chaque classe de défaut l'utilisation des trois premières séries de mesures réalisées sur chaque zone. Par conséquent, chaque classe est générée à l'aide de 6 séries de mesures (2 séries de mesures des trois zones saines et 3 séries de mesures des deux zones avec un défaut du même type). Nous générons un modèle constitué de 200 arbres avec une sélection aléatoire sur chaque nœud d'arbre de 3 descripteurs pour notre premier mode de classification (données tableau 2.8) et 4 descripteurs pour le second (données tableau 2.9).

Les 5 séries de mesures restantes par zone saine ainsi que les 4 séries de mesures par zone défectueuse sont utilisées pour tester le modèle.

Pour le premier mode, nous donnons les résultats de la classification des signaux reçus sur les différentes zones d'étude des assemblages BC-Po dans le tableau 4.15.

Les résultats montrent qu'une forte majorité des signaux étudiés sont bien rangés dans leur classe respective, ce qui nous donne globalement avec l'application de la règle de vote majoritaire des taux de reconnaissance allant jusqu'à 95% (tableau 4.16). La zone δ de la poutre n°3 enregistre le plus faible taux de reconnaissance en vote majoritaire ne dépassant pas les 50%. Ainsi, pour ce cas de figure, il faut nécessairement passer en SV60 où on obtient un taux de reconnaissance supérieur aux taux d'erreur.

Nous notons sur cette application des erreurs de classification plus récurrentes que dans le chapitre 3 (Bc-Da) avec des taux de rejet allant jusqu'à 87% des signaux lorsqu'on applique la règle de vote sécuritaire SV60.

Dans le cas présent, les erreurs de classification sont le plus souvent en faveur d'une classe de défaut présente dans le même linéaire de composite sur la poutre. Par exemple, nous avons les

		Classe Sain		Classe vide		Classe souple		Classe Graisse	
		VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60	VM	VS60
Essai sur Poutre n°1	Zone- α	70	68	27	-	3	-	-	-
	Zone- β	-	-	61	23	18	3	2	-
	Zone- γ	-	-	20	12	64	40	-	-
Essai sur Poutre n°2	Zone- α	89	39	-	-	-	-	15	10
	Zone- γ	-	-	10	-	50	30	20	-
	Zone- δ	17	-	-	-	-	-	65	30
Essai sur Poutre n°3	Zone- α	52	9	15	4	10	-	24	-
	Zone- β	-	-	78	50	-	-	4	-
	Zone- δ	9	-	14	10	19	-	40	31

TABLEAU 4.15 – Résultats de la classification par forêt d'arbres décisionnels des données **extraites d'AEWIN** des signaux reçus lors des mesures effectuées sur les zones d'étude des assemblages **BC-Po**

		Vote majoritaire		Vote sécuritaire à 60%		
		Taux de reconnaissance	Taux d'erreur	Taux de reconnaissance	Taux d'erreur	Taux de rejet
Essai sur Poutre n°1	Zone- α	70%	30%	68%	0%	32%
	Zone- β	75%	25%	28%	4%	68%
	Zone- γ	76%	24%	48%	14%	38%
Essai sur Poutre n°2	Zone- α	86%	14%	38%	10%	52%
	Zone- γ	63%	37%	38%	0%	62%
	Zone- δ	79%	21%	37%	0%	63%
Essai sur Poutre n°3	Zone- α	51%	49%	9%	4%	87%
	Zone- β	95%	5%	61%	0%	39%
	Zone- δ	49%	51%	38%	12%	50%

TABLEAU 4.16 – Taux de reconnaissance et d'erreur de la classification des données **extraites d'AEWIN** des signaux reçus lors des mesures effectuées sur les zones d'étude des assemblages **BC-Po**

4 signaux reçus sur la zone- β de la poutre n°3 qui sont rangés par erreur dans la classe "graisse" alors que pour le même type de défaut mais se trouvant sur la poutre n°1, nous avons enregistré la majorité des erreurs de classification sur la classe "souple" avec les 18 signaux qui y sont rangés. Ce constat semble confirmer que le milieu de propagation (la poutre) a une influence majeure sur le signal. Ceci impliquerait que le choix de la zone de référence de nos mesures doit toujours être réinitialisé. Ceci pourrait constituer un biais majeur pour l'extension de la

technique sur site.

Pour le deuxième mode de classification, nous avons constaté similairement au chapitre 3 que son application pour les assemblages du substrat béton (BC-Da et BC-Po) n'augmente pas l'efficacité de la technique.

4.3.3.3 Bilan de l'évaluation de l'effet de la combinaison des défauts sur leur identification

La méthodologie de diagnostic mise en place lors de l'étude des assemblages béton-composite "dalles" (BC-Da) a été testée sur les assemblages BC-Po en vue d'évaluer l'effet du changement d'échelle et de la combinaison de défauts sur la capacité d'identification de ces défauts.

La première méthode d'identification consistant en une analyse en composantes principales révèle une possibilité d'identifier plus ou moins nettement l'ensemble des défauts simulés lorsqu'on raisonne par poutre et en fonction de la position du capteur considéré. Contrairement à ce que nous avons vu pour les assemblages BC-Da, il est impossible dans notre cas de figure de se fixer une référence commune pour les trois poutres. Cette assertion est confirmée par les résultats de l'ACP globale réalisée pour les neuf zones des trois poutres.

Pour la deuxième méthode d'identification, nous avons, via l'algorithme de classification par forêt d'arbres décisionnels, obtenu des taux de reconnaissance plus que convenables permettant de prendre une décision sur la présence et la nature du défaut. Cependant, nous notons une légère diminution des taux de reconnaissance en comparaison avec ceux obtenus sur les assemblages BC-Da. De plus, les taux de rejet enregistrés pour la règle de vote sécuritaire sont plus élevés pour cette application.

En définitive, nous remarquons bien une légère diminution de l'efficacité de la méthodologie quant à l'identification des défauts étudiés due aux effets combinés du changement d'échelle, de la combinaison des défauts et de la variation du milieu de propagation.

Cependant, cette absence de référence commune constitue un verrou important pour le développement de la solution sur site (moins en conditions industrielles maîtrisées). Ceci pourrait également être un frein à l'enrichissement de la bibliothèque d'apprentissage pour une classification supervisée.

4.4 Conclusion

L'objet principal de ce chapitre était d'évaluer la robustesse de la méthodologie de diagnostic (détection et identification des défauts) mise en place dans le chapitre précédent sur des échantillons "modèles" pour deux types d'assemblages généralement rencontrés en génie civil (AC-1P et BC-Da).

Cette évaluation passe par la détermination des effets d'un changement d'échelle avec la proximité de plusieurs linéaires de composite et de la combinaison de plusieurs défauts sur l'efficacité de la méthodologie quant à la détection et l'identification des défauts avec les méthodes développées dans le chapitre 3.

Une première application de la méthodologie a été faite sur des assemblages acier-composite "multi-plaques" (AC-3P) composés de plaques d'acier carrées de 350 mm de côté sur lesquelles trois linéaires de composite de 300 mm de long ont été collés. Nous avons reproduit sur deux plaques d'acier six assemblages avec pour chaque plaque un assemblage sain et deux avec défaut. Sur une troisième plaque d'acier, nous avons réalisé un unique assemblage sain servant de témoin. Nous avons effectué sept séries de mesures indépendantes d'AUS sur chaque assemblage suivant le protocole de mesure détaillé au chapitre 2 dont nous avons vérifié la répétabilité via un calcul des coefficients de corrélation temporels et fréquentiels.

L'application de la méthode de détection qui est une analyse mono-paramétrique a révélé que le changement d'échelle et la proximité des assemblages affectent légèrement l'efficacité de la méthode. En effet, pour cette application, il semble possible de détecter tous les défauts étudiés. Cependant, leur détection n'est possible que lorsque l'assemblage de référence est pris dans la même plaque d'origine. Nous avons en effet observé pour les deux positions de capteur étudiées que les valeurs des descripteurs extraits du domaine temporel n'ont pas le même ordre de grandeur dans les trois assemblages de référence étudiés. Le domaine fréquentiel semble lui moins affecté par l'effet de la plaque d'appartenance.

Dans la première méthode d'identification consistant en une analyse en composantes principales (ACP) réalisée par plaque d'acier, les clusters formés par les signaux reçus dans les différents assemblages sont discernables les uns des autres. Toutefois, nous avons remarqué pour le capteur n°1 placé à 230 mm de l'émetteur que le cluster des signaux collectés dans l'assemblage présentant un défaut de cohésion était difficilement discernable. L'application de la classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels qui est la deuxième méthode d'identification proposée a été concluante même si les taux de reconnaissance observés ont légèrement diminué en comparaison du chapitre précédent. Le changement d'échelle semble ainsi moins affecter l'efficacité de la méthodologie proposée concernant cette méthode d'identification.

Afin d'évaluer son efficacité en présence de multiples défauts, la méthodologie a également été appliquée à des assemblages collés béton-composite "poutre" (BC-Po) constitués de poutres en béton armé de 3.4 m de long sur lesquelles un linéaire de composite de 3 m a été collé en incorporant sur chaque assemblage deux défauts de manière excentrée (à 75 cm des bords). Trois assemblages ont été réalisés avec une combinaison par couple de défauts des trois types étudiés dans cette thèse (vide, cohésion et adhésion). Nous nous sommes également assuré sur chaque poutre de laisser une zone centrale saine en plus des deux zones comportant des défauts. Nous avons réalisé sept séries de mesures indépendantes et répétables sur chacune des 9 zones avec le même protocole d'essai que lors de la campagne sur les assemblages modèles BC-Da.

L'analyse mono-paramétrique appliquée à ces données de mesures a révélé que pour toutes les combinaisons de défauts réalisées la méthode reste efficace quant à la détection de ces défauts par poutre. Cependant, nous avons remarqué une différence sur les paramètres pertinents

pour réaliser cette détection ainsi que leur comportement face à la présence du défaut. Ainsi, pour la position du capteur placé à 230 mm de l'émetteur, les descripteurs énergétiques présentent des valeurs plutôt à la hausse en présence de défaut (contrairement au chapitre 3).

Avec une ACP par poutre, l'identification des défauts est réalisable en fonction de la position du capteur considéré. Nous avons vu que selon la poutre étudiée, on peut avoir une bonne distinction des clusters pour une position de capteur et pas pour l'autre. Ainsi pour la première poutre combinant le couple de défauts vide-cohésion, les clusters des défauts ne sont pas discernables pour le capteur n°1. Pour la troisième poutre combinant le couple de défauts vide-adhésion, les clusters ne sont pas discernables pour le capteur n°2.

Nous avons tout de même pu identifier les défauts en combinant les données des deux capteurs pour toutes les poutres via la méthode de classification par forêt d'arbres décisionnels. Nous avons néanmoins obtenu des taux de reconnaissance plus faibles que ceux constatés au chapitre 3. De plus, nous avons remarqué que le taux de reconnaissance d'un type de défaut était variable en fonction de la combinaison considérée.

Les dispositifs d'essai étudiés pour ces assemblages AC-3P et BC-Po nous rapprochent davantage de la réalité des ouvrages sur site. Au vu des conclusions de cette étude, nous retenons que le choix de la référence reste un enjeu majeur pour l'application de cette méthodologie. Ainsi, un problème sur la pertinence de la bibliothèque et de son enrichissement pour la classification supervisée pourrait se poser. Afin d'essayer d'apporter des éléments de réponse à cette problématique, nous utiliserons les outils de la modélisation par éléments finis des acousto-ultrasons. Une fois mis au point, ces outils pourront nous permettre d'avoir une meilleure compréhension des caractéristiques acoustiques des défauts. Nous pourrions également les utiliser pour améliorer l'apprentissage des modèles de classification ou optimiser le choix des descripteurs.

CHAPITRE 5

ÉVALUATION DES APPORTS DE LA MODÉLISATION DU CND PAR ACOUSTO-ULTRASONS

« Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit. »

Gaston Bachelard

Sommaire

5.1	Introduction	166
5.2	Étude de l'effet du capteur en réception	167
5.2.1	Comparaison des capteurs : formes d'ondes et transformées de Fourier	167
5.2.2	Évolution des descripteurs pour l'assemblage sain	170
5.3	Confrontation entre signaux simulés et signaux expérimentaux	171
5.3.1	Comparaison des signaux reçus par le capteur n°1 (d = 230 mm)	171
5.3.2	Comparaison des signaux reçus pour la position du capteur n°2 (d = 115 mm)	172
5.4	Évaluation de l'utilisation du modèle pour la détection des défauts	174
5.4.1	Évaluation dans le domaine temporel des effets de la présence du défaut sur le signal	174
5.4.2	Évaluation dans le domaine fréquentiel des effets de la présence du défaut sur le signal	174
5.5	Conclusion	177

5.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est une évaluation du potentiel offert par la simulation numérique par éléments finis de la propagation des ondes ultrasonores dans un assemblage collé pour une meilleure compréhension de leur interaction avec un défaut au sein du joint de colle et une meilleure sélection des paramètres pertinents pour le détecter.

Trois modèles par éléments finis ont été réalisés : l'un reproduisant l'assemblage acier-composite "mono-plaque" (AC-1P) "sain" (type- α) et les deux autres les assemblages "vide centré" (type- β_1) et "tiers vide" (type- β_2). Des éléments hexaédriques linéaires C3D8 de 2mm ont été choisis pour le maillage des modèles. Pour la modélisation de la source du signal, notre choix s'est orienté vers un signal ponctuel sinusoïdal de 150 kHz de fréquence et dont l'atténuation au sein de l'éprouvette est régie par le modèle d'atténuation de Rayleigh.

Nous adoptons trois types d'approches pour modéliser le capteur récepteur :

- un capteur virtuel parfait sensible à toutes les fréquences pour lequel l'acquisition des signaux est réalisé sur un seul point de mesure, soit le déplacement d'un seul nœud,
- un capteur surface sensible à toutes les fréquences où l'acquisition se fait en moyennant les valeurs obtenues sur les différents points d'une surface donnée correspondant à la surface d'un capteur réel
- et un capteur de type R15 qui est un capteur surface prenant en compte la fonction de sensibilité en réception du capteur R15 obtenue par calibration à l'aide de la méthode de réciprocité [112] [125].

Dans la première partie du chapitre, nous comparerons ces trois approches en visualisant tout d'abord les signaux reçus dans les domaines temporel et fréquentiel. Ces approches seront également analysées par l'évaluation paramétrique de la propagation du signal suivant le modèle représentant l'assemblage "sain" pour la position du capteur n°1 (à 230 mm de l'émetteur).

Dans la deuxième partie, nous effectuerons une comparaison des résultats expérimentaux exposés dans le chapitre 3 concernant ces assemblages AC-1P (type- α et type- β_2) avec les résultats de la simulation numérique.

En dernier lieu, nous évaluerons le comportement du signal en présence du défaut en comparant les trois modèles simulés. Cette dernière partie nous permettra de dégager des perspectives quant à la possibilité d'utiliser nos modèles pour le contrôle non destructif des assemblages collés et permettra également d'extraire des informations concernant le choix des paramètres les plus pertinents pour réussir ce diagnostic.

5.2 Étude de l'effet du capteur en réception

Les positions des capteurs où le déplacement est mesuré sont centrées sur l'axe horizontal de l'éprouvette comme illustré sur la figure 5.1. Comme pour la méthodologie utilisées lors des investigations expérimentales, nous reproduisons l'émission du signal à 35 mm du bord de la plaque de composite, le capteur n°2 étant placé à 115 mm de l'émission au droit du défaut, et le capteur n°1 à 230 mm. Nous rajoutons en plus six positions de capteur signalées par les flèches en bleu sur la figure 5.1 pour étudier la propagation du signal à travers l'éprouvette.

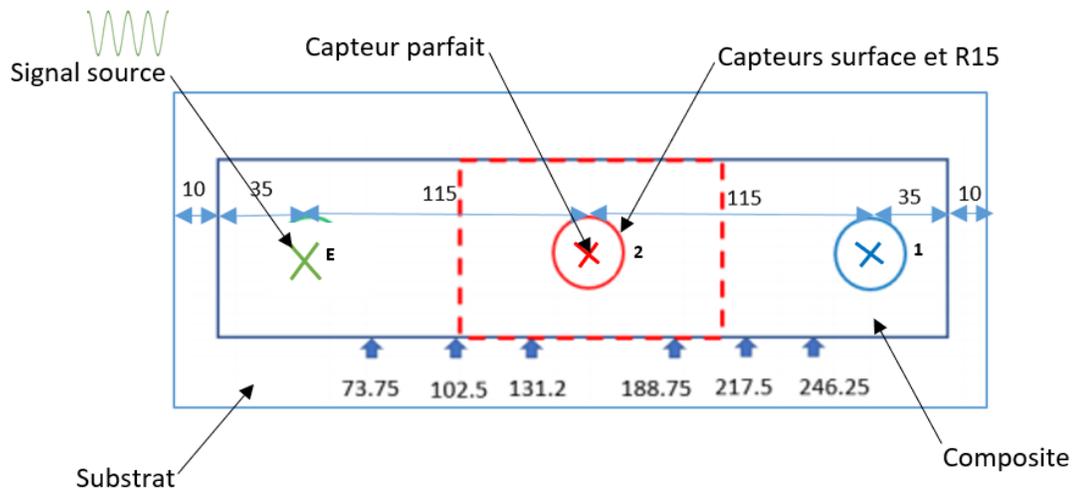


FIGURE 5.1 – Disposition des points de calcul du déplacement (distance en millimètres)

5.2.1 Comparaison des capteurs : formes d'ondes et transformées de Fourier

Nous réalisons une première comparaison des résultats obtenus selon les différentes approches de modélisation du capteur récepteur. Cette comparaison est d'abord faite à partir des signaux reçus pour la position du capteur n°1 pour l'éprouvette de type- α dans les domaines temporel et fréquentiel. Sur les figures 5.2 et 5.3, nous présentons les résultats de cette comparaison dans les deux domaines.

Nous notons sur la figure 5.2 que le capteur parfait et le capteur surface enregistrent des signaux dans le domaine temporel pratiquement similaires avec une légère diminution du temps de montée pour le capteur surface. Si on ajoute la sensibilité du capteur R15, on note une amplification des fréquences autour de 150 kHz (la fréquence de résonance du capteur R15) (figure 5.3) et une atténuation des plus basses fréquences. Les barycentres fréquentiels dans les trois approches se situent autour de la fréquence de l'émission (150 kHz) avec un pic fréquentiel qui est plus variable en raison des nombreux modes excités lors de la propagation du signal.

Le gommage des plus basses fréquences suite à l'ajout de la sensibilité du capteur R15 est plus marqué pour la position du capteur n°2 (figure 5.4). Nous noterons que, pour cette position de

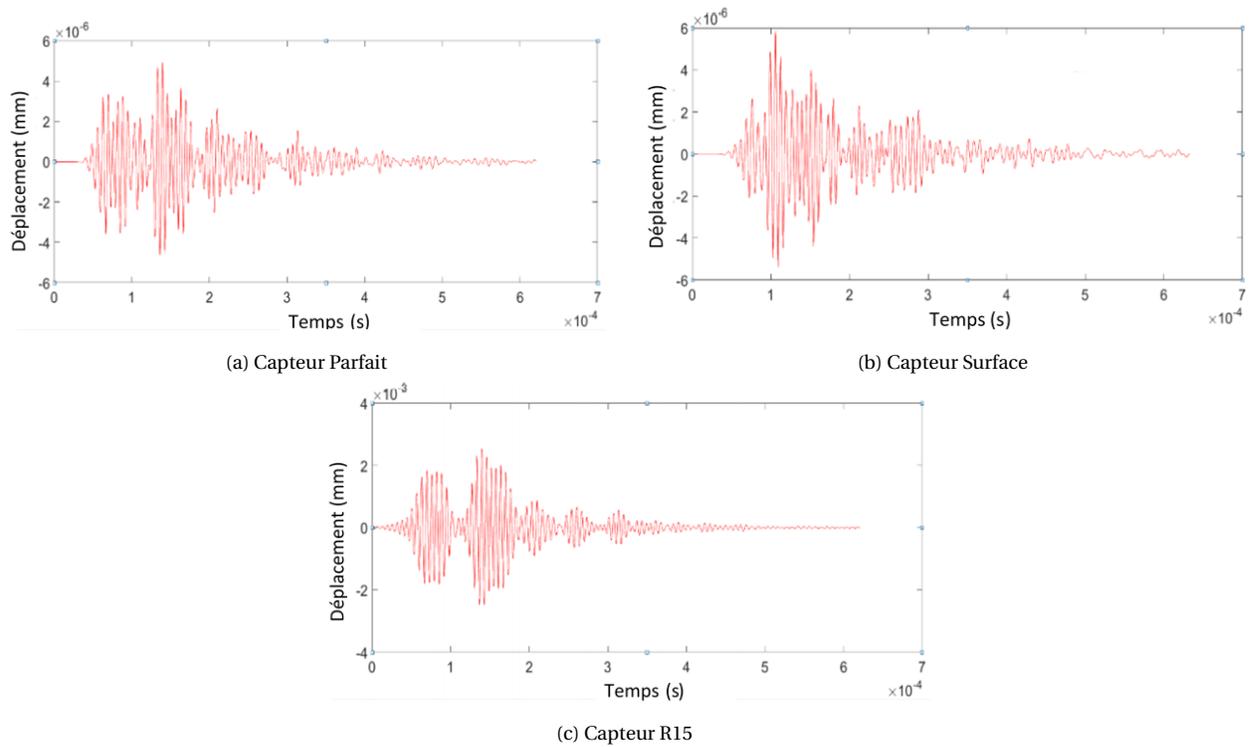


FIGURE 5.2 – Comparaison dans le domaine **temporel** des signaux simulés reçus sur la position du **capteur n°1** de l'assemblage sain AC-1P

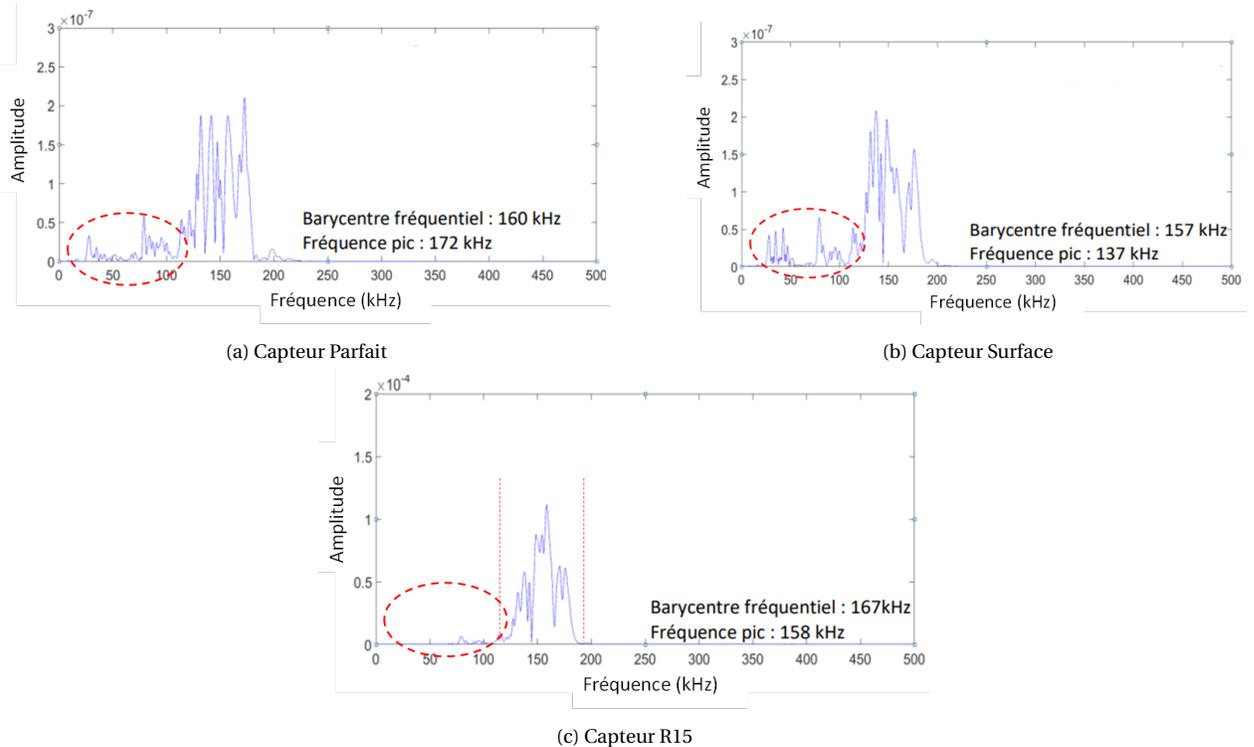


FIGURE 5.3 – Comparaison dans le domaine **fréquentiel** des signaux simulés reçus sur la position du **capteur n°1** de l'assemblage sain AC-1P

capteur, en présence de défaut de type vide les basses fréquences entre 25 et 50 kHz sont les plus sollicitées avec le capteur parfait. L'inhibition de ces basses fréquences est donc d'autant plus gênant du fait qu'elle rend éventuellement le défaut plus difficilement détectable.

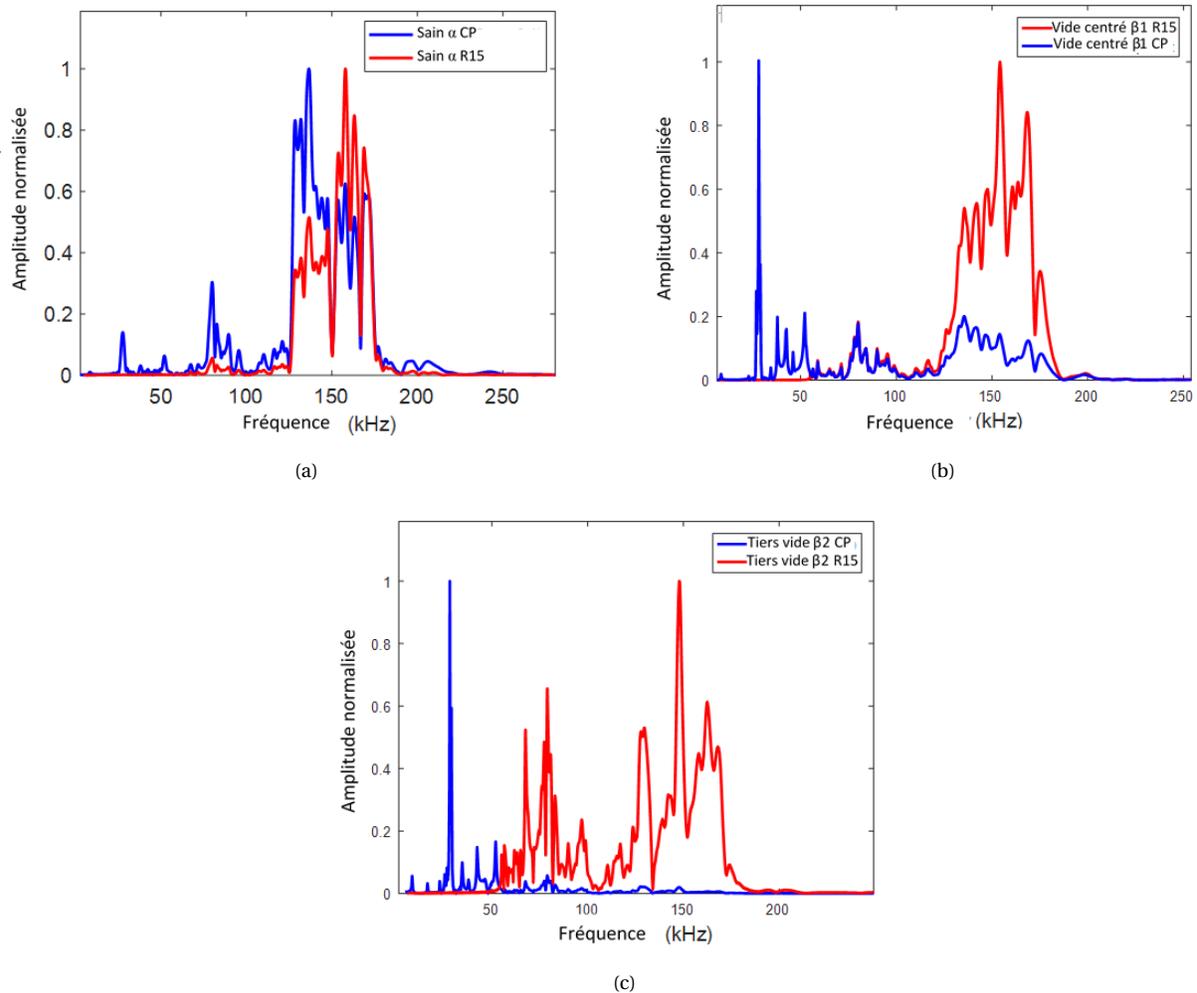


FIGURE 5.4 – Comparaison dans le domaine **fréquentiel** des signaux simulés reçus sur la position du **capteur n°2** : a) assemblage sain, b) assemblage vide centré (type-β1), c) assemblage tiers vide (type-β2), pour le capteur parfait (CP) et le capteur R15

En somme les résultats de cette comparaison montrent que l'effet de la taille du capteur est peu conséquent sur le signal reçu dans le domaine fréquentiel (capteur parfait VS capteur surface). Cependant, lorsqu'on se rapproche d'avantage des capteurs réels (R15) nous remarquons une forte coloration du signal reçu. Cette coloration est marquée par un gommage des plus basses fréquences et est plus manifeste pour la position du capteur située au dessus du défaut.

5.2.2 Évolution des descripteurs pour l'assemblage sain

Nous avons vu que le passage d'un capteur parfait à un capteur surface n'affectait que légèrement le signal dans le domaine temporel mais que lorsqu'on prend en compte la sensibilité du capteur R15 on retrouve un signal amplifié dans une bande fréquentielle centrée autour de la fréquence de résonance du capteur.

La figure 5.5 montre l'évolution de paramètres extraits du signal simulé en fonction de la distance par rapport à l'émetteur.

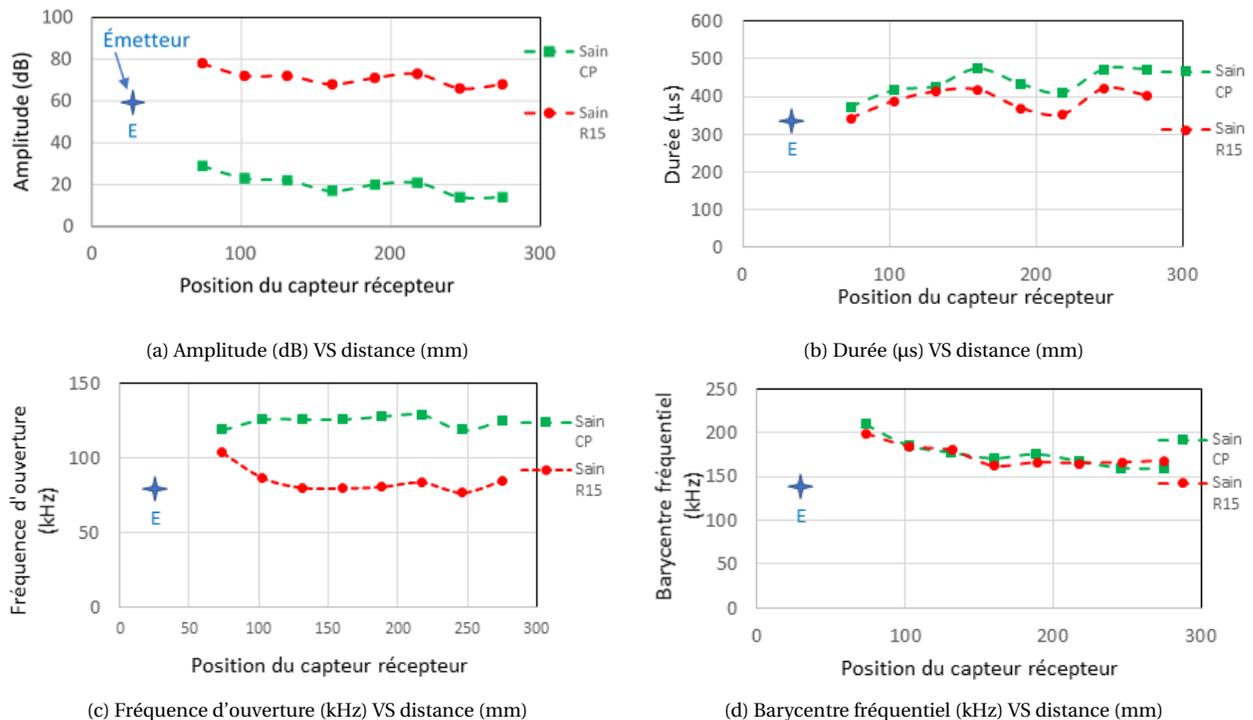


FIGURE 5.5 – Évolution des descripteurs en fonction de la position pour les capteurs CP et R15 : a) amplitude (dB), b) durée (µs), c) fréquence d'ouverture (kHz), et d) barycentre fréquentiel (kHz)

Nous notons sur cette figure une atténuation progressive mais peu accentuée de l'amplitude due certainement à l'atténuation du signal dans le milieu. La durée quant à elle a tendance à légèrement augmenter avec la distance de propagation. Le barycentre fréquentiel et la fréquence d'ouverture ont également tendance à diminuer, ce qui traduit la diminution des plus hautes fréquences en faveur des plus basses qui se propagent plus loin dans le milieu.

Les effets de l'ajout de la sensibilité du capteur R15 sont retrouvés sur la fréquence d'ouverture et l'amplitude. Sur l'amplitude, nous avons une amplification du signal reçu sur toutes les positions de capteurs à plus de 40 dB. L'augmentation des valeurs observé sur la fréquence d'ouverture est due elle à l'inhibition des plus basses fréquences par l'ajout de la sensibilité du capteur comme illustré sur la figure 5.3.

La durée du signal et le barycentre fréquentiel semblent rester du même ordre de grandeur lorsqu'on passe d'un capteur parfait à un capteur R15.

5.3 Confrontation entre signaux simulés et signaux expérimentaux

Nous avons réalisé une comparaison des signaux simulés et expérimentaux reçus sur les assemblages AC-1P de types- α et de type- β 2 par position de capteur. Nous utilisons pour cette comparaison l'approche modélisant le capteur récepteur comme un R15. Il convient de noter cependant qu'en raison des signaux émis différents, cette comparaison ne peut pas se faire de manière quantitative en terme d'intensité des signaux mais plutôt qualitativement par appréciation des formes d'ondes et spectres fréquentiels. De plus, nous pourrions apprécier en simulation et en expérimentation les perturbations dans les signaux reçus lors de la présence du défaut de type "tiers vide".

5.3.1 Comparaison des signaux reçus par le capteur n°1 ($d = 230$ mm)

La première comparaison entre signaux simulés et signaux expérimentaux est réalisée pour la position du capteur n°1 placé à 230 mm de l'émetteur. Nous représentons sur les figures 5.6 et 5.7 respectivement pour l'assemblage sain et celui avec défaut, les signaux simulés et expérimentaux dans les domaines temporel, fréquentiel et temps-fréquence.

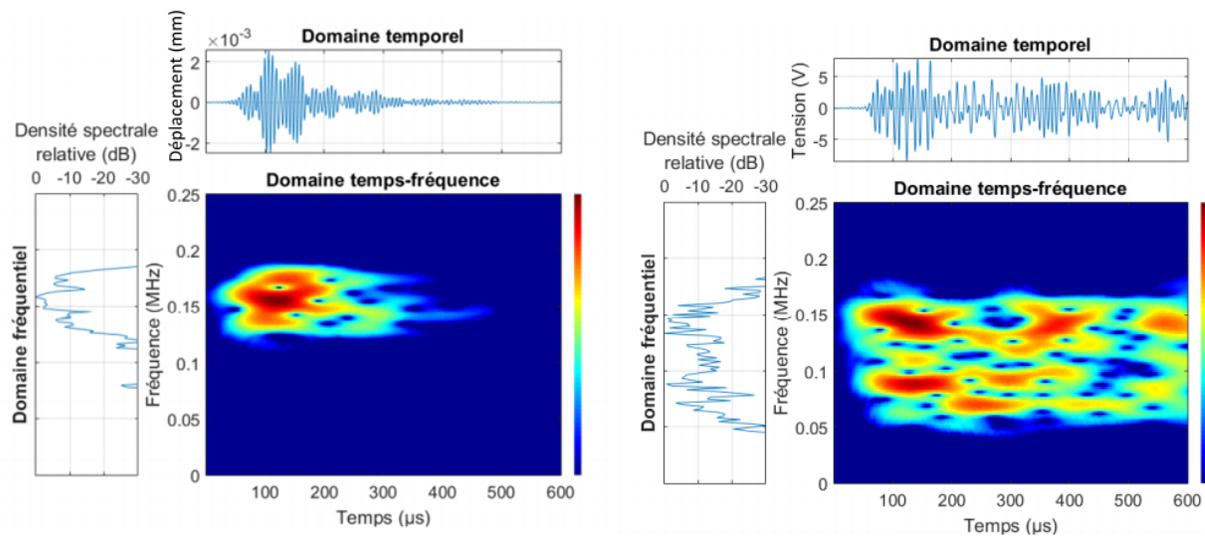


FIGURE 5.6 – Comparaison dans les trois domaines des signaux reçus sur l'échantillon **sain de type- α** pour la position du **capteur n°1** : à gauche signal numérique, à droite signal expérimental

La différence majeure constatée est d'abord la présence supplémentaire pour les signaux expérimentaux d'une bande fréquentielle centrée autour de 80 kHz et qui est absente dans le signal résultant de la simulation. Nous voyons tout de même que dans les deux méthodes il est difficile de détecter le défaut pour cette position de capteur. Nous notons en effet une grande ressemblance en simulation comme en expérimentation entre les signaux reçus sur l'échantillon sain (figure 5.6) et les signaux reçus sur l'échantillon défectueux (figure 5.7). Cette conclu-

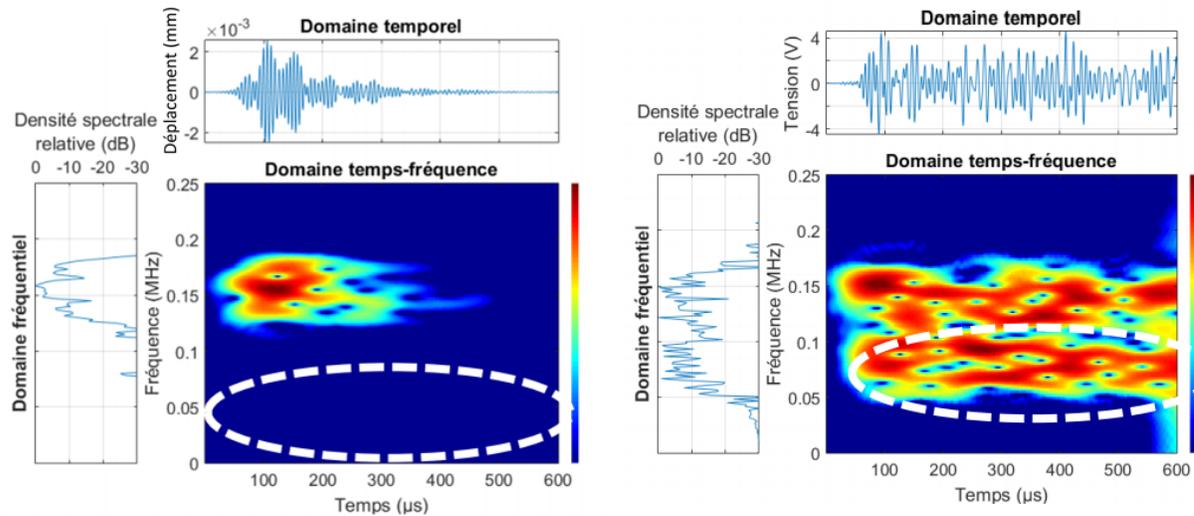


FIGURE 5.7 – Comparaison dans les trois domaines des signaux reçus sur l'échantillon **tiers vide de type-β2** pour la position du **capteur n°1** : à gauche signal numérique, à droite signal expérimental

sion est cohérente avec les résultats obtenus dans l'analyse paramétrique des signaux pour la détection de ce type de défaut pour cette position de capteur détaillée dans la section 3.2.2.

5.3.2 Comparaison des signaux reçus pour la position du capteur n°2 ($d = 115 \text{ mm}$)

Pour la position du capteur n°2 qui est placé au droit du défaut, nous réalisons la comparaison sur les trois domaines des signaux simulés et expérimentaux reçus sur les assemblages sain et avec défaut un tiers de vide. Les résultats de cette comparaison sont illustrés sur les figures 5.8 et 5.9.

Pour cette position de capteur, nous notons des différences entre simulation et expérimental pour l'assemblage sain (figure 5.8) qui sont pratiquement similaires à celles observées pour la position du capteur n°1. Nous remarquons sur l'assemblage avec un tiers de vide (figure 5.9) que la présence du défaut affecte fortement les signaux reçus en expérimental comme en simulation. Cependant, lorsqu'on compare entre assemblages sain et avec défaut pour cette position de capteur, nous remarquons que la présence du défaut en expérimental est marquée par une inhibition du contenu des basses fréquences contrairement à la simulation où nous avons une amplification de ces basses fréquences.

Ces différences entre les résultats de la modélisation et de l'expérimental peuvent être dues à la combinaison de plusieurs facteurs :

- modélisation incomplète de la source, la sensibilité du capteur en émission et sa surface ne sont pas prises en compte,
- le couplant et l'effet de la chaîne d'acquisition ne sont pas modélisés.

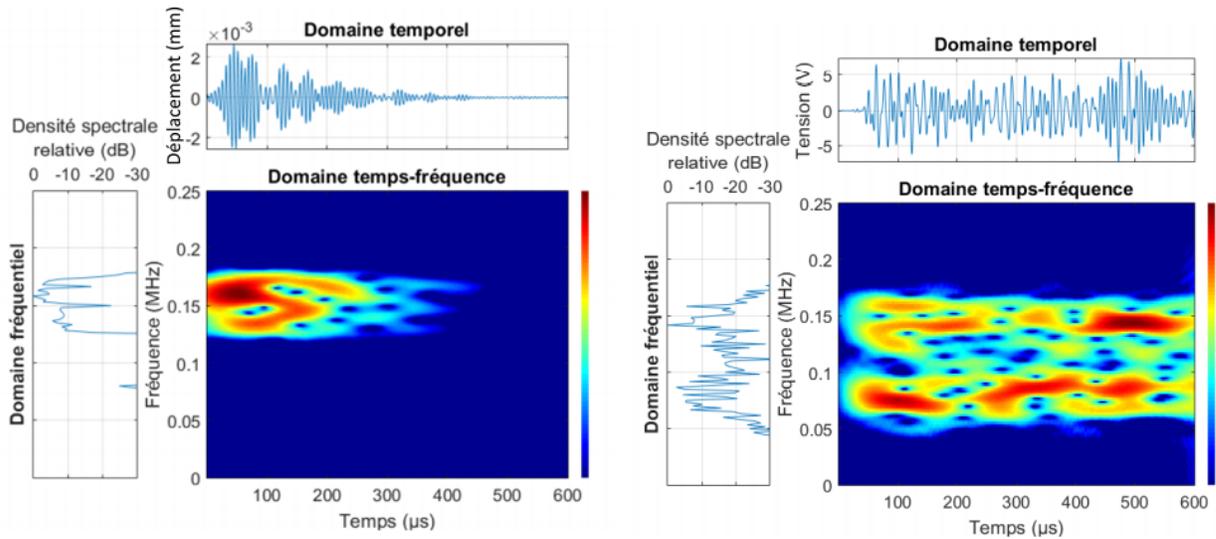


FIGURE 5.8 – Comparaison dans les trois domaines des signaux reçus sur l'échantillon **sain de type- α** pour la position du **capteur n°2** : à gauche signal numérique, à droite signal expérimental

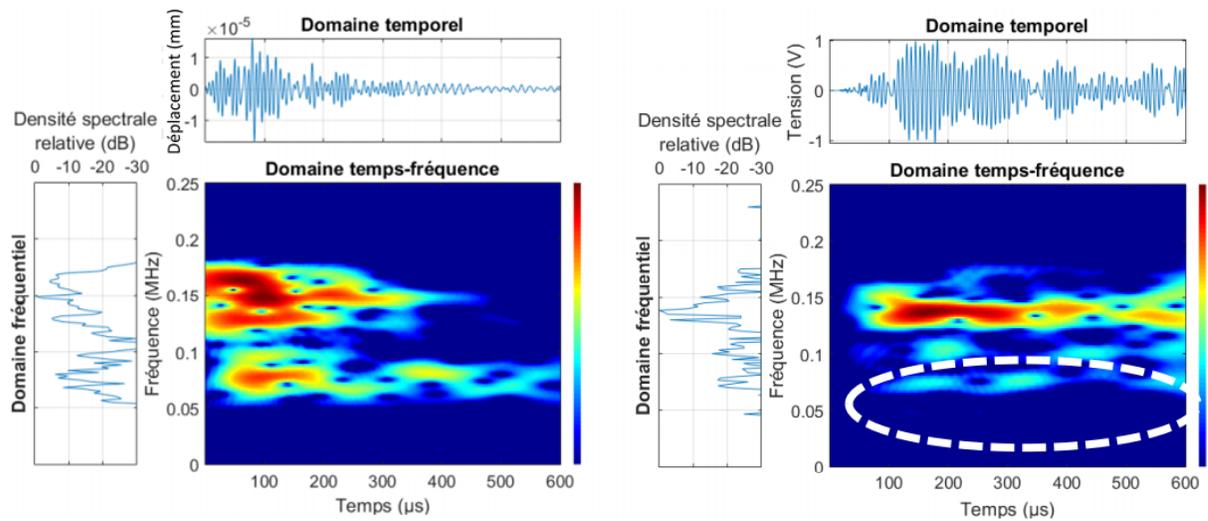


FIGURE 5.9 – Comparaison dans les trois domaines des signaux reçus sur l'échantillon **tiers vide de type- β 2** pour la position du **capteur n°2** : à gauche signal numérique, à droite signal expérimental

Cependant, les résultats confirment une modification importante du signal au droit du défaut et notamment dans le domaine fréquentiel.

5.4 Évaluation de l'utilisation du modèle pour la détection des défauts

5.4.1 Évaluation dans le domaine temporel des effets de la présence du défaut sur le signal

Nous comparons dans cette partie les trois modèles réalisés l'un sans défaut (type- α) et les autres avec une zone centrale de l'éprouvette constituée de vides de différentes tailles (type- β 1 et type- β 2). Sur la figure 5.10, nous présentons l'évolution de paramètres en fonction de la propagation pour les différents assemblages avec les deux approches de modélisation du capteur récepteur : capteur parfait (CP) et capteur R15.

Nous remarquons nettement sur cette figure l'effet de la présence des défauts sur la propagation du signal. En effet, nous constatons que les perturbations sur le signal ont lieu entre la 3ème (131.2 mm) et la 5ème ((188.75 mm) position de capteur pour le défaut de type vide centré. De même, les perturbations du signal sur le modèle tiers vide sont situées entre la 2ème position de capteur (102.5mm) et la 6ème position de capteur (217.5mm).

Nous notons sur les capteurs au droit des défauts une diminution progressive de l'amplitude du signal et une augmentation de sa durée. L'ajout de la sensibilité du capteur R15 ne modifie pas l'évolution globale de l'amplitude en présence des défauts.

Pour ce qui est de la durée du signal, nous remarquons que l'ajout du capteur R15 ne modifie pas la valeur de ce descripteur pour les positions de capteur hors du défaut ainsi que pour le modèle de l'assemblage sain. Cependant, la sensibilité du capteur R15 a tendance à inhiber l'effet de la présence du défaut pour ce descripteur. C'est ainsi que le défaut vide centré devient non détectable même pour la position du capteur n°2 (au droit du défaut, 160 mm).

5.4.2 Évaluation dans le domaine fréquentiel des effets de la présence du défaut sur le signal

Dans le domaine fréquentiel (figure 5.11), nous remarquons que le barycentre fréquentiel et la fréquence d'ouverture présentent une diminution progressive au droit des défauts. Cette diminution correspond à un décalage du spectre fréquentiel vers les basses fréquences en présence du défaut. On peut également retrouver ce phénomène en faisant une comparaison des signaux dans le domaine temps-fréquence pour la position du capteur n°2 dans un modèle sans défaut (figure 5.8) et dans un modèle avec un défaut de type- β 2 (figure 5.9). Ceci peut être vérifié en retraçant les puissances partielles observées sur chaque position de capteur pour ces deux modèles (figure 5.12).

Nous notons que pour les capteurs positionnés au dessus du défaut, les basses fréquences formant la puissance partielle 2 (50 à 125 kHz) gagnent en intensité au détriment de la puissance partielle 3 (125 à 250 kHz) qui en perd. Les puissances partielles 1 et 4 (de 0 à 50 kHz et de 250 à

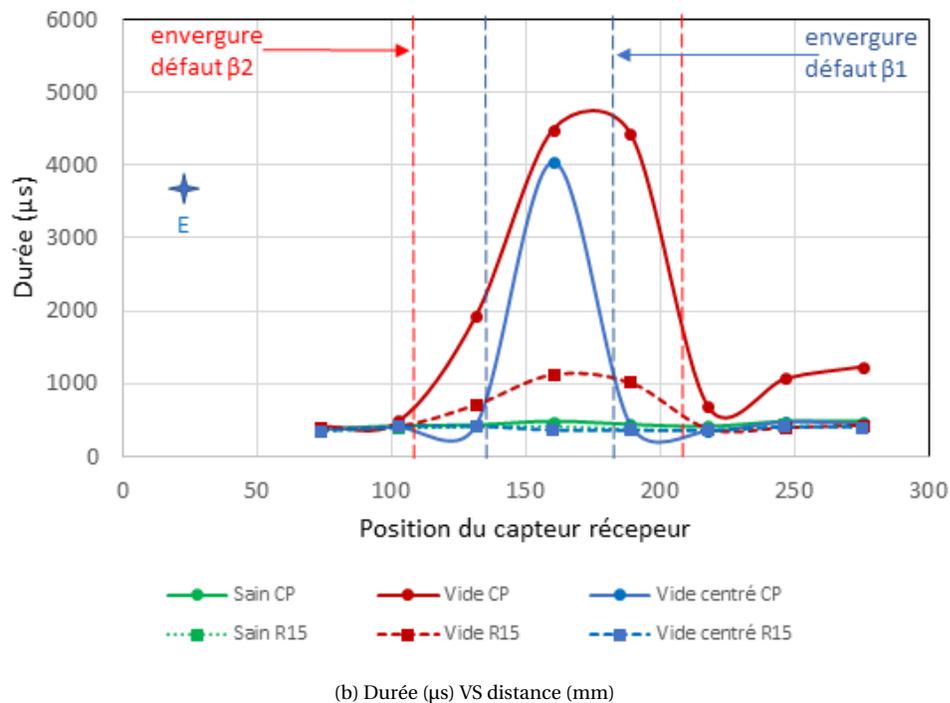
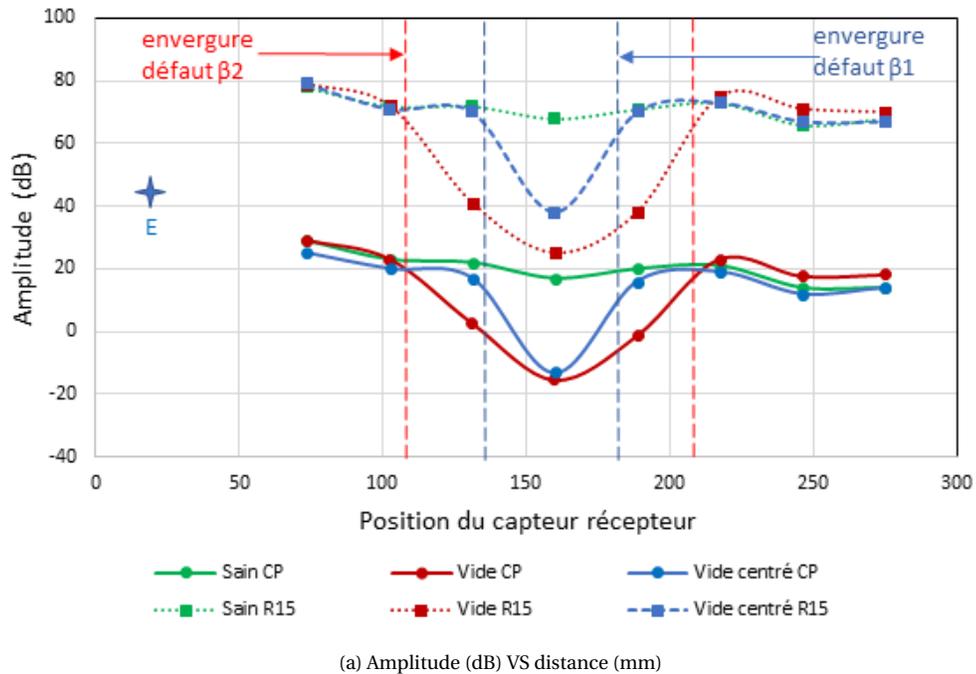
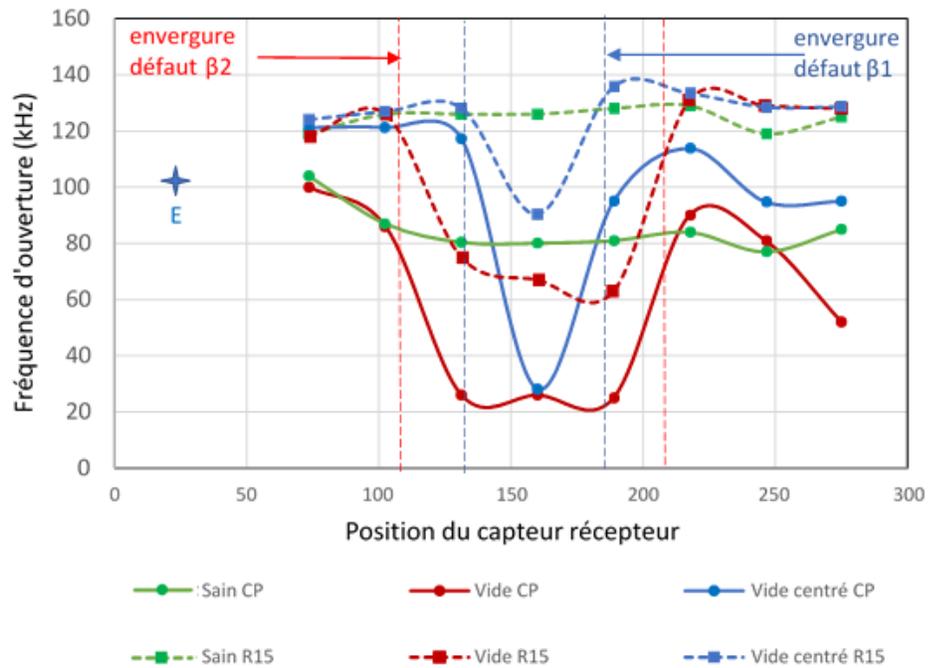


FIGURE 5.10 – Évolution des descripteurs en fonction de la position du capteur récepteur pour des assemblages saint et avec défaut et deux types de capteurs : a) amplitude (dB) et b) durée (μs),

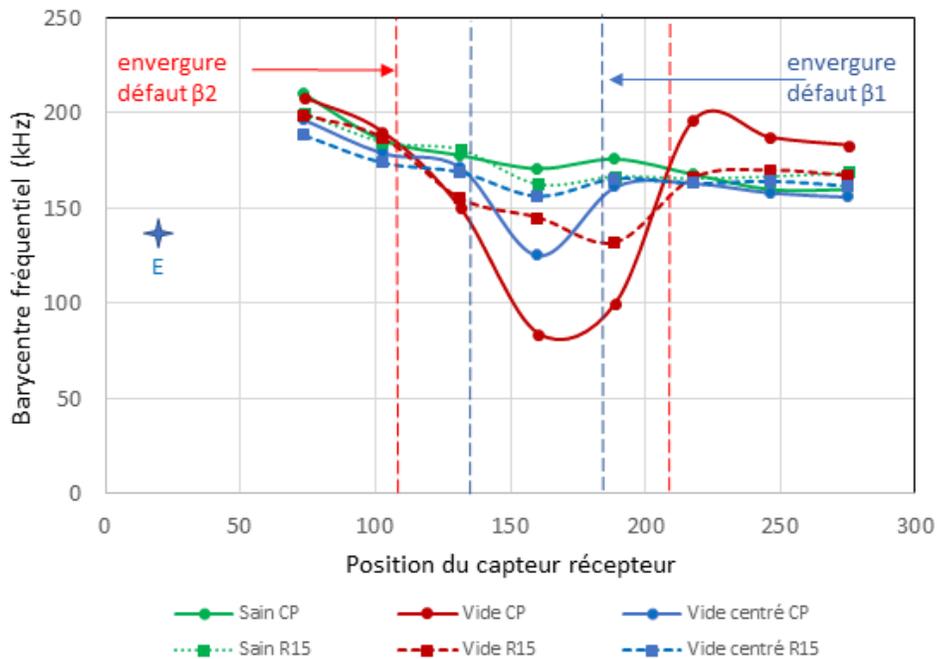
500 kHz) ne semblent pas être affectées par la présence du défaut.

Sur la figure 5.12 nous retrouvons également l’atténuation des plus hautes fréquences lors de la propagation du signal dans un milieu sans défaut traduit par la diminution progressive de l’intensité de la PP4.

L’ajout de l’effet du capteur R15 modifie le signal et notamment au droit du défaut. Les dif-



(a) Fréquence d'ouverture (kHz) VS distance (mm)



(b) Barycentre fréquentiel (kHz) VS distance (mm)

FIGURE 5.11 – Évolution des descripteurs en fonction de la position du capteur récepteur pour des assemblages sain et avec défaut et deux types de capteurs : a) fréquence d'ouverture (kHz), et b) barycentre fréquentiel (kHz)

férences significatives mises en évidence par le capteur parfait sont atténuées rendant ainsi la détection des défauts difficile en fonction de taille de ce dernier. Une perspective sur un choix

de capteur optimisé pourrait ainsi se dessiner en se basant sur ces modèles par éléments finis.

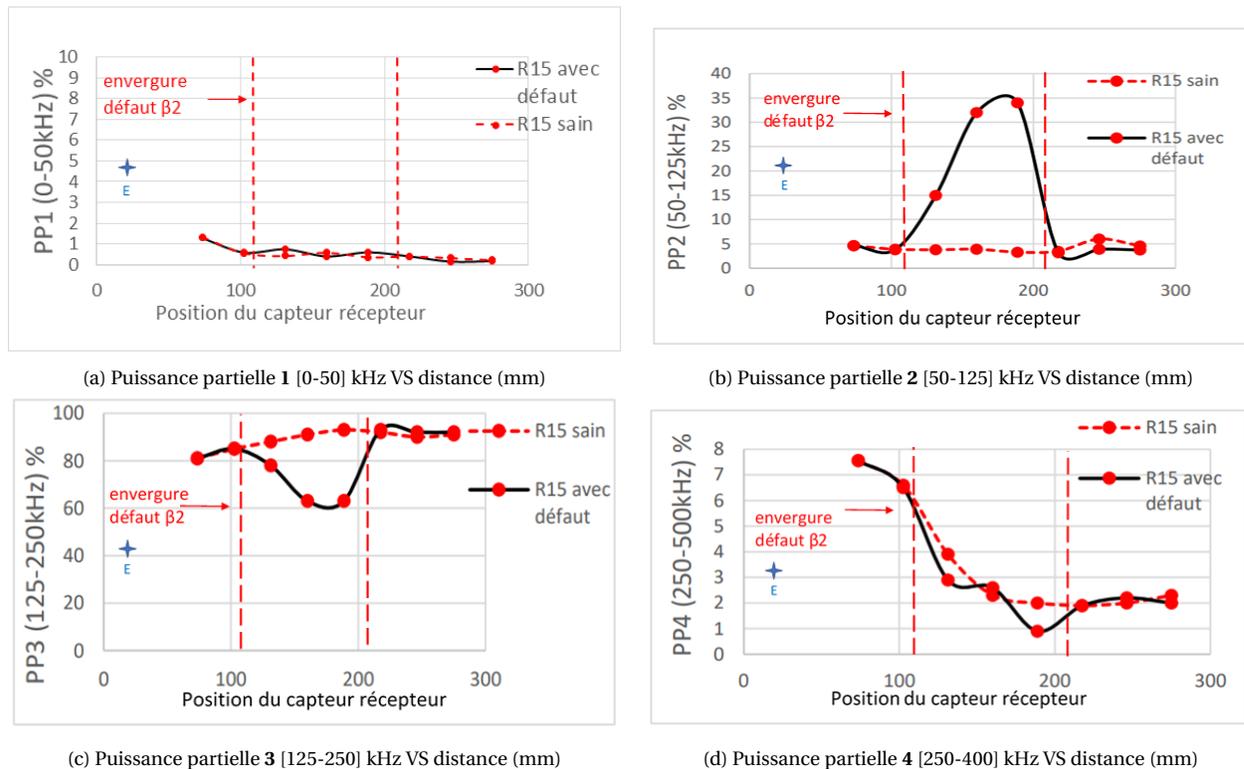


FIGURE 5.12 – Évolution des PPI en fonction de la position du capteur pour un assemblage sain et avec défaut

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les résultats de la simulation numérique par éléments finis du contrôle par acousto-ultrasons d'un assemblage du type acier-composite "mono-plaque", AC-1P. Tout d'abord, plusieurs approches pour modéliser le capteur récepteur ont été adoptées et comparées dans ce chapitre. Cette comparaison nous a révélé que la prise en compte de la sensibilité en réception du capteur R15 a pour effet de gommer les plus basses fréquences pour la courbe de calibration considérée.

Puis, nous avons réalisé une comparaison qualitative des signaux simulés et expérimentaux pour les assemblages AC-1P sain et un défaut de type tiers vide.

Cette comparaison a montré les mêmes résultats en simulation et en expérimental quant à la difficulté à détecter le défaut par une analyse paramétrique simple pour la position du capteur n°1. Nous constatons toutefois pour cette position de capteur des disparités entre simulation et expérimental sur les formes d'onde et les spectres fréquentiels pour les assemblages sain et avec défaut.

Pour la position du capteur n°2 placé au droit du défaut, nous retrouvons toujours cette disparité pour l'assemblage sain. Cependant, en simulation comme en expérimental, l'effet de la

présence du défaut est important sur le signal dans les trois domaines (temporel, fréquentiel et temps-fréquence) pour cette position de capteur.

Avec les deux méthodes (simulation et expérimental), nous notons une différence majeure dans le domaine fréquentiel lorsqu'on compare les signaux reçus d'assemblages sain et avec défaut. Néanmoins, les effets de la présence de ce défaut sur le domaine fréquentiel sont inversés suivant que l'on soit en simulation ou en expérimental. Nous observons une inhibition des plus basses fréquences tournant autour de 80 kHz en expérimental, alors qu'elles sont amplifiées en simulation. Ces disparités pourraient résulter de la modélisation incomplète de la source du signal et du couplant.

Ces résultats montrent cependant que les paramètres extraits du domaine fréquentiel sont pertinents pour détecter ce type de défaut ce qui corrobore les résultats de l'analyse paramétrique sur cet assemblage détaillés au chapitre 3.

Nous avons également constaté une interaction du signal avec les défauts qui l'affectent fortement. Pour les positions de capteur n°1 et n°2, l'étude révèle des conclusions différentes sur la détection de ce type de défaut. Nous avons ainsi observé que pour les positions des capteurs situées au-dessus du défaut, les descripteurs tels que la durée, l'amplitude, la fréquence d'ouverture, le barycentre fréquentiel ou les puissances partielles semblent intéressants pour détecter le défaut. Dans cette partie, nous notons également, que l'ajout de la sensibilité du capteur R15 a pour effet de rendre les défauts plus difficilement détectable pour certains descripteurs tels que la durée du signal.

Cette simulation n'est pas exhaustive du fait que les autres aspects qui peuvent interagir avec le signal (capteur en émission, couplant, système d'acquisition) ne sont pas pris en compte. Cependant, cette étude nous montre le potentiel important de cette approche numérique qui peut être utilisée afin d'optimiser le choix du capteur récepteur ou permettre une meilleure compréhension de la propagation des ondes élastiques dans les assemblages collés ainsi que leur interaction avec les défauts. Cette compréhension nous aiderait à choisir les descripteurs les plus pertinents pour détecter ces défauts. De plus, une fois améliorés, ces modèles pourrait servir d'outils pour enrichir la bibliothèque d'apprentissage pour l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle de manière à les rendre plus robustes et s'affranchir de la difficulté concernant la référence (partie saine) révélé au chapitre 4. Cette amélioration de la modélisation nécessitera une prise en compte du capteur émetteur dans le modèle. Pour y parvenir il faudra approcher de manière optimale le signal réellement émis par le capteur pour une consigne donnée.

Une autre perspective pourrait être l'optimisation du processus CND sur site, car la modélisation révèle que les perturbations liées à la présence du défaut sont plus accentuées pour les capteurs au droit de ce défaut. Ainsi, un dispositif mobile de diagnostic en temps réel pourrait être envisagé sur site. Il se baserait sur les valeurs des descripteurs les plus pertinents pour identifier les défauts. L'enjeu lié à la mise en place de ce dispositif serait le développement d'un système de couplage qui permettrait le déplacement de l'appareil de mesure.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail de thèse était de proposer une méthode reposant sur les acousto-ultrasons pour améliorer le contrôle in-situ des assemblages collés du génie civil et plus particulièrement des renforcements par composites collés.

Nous avons dans un premier chapitre introduit le collage structural, son utilisation dans le génie civil ainsi que l'état de l'art des différentes méthodes de contrôle non destructif utilisées actuellement pour ce diagnostic. Ces méthodes ont montré des limites en termes de profondeur d'inspection (TIR, RX), de rendement sur site (shearographie), de capacité de détection des défauts d'adhésion et de cohésion (TIR, radiographie méthodes optique), etc. Ceci a motivé l'évaluation des méthodes non destructives à base d'ondes ultrasonores et notamment les acousto-ultrasons (AUS) qui offrent de bonnes potentialités.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit plus précisément les concepts et les protocoles de notre méthodologie de diagnostic. Nous y avons ainsi présenté nos différents échantillons, le système d'acousto-ultrasons utilisé lors de nos mesures ainsi que les essais préliminaires qui nous ont permis de mettre au point notre protocole d'essai. Les mesures sur ces assemblages étaient réalisées pour deux positions de capteur récepteur : la position du capteur n°1 placée à 230 mm de l'émetteur et la position du capteur n°2 placée à 115 mm de l'émetteur au droit du défaut.

Le chapitre trois a rassemblé les résultats obtenus lors de la mise en place de la méthodologie pour des assemblages "modèles" (AC-1P et BC-Da). Pour la détection des défauts, nous avons proposé une analyse paramétrique basée sur la comparaison des valeurs moyennes observées par paramètres sur les signaux reçus dans les différents échantillons avec celles de l'échantillon de référence. Nous avons réalisé cette comparaison pour 10 paramètres fournis directement par le logiciel d'acquisition des signaux (AEWIN). Nous avons constaté lors de cette analyse que les descripteurs énergétiques (l'énergie absolue et la force du signal) sont souvent suffisants pour détecter la quasi-totalité des défauts pour les deux types de substrat. Seule la détection du défaut de type- β_2 ("tiers vide") pour le substrat acier a nécessité l'utilisation du paramètre fréquence au pic comme indicateur. Ce résultat souligne la difficulté de trouver un descripteur unique pour détecter les défauts dans toutes les configurations étudiées. Globalement, tous les défauts sur les deux substrats semblent détectables par le capteur n°1 situé à 230 mm de l'émetteur. Leur détection est facilitée dans le cas du capteur n°2, situé au droit du défaut (hormis pour le défaut d'adhésion de type- δ sur le substrat béton).

Pour l'identification des défauts, une première méthodologie basée sur une analyse en composantes principales (ACP) par position de capteur a été adoptée. Pour le substrat béton, nous avons remarqué que les clusters des signaux reçus des différents assemblages sont distincts entre eux, ce qui ne fut pas forcément le cas pour le substrat acier. En d'autres termes, nous arrivons à identifier aisément l'ensemble des défauts étudiés dans les assemblages BC-Da et dans une moindre mesure dans les assemblages AC-1P. La seconde méthode utilisée pour l'identification des défauts est basée sur une classification supervisée par forêt d'arbres décisionnels. L'apprentissage est réalisé avec les données collectées par les deux capteurs. Pour les deux types de substrat, nous avons obtenu des taux de reconnaissance assez élevés (de 82% à 100% pour

AC-1P et de 78% à 100% pour BC-Da) avec le vote majoritaire permettant une prise de décision fiable sur la labélisation des signaux. Il semble donc que pour ces assemblages modèles la méthodologie de diagnostic proposée fonctionne parfaitement et permet une bonne détection ainsi qu'une bonne identification de tous les défauts étudiés.

Dans le quatrième chapitre, cette méthodologie de détection et d'identification a été évaluée (robustesse et limites) en l'appliquant à des échantillons d'échelle plus importante, combinant plusieurs linéaires de composite proches (AC-3P) ou la présence de plusieurs défauts dans un même linéaire de composite (BC-Po).

L'analyse mono-paramétrique a révélé pour les assemblages AC-3P et BC-Po que l'efficacité de la méthode quant à la détection des défauts semble peu affectée. On notera toutefois que la capacité de détection est fortement affectée par le choix de la zone de référence qui doit être située sur la même éprouvette : la même plaque d'acier pour les éprouvettes AC-3P ou la même poutre pour les éprouvettes BC-Po. En effet, les valeurs des descripteurs extraits du domaine temporel n'ont pas le même ordre de grandeur suivant la zone de référence considérée. Le domaine fréquentiel semble lui moins affecté par le changement de référentiel. Cette absence de référentiel commun pour ces éprouvettes a également été observée lors de l'application de l'ACP. Nous n'avons en effet pu obtenir de bonnes séparations des clusters que lorsque l'ACP était conduite par plaque d'acier ou par poutre.

La classification par forêt d'arbres décisionnels nous a permis de diminuer la dépendance de notre méthode au choix de la zone de référence. Dans ce cas de figure, nous avons, lors de l'apprentissage de la bibliothèque, combiné les données collectées sur des zones similaires (de référence ou contenant le même type de défaut). Les résultats de cette classification ont cependant montré des taux de reconnaissance plus faibles (mais exploitables) que ceux obtenus pour les assemblages modèles (de 69% à 100% pour AC-3P et de 49% à 95% pour BC-Po). En particulier, il a été nécessaire d'adopter un seuil (60 %) pour le vote sécuritaire pour fiabiliser la méthodologie (défaut de type- δ de la poutre n°3).

L'application sur les assemblages étudiés dans ce chapitre (AC-3P et BC-Po) plus proches des assemblages qui seront rencontrés in situ a révélé que le choix de la référence reste un enjeu majeur pour l'application de cette méthodologie. Ceci conditionne clairement son extension, et soulève des enjeux dans le cas de la classification supervisée sur la méthodologie de construction de la bibliothèque. Afin d'enrichir celle-ci et de limiter les investigations expérimentales préliminaires nécessaires, l'utilisation d'outils de modélisation pourrait probablement être pertinente.

Une première approche pour tenter de répondre à cette problématique a été abordée au cours du cinquième chapitre dédié à la modélisation par éléments finis des acousto-ultrasons sur les assemblages AC-1P sain et contenant les deux tailles de vide étudiées. Trois types d'approches de modélisation du capteur récepteur ont été comparées sur l'échantillon sain, révélant que la prise en compte de la sensibilité en réception du capteur R15 avait pour effet d'amplifier le signal uniquement sur les paquets d'ondes portant les fréquences proches de la résonance du capteur (150 kHz).

Nous avons réalisé une comparaison qualitative des résultats de la modélisation à ceux de la campagne de mesures sur les assemblages sain et avec défaut (un tiers de vide) pour les positions de capteur n°1 et n°2. Nous avons noté lors de cette comparaison des disparités entre les deux résultats (simulation et expérimental). Les différences observées entre les résultats de la modélisation et de l'expérimental peuvent être dues à la combinaison de plusieurs facteurs tels que l'absence d'une modélisation complète de la source d'émission, de la chaîne d'acquisition et du couplant. L'étude a toutefois montré que les paramètres les plus pertinents pour détecter ce type de défaut sont ceux du domaine fréquentiel corroborant donc les résultats de l'analyse paramétrique du chapitre 3.

Nous avons également observé dans ce chapitre qu'en fonction de la taille du défaut, les paramètres ne sont pas affectés de la même manière et que le signal est davantage perturbé pour les capteurs au droit des défauts. On notera toutefois que ces résultats sont préliminaires et que des travaux additionnels concernant le développement de ces outils sont nécessaires.

Les résultats de cette étude ouvrent des perspectives intéressantes. On pourrait ainsi envisager de réaliser le processus de contrôle non destructif par acousto-ultrasons sur site via un appareil de mesure mobile capable d'émettre un diagnostic en temps réel. Les enjeux majeurs de cette application sont doubles. D'abord, il convient de définir les paramètres les plus pertinents pour détecter chaque type de défaut, ce qui pourrait être réalisé à partir des investigations réalisées et avec les modèles numériques améliorés et validés. Il est également nécessaire de développer un système de couplage permettant le déplacement de l'appareil tout en assurant une bonne répétabilité des mesures. Via l'utilisation des modèles numériques, nous pourrions également envisager l'optimisation du choix des capteurs récepteurs.

Ceci nécessitera peut-être d'améliorer la prise en compte de la sensibilité du capteur émetteur dans la modélisation. Pour ce faire, on peut envisager des mesures de déplacements verticaux proches de l'émetteur à l'aide de technologie comme le laser qui permettraient de mieux décrire la sollicitation initiale transmise à l'assemblage.

Le potentiel qu'offrent ces outils de modélisation nous permettrait *in-fine* d'obtenir une meilleure compréhension des caractéristiques acoustiques des défauts et de s'affranchir de la coloration du milieu de propagation sur le signal (résolution de la problématique du choix de la référence). Ils pourraient alors servir à l'enrichissement des bibliothèques d'apprentissage des techniques de l'intelligence artificielle pour une classification plus robuste des défauts.

La validation de ces modèles nécessitera la création d'une base de données solide qui passera par l'extension de la campagne expérimentale à :

- des assemblages de natures (bois, renfort en tissus, adhésifs, etc.) et de géométries (tailles, surfaces non planes, etc.) différentes,
- une plus large gamme de capteurs (micro80, pico, laser, etc.) et de couplants (miel, Sofranel),
- des mesures avec différentes positions de capteur (en amont et en aval du défaut, aligne-

ment, etc.) et de consignes d'émission (modulation en fréquence),

- des conceptions et tailles de défauts différentes (zone non sablée, contaminant poussière, mauvaise proportion de mélange des composants de la colle, etc.).

Enfin, nous pouvons envisager de coupler le CND par acousto-ultrasons avec des essais destructifs afin d'étudier la sévérité des défauts et d'évaluer les possibilités d'estimation d'une durée de vie résiduelle à partir des données de l'AUS.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SIKA CÔTE D'IVOIRE SARL. (2018). « Renforcement d'ouvrages par matériaux composites », adresse : <https://civ.sika.com/fr/group/publications/magazine-ambitions/ambitions-n-18/renforcement-de-pont.html> (visité le 29/04/2018).
- [2] S. CHATAIGNER, K. BENZARTI, G. FORÊT, J.-F. CARON, G. GEMIGNANI, M. BRUGIOLO, I. CALDERON, I. PINERO, V. BIR et F. LEHMAN, « Design and evaluation of an externally bonded CFRP reinforcement for the fatigue reinforcement of old steel structures, Engineering Structures », *Engineering Structures*, t. 177, pp.556-565, jan. 2018, Publisher: Elsevier.
- [3] E. LEPRETRE, S. CHATAIGNER, L. DIENG et L. GAILLET, « Fatigue strengthening of cracked steel plates with CFRP laminates in the case of old steel material », *Construction and Building Materials*, t. 174, p. 421-432, 2018, Publisher: Elsevier.
- [4] W. XU et Y. WEI, « Strength analysis of metallic bonded joints containing defects », *Computational Materials Science*, t. 53, n° 1, p. 444-450, 1^{er} fév. 2012, ISSN : 0927-0256.
- [5] E. SIRYABE, « Evaluation non destructive par ultrasons de l'adhésion aux interfaces de joints collés », thèse de doct., Université de Bordeaux, 2016.
- [6] N. MONTINARO, D. CERNIGLIA et G. PITARRESI, « Detection and characterisation of disbonds on fibre metal laminate hybrid composites by flying laser spot thermography », *Composites Part B: Engineering*, t. 108, p. 164-173, 1^{er} jan. 2017, ISSN : 1359-8368.
- [7] S. TANARY, « Characterization of adhesively bonded joints using acousto-ultrasonics: Department of mechanical engineering, ottawa university, ontario (canada), n89-12925, 229 pp. (apr. 1988) », *NDT & E International*, t. 25, n° 2, p. 103, 1^{er} jan. 1992, ISSN : 0963-8695.
- [8] O.-Y. KWON et S.-H. LEE, « Acousto-ultrasonic evaluation of adhesively bonded CFRP-aluminum joints », *NDT & E International*, t. 32, n° 3, p. 153-160, 1^{er} avr. 1999, ISSN : 0963-8695.
- [9] P. COUV RAT, *Le collage structural moderne (Théorie et pratique)*. Paris : TEC & DOC LAVOISIER, 1992.
- [10] R. D. ADAMS, *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Elsevier, 2005.
- [11] AFGC, « Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites: Documents scientifiques et techniques », 17 mar. 2021.

- [12] C. C. H. GUYOTT, P. CAWLEY et R. D. ADAMS, « The Non-destructive Testing of Adhesively Bonded Structure: A Review », *The Journal of Adhesion*, t. 20, n° 2, p. 129-159, 1^{er} sept. 1986, Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/00218468608074943>, ISSN : 0021-8464.
- [13] M. COULAUD, « Rôle des interfaces et interphases dans les assemblages collés », thèse de doct., INSA Lyon, 2007.
- [14] E. SIRYABE, M. RENIER, A. MEZIANE et M. CASTAINGS, « The transmission of lamb waves across adhesively bonded lap joints to evaluate interfacial adhesive properties », *Physics Procedia*, Proceedings of the 2015 ICU International Congress on Ultrasonics, Metz, France, t. 70, p. 541-544, 1^{er} jan. 2015, ISSN : 1875-3892.
- [15] M. C. van der LEEDEN et G. FRENS, « Surface properties of plastic materials in relation to their adhering performance », *Advanced engineering materials*, t. 4, n° 5, p. 280-289, 2002, Publisher: Wiley Online Library.
- [16] J. W. MCBAIN et D. G. HOPKINS, « On adhesives and adhesive action », *The Journal of Physical Chemistry*, t. 29, n° 2, p. 188-204, 1^{er} fév. 1925, ISSN : 0092-7325, 1541-5740.
- [17] S. VOYUTSKI, « Autohesion and adhesion of high polymers », in *Wiley Interscience, New York*, 1963.
- [18] B. V. DERJAGUIN et V. P. SMILGA, « Electronic theory of adhesion », *Journal of applied Physics*, t. 38, n° 12, p. 4609-4616, 1967, Publisher: American Institute of Physics.
- [19] L. H. SHARPE et H. SCHONHORN, « Surface energetics, adhesion, and adhesive joints », in, ACS Publications, 1964.
- [20] H. E. SCHINDEL-BIDINELLI, *Pratique du collage industriel*. Tec & Doc, 1992.
- [21] S. CHATAIGNER, « Collage structural et matériaux composites pour les structures de génie civil: contributions théoriques et applications », Habilitation à diriger des recherches, Université de Paris-Est, sept. 2016.
- [22] P. HAMELIN, *Le Collage structural*. Magnytude/ISAT Nevers, 2006.
- [23] P. COGNARD, « Mécanismes Classification des colles », *Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie mécanique, BM*, t. 7615, p. 1-20, 2002.
- [24] P. COGNARD, « Collage des matériaux: Mécanismes. Classification des colles », *Techniques de l'ingénieur. Matériaux fonctionnels*, t. 1, BM7615 2002.
- [25] V. K. SRIVASTAVA et R. PRAKASH, « Acousto-ultrasonic evaluation of the strength of composite material adhesive joints », in *Acousto-Ultrasonics: Theory and Application*, J. C. DUKE, éd., Boston, MA : Springer US, 1988, p. 345-350, ISBN : 978-1-4757-1965-9.
- [26] V. K. SRIVASTAVA, « Acousto-ultrasonic evaluation of interface bond strength of coated glass fibre-reinforced epoxy resin composites », *Composite structures*, t. 30, n° 3, p. 281-285, 1995, Publisher: Elsevier.
- [27] F. I. du BÉTON, « Bulletin 14—Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures », TaskGroup 9.3 Technical Report, 2001.
- [28] R. D. ADAMS et P. CAWLEY, « A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints », *NDT International*, t. 21, n° 4, p. 208-222, 1^{er} août 1988, ISSN : 0308-9126.

- [29] S. YANG, L. GU et R. F. GIBSON, « Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures », *Composite Structures*, t. 51, n° 1, p. 63-71, 1^{er} jan. 2001, ISSN : 0263-8223.
- [30] R. D. ADAMS et B. W. DRINKWATER, « Non-destructive testing of adhesively-bonded joints », *International Journal of Materials and Product Technology*, t. 14, n° 5, p. 385-398, 1999, Publisher: Inderscience Publishers.
- [31] T. KUNDU, A. MAJI, T. GHOSH et K. MASLOV, « Detection of kissing bonds by Lamb waves », *Ultrasonics*, t. 35, n° 8, p. 573-580, 1998, Publisher: Elsevier.
- [32] RLPC, *Guide de Contrôle extérieur des travaux de réparation ou de renforcement de structures en béton par collage de matériaux composites*. 2009.
- [33] ACI COMMITTEE 440, *440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, mai 2017, ISBN : 978-1-945487-59-0.
- [34] C. COMMITTEE, *CSA S806 - Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*, Canadian Standards Association. jan. 2012, 206 p.
- [35] J. J. BIKERMAN, « The Science of Adhesive Joints, New York (1961) », *Vysokomolek. Soedin. A*, t. 10, p. 974, 1968.
- [36] I. MITURSKA, A. RUDAWSKA, M. MÜLLER et M. HROMASOVÁ, « The Influence of Mixing Methods of Epoxy Composition Ingredients on Selected Mechanical Properties of Modified Epoxy Construction Materials », *Materials*, t. 14, n° 2, p. 411, 2021, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [37] H. CHEN, O. JACOBS, W. WU, G. RÜDIGER et B. SCHÄDEL, « Effect of dispersion method on tribological properties of carbon nanotube reinforced epoxy resin composites », *Polymer Testing*, t. 26, n° 3, p. 351-360, 2007, Publisher: Elsevier.
- [38] D. JIAO et J. L. ROSE, « An ultrasonic interface layer model for bond evaluation », *Journal of Adhesion Science and Technology*, t. 5, n° 8, p. 631-646, 1991, Publisher: Taylor & Francis.
- [39] C. J. BROTHERHOOD, B. W. DRINKWATER et F. J. GUILD, « The effect of compressive loading on the ultrasonic detectability of kissing bonds in adhesive joints », *Journal of Nondestructive evaluation*, t. 21, n° 3, p. 95-104, 2002, Publisher: Springer.
- [40] E. MAEVA, I. SEVERINA, S. BONDARENKO, G. CHAPMAN, B. O'NEILL, F. SEVERIN et R. G. MAEV, « Acoustical methods for the investigation of adhesively bonded structures: A review », *Canadian Journal of Physics*, t. 82, n° 12, p. 981-1025, 1^{er} déc. 2004, ISSN : 0008-4204, 1208-6045.
- [41] R. C. TIGHE, J. M. DULIEU-BARTON et S. QUINN, « Identification of kissing defects in adhesive bonds using infrared thermography », *International Journal of Adhesion and Adhesives*, t. 64, p. 168-178, 1^{er} jan. 2016, ISSN : 0143-7496.
- [42] J. LI, Y. LU et Y. F. LEE, « Debonding detection in CFRP-reinforced steel structures using anti-symmetrical guided waves », *Composite Structures*, t. 253, p. 112-113, 2020, Publisher: Elsevier.

- [43] S. K. DWIVEDI, M. VISHWAKARMA et P. A. SONI, « Advances and researches on non destructive testing: A review », *Materials Today: Proceedings*, 7th International Conference of Materials Processing and Characterization, March 17-19, 2017, t. 5, n° 2, p. 3690-3698, 1^{er} jan. 2018, ISSN : 2214-7853.
- [44] H. BERGLIND et A. DILLENZ, « Detecting glue deficiency in laminated wood—a thermography method comparison », *NDT & E International*, t. 36, n° 6, p. 395-399, 2003, Publisher: Elsevier.
- [45] W. BEN LARBI, « Comparaison expérimentale de la thermographie modulée et de la thermographie pulsée pour l'évaluation non destructive des matériaux employés en aérospatial », Université Laval, Mémoire de maîtrise, 2010.
- [46] P. H. SHIN, S. C. WEBB et K. J. PETERS, « Pulsed phase thermography imaging of fatigue-loaded composite adhesively bonded joints », *Ndt & E International*, t. 79, p. 7-16, 2016, Publisher: Elsevier.
- [47] F. MABROUKI, M. THOMAS, M. GENEST et A. FAHR, « Frictional heating model for efficient use of vibrothermography », *NDT & E International*, t. 42, n° 5, p. 345-352, 2009, Publisher: Elsevier.
- [48] S. JOHNSON, « Thermoelastic stress analysis for detecting and characterizing static damage initiation in composite lap shear joints », *Composites Part B: Engineering*, t. 56, p. 740-748, 2014, Publisher: Elsevier.
- [49] M. GENEST, M. MARTINEZ, N. MRAD, G. RENAUD et A. FAHR, « Pulsed thermography for non-destructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs », *Composite Structures*, t. 88, n° 1, p. 112-120, 2009, Publisher: Elsevier.
- [50] F. TAILLADE, M. QUIERTANT, K. BENZARTI, J. DUMOULIN et C. AUBAGNAC, « Nondestructive Evaluation of FRP Strengthening Systems Bonded on RC Structures Using Pulsed Stimulated Infrared Thermography », in *Infrared Thermography, Chapter 9*, InTech, jan. 2012, pp. 193-208.
- [51] Y. Y. HUNG, « Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing », *Optical engineering*, t. 21, n° 3, p. 213-219, 1982, Publisher: International Society for Optics and Photonics.
- [52] I. G. SCOTT et C. M. SCALA, « A review of non-destructive testing of composite materials », *NDT International*, t. 15, n° 2, p. 75-86, 1^{er} avr. 1982, ISSN : 0308-9126.
- [53] D. R. WELLS, « NDT of sandwich structures by holographic interferometry », *MATER EVALUATION*, t. 27, n° 11, p. 225-231, 1969.
- [54] F. W. Y. CHAN et T. W. YEUNG, « Non-destructive evaluation of adhesive bonding using reflective fringe pattern technique », *Journal of Nondestructive Evaluation*, t. 27, n° 4, p. 105-114, déc. 2008, ISSN : 0195-9298, 1573-4862.
- [55] M. Y. Y. HUNG, « Shearography and applications in nondestructive evaluation of structures », in *FRP Composites in Civil Engineering. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong Institution of Steel Construction*, Issue: Volume 2, 2001.

- [56] B. P. HOLOWNIA, « Non-destructive testing of overlap shear joints using electronic speckle pattern interferometry », *Optics and Lasers in Engineering*, t. 6, n° 2, p. 79-90, 1^{er} jan. 1985, ISSN : 0143-8166.
- [57] F. TAILLADE, M. QUIERTANT, K. BENZARTI et C. AUBAGNAC, « Non-destructive evaluation (NDE) of composites: Using shearography to detect bond defects », in *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, Elsevier, 2013, 542-557e.
- [58] S. GHOLIZADEH, « A review of non-destructive testing methods of composite materials », *Procedia Structural Integrity*, t. 1, p. 50-57, 2016, Publisher: Elsevier.
- [59] B. HARRIS, « Accumulation of damage and non-destructive testing of composite materials and structures », 1980.
- [60] R. PRAKASH, « Non-destructive testing of composites », *Composites*, t. 11, n° 4, p. 217-224, 1980, Publisher: Elsevier.
- [61] M. J. SALKIND, « Early detection of fatigue damage in composite materials », *Journal of Aircraft*, t. 13, n° 10, p. 764-769, 1976.
- [62] J. J. NEVADUNSKY, J. J. LUCAS et M. J. SALKIND, « Early fatigue damage detection in composite materials », *Journal of composite materials*, t. 9, n° 4, p. 394-408, 1975, Publisher: Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA.
- [63] S. ZHENG, J. VANDERSTELT, J. R. MCDERMID et J. R. KISH, « Non-destructive investigation of aluminum alloy hemmed joints using neutron radiography and X-ray computed tomography », *NDT & E International*, t. 91, p. 32-35, 2017, Publisher: Elsevier.
- [64] D. VAVRIK, I. JEON, E. LEHMANN, A. KAESTNER et J. VACIK, « Inspection of the metal composite materials using a combination of X-ray radiography and Neutron Imaging », *Journal of Instrumentation*, t. 6, n° 3, p. C03001, 2011, Publisher: IOP Publishing.
- [65] A. GARBACZ et E. J. GARBOCZI, *Ultrasonic evaluation methods applicable to polymer concrete composites*. US Department of Commerce, National Institute of Standards et Technology, 2003.
- [66] S. VÁZQUEZ, J. GOSÁLBEZ, I. BOSCH, A. CARRIÓN, C. GALLARDO et J. PAYÁ, « Comparative study of coupling techniques in Lamb wave testing of metallic and cementitious plates », *Sensors*, t. 19, n° 19, p. 4068, 2019, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [67] M.-J. PINONDEL, *Manuel pratique de contrôleur par ultrasons*. Paris : Ed. Eyrolles, 1968, OCLC: 635993009.
- [68] P. CAWLEY, « The impedance method of non-destructive inspection », *NDT international*, t. 17, n° 2, p. 59-65, 1984, Publisher: Elsevier.
- [69] E. B. NDIAYE, P. MARÉCHAL et H. DUFLO, « Adhesion characterization and defect sizing of sandwich honeycomb composites », *Ultrasonics*, t. 62, p. 103-111, 2015, Publisher: Elsevier.
- [70] R. E. CHALLIS, R. J. FREEMANTLE, G. P. WILKINSON et J. D. H. WHITE, « Compression wave NDE of adhered metal lap joints: uncertainties and echo feature extraction », *Ultrasonics*, t. 34, n° 2, p. 315-319, 1996, Publisher: Elsevier.

- [71] L. GOGLIO et M. ROSSETTO, « Ultrasonic testing of adhesive bonds of thin metal sheets », *NDT & E International*, t. 32, n° 6, p. 323-331, 1999, Publisher: Elsevier.
- [72] A. BAUDOT, J. MOYSAN, C. PAYAN, N. YLLA, J. GALY, B. VERNERET et A. BAILLARD, « Improving adhesion strength analysis by the combination of ultrasonic and mechanical tests on single-lap joints », *The Journal of Adhesion*, t. 90, n° 5, p. 555-568, 2014, Publisher: Taylor & Francis.
- [73] M. CASTAINGS, « SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion », *Ultrasonics*, t. 54, n° 7, p. 1760-1775, 1^{er} sept. 2014, ISSN : 0041-624X.
- [74] M. J. S. LOWE et P. CAWLEY, « The applicability of plate wave techniques for the inspection of adhesive and diffusion bonded joints », *Journal of Nondestructive Evaluation*, t. 13, n° 4, p. 185-200, 1994, Publisher: Springer.
- [75] M. KORZENIOWSKI, T. PIWOWARCZYK et R. G. MAEV, « Application of ultrasonic method for quality evaluation of adhesive layers », *Archives of civil and mechanical engineering*, t. 14, n° 4, p. 661-670, 2014, Publisher: Elsevier.
- [76] M. J. SANTOS, J. PERDIGAO et P. FAIA, « Ultrasonic guided waves scattering effects from defects in adhesively bonded lap joints using pitch and catch and pulse-echo techniques », *The Journal of adhesion*, t. 84, n° 5, p. 421-438, 2008, Publisher: Taylor & Francis.
- [77] S. DE BARROS, A. L. GAMA, M. ROUSSEAU et B. COLLET, « Characterization of bonded plates with Lamb and SH waves using a quasi-static approximation », *Latin American Journal of Solids and Structures*, t. 1, n° 4, p. 379-399, 2004.
- [78] O. BAGGENS et N. RYDEN, « Poisson's ratio from polarization of acoustic zero-group velocity Lamb mode », *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 138, n° 1, EL88-EL92, 2015, Publisher: Acoustical Society of America.
- [79] A. BLOUIN, C. NRON, B. CAMPAGNE et J. P. MONCHALIN, « Applications of laser tapping and laser ultrasonics to aerospace composite structures », *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, t. 52, n° 3, p. 130-133, 2010, Publisher: The British Institute of Non-Destructive Testing.
- [80] Q. I. U. JINHAO, T. A. O. CHONGCONG, J. I. HONGLI, Z. CHAO et Z. JINLING, « Damage Detection and Material Property Reconstruction of Composite Laminates Using Laser Ultrasonic Technique », *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, t. 36, n° 1, p. 3-19, 2019.
- [81] N. GODIN, S. HUGUET, R. GAERTNER et L. SALMON, « Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers », *NDT & E International*, t. 37, n° 4, p. 253-264, 1^{er} juin 2004, ISSN : 0963-8695.
- [82] S. HUGUET, N. GODIN, R. GAERTNER, L. SALMON et y. D. VILLARD, « Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester », *Composites Science and technology*, t. 62, n° 10, p. 1433-1444, 2002, Publisher: Elsevier.
- [83] X. YU, M. BENTAHAR, C. MECHRI et S. MONTRÉSOR, « Passive monitoring of nonlinear relaxation of cracked polymer concrete samples using acoustic emission », *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 146, n° 4, EL323-EL328, 2019, Publisher: Acoustical Society of America.

- [84] V. MUNOZ, B. VALÈS, M. PERRIN, M.-L. PASTOR, H. WELEMANE, A. CANTAREL et M. KARAMA, « Damage detection in CFRP by coupling acoustic emission and infrared thermography », *Composites Part B: Engineering*, t. 85, p. 68-75, 2016, Publisher: Elsevier.
- [85] S. PENG, Z. M. SBARTAÏ et T. PARENT, « Mechanical damage evaluation of masonry under tensile loading by acoustic emission technique », *Construction and Building Materials*, t. 258, p. 120-336, 2020, Publisher: Elsevier.
- [86] J. MERIAUX, M. BOINET, S. FOUVRY et J. C. LENAIN, « Identification of fretting fatigue crack propagation mechanisms using acoustic emission », *Tribology International*, t. 43, n° 11, p. 2166-2174, 2010, Publisher: Elsevier.
- [87] S. RAMADAN, L. GAILLET, C. TESSIER et H. IDRISSE, « Detection of stress corrosion cracking of high-strength steel used in prestressed concrete structures by acoustic emission technique », *Applied surface science*, t. 254, n° 8, p. 2255-2261, 2008, Publisher: Elsevier.
- [88] N. MORIZET, N. GODIN, J. TANG, E. MAILLET, M. FREGONESE et B. NORMAND, « Classification of acoustic emission signals using wavelets and random forests : Application to localized corrosion », *Mechanical Systems and Signal Processing*, t. 70-71, p. 1026-1037, 1^{er} mar. 2016, ISSN : 0888-3270.
- [89] C. P. LIN et M. W. KELLY, « Cavitation and acoustic emission around laser-heated micro-particles », *Applied Physics Letters*, t. 72, n° 22, p. 2800-2802, 1998, Publisher: American Institute of Physics.
- [90] M. PICARD, E. MAILLET, P. REYNAUD, N. GODIN, M. R'MILI, G. FANTOZZI et J. LAMON, « Damage sensitivity and acoustic emission of SiC/SiC composite during tensile test and static fatigue at intermediate temperature after impact damage », *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites VII*, p. 1-13, 2012, Publisher: John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA.
- [91] C.-C. KUO, « Artificial recognition system for defective types of transformers by acoustic emission », *Expert Systems with Applications*, t. 36, n° 7, p. 10304-10311, 2009, Publisher: Elsevier.
- [92] N. N. HSU et B. FR, « Characterization and calibration of acoustic emission sensors », 1981.
- [93] C. SANTULLI et A. C. LUCIA, « Relation between acoustic emission analysis during cure cycle and bonded joints performances », *Ndt & E International*, t. 32, n° 6, p. 333-341, 1999, Publisher: Elsevier.
- [94] A. G. MAGALHAES et M. DE MOURA, « Application of acoustic emission to study creep behaviour of composite bonded lap shear joints », *NDT & E International*, t. 38, n° 1, p. 45-52, 2005, Publisher: Elsevier.
- [95] A. VARY, « The acousto-ultrasonic approach », *Acousto-ultrasonics*, p. 1-21, 1988, Publisher: Springer.
- [96] J. H. WILLIAMS, J. HAINSWORTH et S. S. LEE, « Acoustic-ultrasonic nondestructive evaluation of double-braided nylon ropes using the stress wave factor », *Fibre Science and Technology*, t. 21, n° 3, p. 169-180, 1^{er} jan. 1984, ISSN : 0015-0568.

- [97] K. OHNO et M. OHTSU, « Crack classification in concrete based on acoustic emission », *Construction and Building Materials*, Special Issue on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete (KIFA-5), t. 24, n° 12, p. 2339-2346, 1^{er} déc. 2010, ISSN : 0950-0618.
- [98] A. MUÑOZ-IBÁÑEZ, J. DELGADO-MARTÍN, M. HERBÓN-PENABAD et J. ALVARELLOS-IGLESIAS, « Acoustic emission monitoring of mode I fracture toughness tests on sandstone rocks », *Journal of Petroleum Science and Engineering*, t. 205, p. 108 906, 1^{er} oct. 2021, ISSN : 0920-4105.
- [99] K. DU, X. LI, S. WANG, M. TAO, G. LI et S. WANG, « Compression-shear failure properties and acoustic emission (AE) characteristics of rocks in variable angle shear and direct shear tests », *Measurement*, t. 183, p. 109 814, 1^{er} oct. 2021, ISSN : 0263-2241.
- [100] JCMS-III, « Monitoring method for active cracks in concrete by acoustic emission, Japan: Federation of Construction Materials Industries », 2003.
- [101] N. BOULAY, « Modélisation des capteurs d'émission acoustique en vue de la simulation d'un contrôle », thèse de doct., Université Paris-Saclay (ComUE), 2017.
- [102] Y. M. HADDAD et S. S. IYER, « An acousto-ultrasonics pattern recognition approach for the mechanical characterization of engineering materials », *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, t. 63, n° 1, p. 89-98, 1^{er} jan. 1995, ISSN : 0308-0161.
- [103] K. K. BRAHMA et C. R. L. MURTHY, « Bond quality evaluation of bimetallic strips: Acousto-ultrasonic approach », in *Acousto-Ultrasonics*, Springer, 1988, p. 337-344.
- [104] Y. WANG, H. X. HU, S. J. LIU, S. J. CHEN et Z. Z. XU, « The effect of water-cement ratio on acousto-ultrasonic characteristics in mortar », *Russian Journal of Nondestructive Testing*, t. 53, n° 2, p. 148-158, 1^{er} fév. 2017, ISSN : 1608-3385.
- [105] T. P. PHILIPPIDIS et D. G. AGGELIS, « An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete », *Cement and Concrete Research*, t. 33, n° 4, p. 525-538, 1^{er} avr. 2003, ISSN : 0008-8846.
- [106] A. VARY et R. F. LARK, « Correlation of fiber composite tensile strength with the ultrasonic stress wave factor », *Journal of testing and evaluation*, t. 7, n° 4, p. 185-191, 1979, Publisher: ASTM International.
- [107] A. VARY et K. J. BOWLES, « An ultrasonic-acoustic technique for nondestructive evaluation of fiber composite quality », *Polymer Engineering & Science*, t. 19, n° 5, p. 373-376, 1979, _-eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pen.760190509>, ISSN : 1548-2634.
- [108] Y. Z. PAPPAS, A. KONTSOS, T. H. LOUATAS et V. KOSTOPOULOS, « On the characterization of continuous fibres fracture by quantifying acoustic emission and acousto-ultrasonics waveforms », *NDT & E International*, t. 37, n° 5, p. 389-401, 1^{er} juil. 2004, ISSN : 0963-8695.
- [109] C. BARILE, C. CASAVOLA, G. PAPPALETTERA et P. K. VIMALATHITHAN, « Acousto-ultrasonic evaluation of interlaminar strength on CFRP laminates », *Composite Structures*, t. 208, p. 796-805, 15 jan. 2019, ISSN : 0263-8223.
- [110] N. GUO et P. CAWLEY, « Lamb wave propagation in composite laminates and its relationship with acousto-ultrasonics », *NDT & E International*, t. 26, n° 2, p. 75-84, 1^{er} avr. 1993, ISSN : 0963-8695.

- [111] S. I. ROKHLIN, « Lamb wave interaction with lap-shear adhesive joints: Theory and experiment », *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 89, n° 6, p. 2758-2765, 1991, Publisher: Acoustical Society of America.
- [112] T. LE GALL, « Simulation de l'émission acoustique: Aide à l'identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement », thèse de doct., Université de Lyon, 2016.
- [113] M. G. SAUSE et S. HORN, « Simulation of acoustic emission in planar carbon fiber reinforced plastic specimens », *Journal of Nondestructive Evaluation*, t. 29, n° 2, p. 123-142, 2010, Publisher: Springer.
- [114] G. HELLO, M. B. TAHAR et J.-M. ROELANDT, « Analytical determination of coefficients in crack-tip stress expansions for a finite crack in an infinite plane medium », *International Journal of Solids and Structures*, t. 49, n° 3, p. 556-566, 2012, Publisher: Elsevier.
- [115] M. OHTSU et K. ONO, « The generalized theory and source representations of acoustic emission », *Journal of acoustic emission*, t. 5, n° 4, p. 124-133, 1986.
- [116] D. SINGH, M. BENTAHAR, C. MECHRI et R. EL GUERJOUMA, « 3D Modelling of the Scattering of the Fundamental Anti-Symmetric Lamb Mode (A0) Propagating within a Point-Impacted Transverse-Isotropic Composite Plate », *Applied Sciences*, t. 11, n° 16, p. 7276, 2021, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [117] F. SCHUBERT et B. SCHECHINGER, « Numerical modeling of acoustic emission sources and wave propagation in concrete », *Journal of Nondestructive Testing(Germany)*, t. 7, n° 9, p. 1-8, 2002.
- [118] M. G. SAUSE et S. RICHLER, « Finite element modelling of cracks as acoustic emission sources », *Journal of nondestructive evaluation*, t. 34, n° 1, p. 4, 2015, Publisher: Springer.
- [119] S. H. DIAZ VALDÉS et C. SOUTIS, « Real-time nondestructive evaluation of fiber composite laminates using low-frequency Lamb waves », *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 111, n° 5, p. 2026-2033, 2002, Publisher: Acoustical Society of America.
- [120] W. B. KHALIFA, K. JEZZINE, S. GRONDEL, G. HELLO et A. LHÉMERY, « Modeling of the Far-field Acoustic Emission from a Crack under Stress », *Journal of Acoustic Emission*, t. 30, p. 137-152, 2012, Publisher: Acoustic Emission Group.
- [121] Z. HAMAM, N. GODIN, C. FUSCO et T. MONNIER, « Modelling of Acoustic Emission Signals Due to Fiber Break in a Model Composite Carbon/Epoxy: Experimental Validation and Parametric Study », *Applied Sciences*, t. 9, n° 23, p. 5124, 2019, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [122] T. LE GALL, T. MONNIER, C. FUSCO, N. GODIN et S.-E. HEBAZ, « Towards quantitative acoustic emission by finite element modelling: contribution of modal analysis and identification of pertinent descriptors », *Applied Sciences*, t. 8, n° 12, p. 2557, 2018, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [123] Z. HAMAM, N. GODIN, C. FUSCO et T. MONNIER, « Characterization of Fiber Break by Quantitative Acoustic Emission in a Model Carbon/Epoxy Composite », *Journal of Acoustic Emission*, t. 36, 2019.

- [124] J.-F. SEMBLAT, A.-M. DUVAL et P. DANGLA, « Numerical analysis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparisons with experiments », *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, t. 19, n° 5, p. 347-362, 2000, Publisher: Elsevier.
- [125] Z. HAMAM, « Simulation numérique et analyse de l'émission acoustique due à la rupture de fibre et à la décohésion à l'interface fibre/matrice dans un microcomposite », thèse de doct., Université de Lyon, 2020.
- [126] A. DE LUCA, D. PERFETTO, A. DE FENZA, G. PETRONE et F. CAPUTO, « Guided waves in a composite winglet structure: Numerical and experimental investigations », *Composite Structures*, t. 210, p. 96-108, 15 fév. 2019, ISSN : 0263-8223.
- [127] A. DE FENZA, G. PETRONE, R. PECORA et M. BARILE, « Post-impact damage detection on a winglet structure realized in composite material », *Composite Structures*, In Honor of Prof. Leissa, t. 169, p. 129-137, 1^{er} juin 2017, ISSN : 0263-8223.
- [128] M. A. HAMSTAD, « An examination of piezoelectric polymers as wideband acoustic emission displacement sensors », *Progress in AE VII, Jap. Soc. for NDI*, p. 79-86, 1994.
- [129] M. ÅBERG, « Wave propagation and damage in composite laminates », thèse de doct., Hållfasthetslära, 1999.
- [130] D. G. EITZEN et F. R. BRECKENRIDGE, « Acoustic emission sensors and their calibration », 2004.
- [131] K. ONO, « Rayleigh wave calibration of acoustic emission Sensors and ultrasonic transducers », *Sensors*, t. 19, n° 14, p. 3129, 2019, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [132] T. MONNIER, D. SEYDOU, N. GODIN et F. ZHANG, « Primary calibration of acoustic emission sensors by the method of reciprocity, theoretical and experimental considerations », *Journal of Acoustic Emission*, t. 30, p. 152-166, 2012.
- [133] G. C. MCLASKEY et S. D. GLASER, « Acoustic emission sensor calibration for absolute source measurements », *Journal of Nondestructive Evaluation*, t. 31, n° 2, p. 157-168, 2012, Publisher: Springer.
- [134] M. G. SAUSE et M. A. HAMSTAD, « Numerical modeling of existing acoustic emission sensor absolute calibration approaches », *Sensors and Actuators A: Physical*, t. 269, p. 294-307, 2018, Publisher: Elsevier.
- [135] N. BOULAY, A. LHÉMERY et F. ZHANG, « Simulation of the spatial frequency-dependent sensitivities of acoustic emission sensors », t. 1017, p. 012 008, mai 2018, Publisher: IOP Publishing, ISSN : 1742-6596.
- [136] J. LEE, F. WU, W. ZHAO, M. GHAFARI, L. LIAO et D. SIEGEL, « Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications », *Mechanical systems and signal processing*, t. 42, n° 1, p. 314-334, 2014, Publisher: Elsevier.
- [137] C. K. TAN, P. IRVING et D. MBA, « A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears », *Mechanical systems and signal processing*, t. 21, n° 1, p. 208-233, 2007, Publisher: Elsevier.

- [138] D. WANG, K.-L. TSUI et Q. MIAO, « Prognostics and health management: A review of vibration based bearing and gear health indicators », *Ieee Access*, t. 6, p. 665-676, 2017, Publisher: IEEE.
- [139] H. WANG, H. LIAO, X. MA et R. BAO, « Remaining Useful Life Prediction and Optimal Maintenance Time Determination for a Single Unit Using Isotonic Regression and Gamma Process Model », *Reliability Engineering & System Safety*, t. 210, p. 107-124, 2021, Publisher: Elsevier.
- [140] J. W. TUKEY, *Exploratory data analysis*. Reading, Mass., 1977, t. 2.
- [141] N. C. SCHWERTMAN, M. A. OWENS et R. ADNAN, « A simple more general boxplot method for identifying outliers », *Computational Statistics & Data Analysis*, t. 47, n° 1, p. 165-174, 1^{er} août 2004, ISSN : 0167-9473.
- [142] J. C. DUNN, « Well-separated clusters and optimal fuzzy partitions », *Journal of cybernetics*, t. 4, n° 1, p. 95-104, 1974, Publisher: Taylor & Francis.
- [143] D. L. DAVIES et D. W. BOULDIN, « A cluster separation measure », *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, n° 2, p. 224-227, 1979, Publisher: IEEE.
- [144] A. SIBIL, « Comportement thermomécanique et endommagement de nouveaux réfractaires verriers à très haute teneur en zircone: investigation des mécanismes de fissuration par EBSD et émission acoustique », thèse de doct., INSA de Lyon, 2011.
- [145] K. PEARSON, « LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space », *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, t. 2, n° 11, p. 559-572, 1901, Publisher: Taylor & Francis.
- [146] I. T. JOLLIFFE, « Principal component analysis: a beginner's guide—I. Introduction and application », *Weather*, t. 45, n° 10, p. 375-382, 1990, Publisher: Wiley Online Library.
- [147] T. HAWKINS, « Weierstrass and the theory of matrices », *Archive for History of Exact Sciences*, t. 17, n° 2, p. 119-163, 1^{er} juil. 1977, ISSN : 1432-0657.
- [148] M. PECHENIZKIY, A. TSYMBAL et S. PUURONEN, « PCA-based feature transformation for classification: issues in medical diagnostics », in *Proceedings. 17th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*, ISSN: 1063-7125, juin 2004, p. 535-540.
- [149] D. R. LEWIN, « Predictive maintenance using PCA », *Control Engineering Practice*, t. 3, n° 3, p. 415-421, 1^{er} mar. 1995, ISSN : 0967-0661.
- [150] V. K. UNNIKISHNAN, K. S. CHOUDHARI, S. D. KULKARNI, R. NAYAK, V. B. KARTHA et C. SANTHOSH, « Analytical predictive capabilities of laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) with principal component analysis (PCA) for plastic classification », *RSC Advances*, t. 3, n° 48, p. 25 872-25 880, 15 nov. 2013, Publisher: The Royal Society of Chemistry, ISSN : 2046-2069.
- [151] F. LOQUASTO et D. E. SEBORG, « Model predictive controller monitoring based on pattern classification and PCA », in *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.*, ISSN: 0743-1619, t. 3, juin 2003, 1968-1973 vol.3.
- [152] G. ZHAO, L. ZHANG, C. TANG, W. HAO et Y. LUO, « Clustering of AE signals collected during torsional tests of 3D braiding composite shafts using PCA and FCM », *Composites Part B: Engineering*, t. 161, p. 547-554, 2019, Publisher: Elsevier.

- [153] Y. YOUSSEF, A. FAHR et C. ROY, « NDE of Adhesively Bonded Joints Using Acousto-Ultrasonics and Pattern Recognition », in *Nondestructive Characterization of Materials IV*, Springer, 1991, p. 345-353.
- [154] M. MOEVUS, N. GODIN, M. R'MILI, D. ROUBY, P. REYNAUD, G. FANTOZZI et G. FARIZY, « Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiCf/[si-b-c] composites exhibiting different tensile behaviours. part II: Unsupervised acoustic emission data clustering », *Composites Science and Technology*, t. 68, n° 6, p. 1258-1265, 1^{er} mai 2008, ISSN : 0266-3538.
- [155] S. RAMADAN, L. GAILLET, C. TESSIER et H. IDRISSE, « Assessment of the stress corrosion cracking in a chloride medium of cables used in prestressed concrete structures by the acoustic emission technique », *Measurement Science and Technology*, t. 19, n° 11, p. 115 702, 2008, Publisher: IOP Publishing.
- [156] A. DIA, L. DIENG, L. GAILLET et P. B. GNING, « Damage detection of a hybrid composite laminate aluminum/glass under quasi-static and fatigue loadings by acoustic emission technique », *Heliyon*, t. 5, n° 3, e01414, 2019, Publisher: Elsevier.
- [157] S. CHATAIGNER, L. GAILLET, L. VALLEE et E. L. G. LA SALLE, « Contrôle non destructif d'assemblages composite/béton collés par acousto-ultrasons », in *Journées Nationales sur les Composites (JNC)*, 2015, 10p.
- [158] Z. LONG, X. ZHOU, X. ZHANG, R. WANG et X. WU, « Recognition and classification of wire bonding joint via image feature and SVM model », *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, t. 9, n° 5, p. 998-1006, 2019, Publisher: IEEE.
- [159] J. N. MORGAN et J. A. SONQUIST, « Problems in the Analysis of Survey Data, and a Proposal », *Journal of the American Statistical Association*, t. 58, n° 302, p. 415-434, 1963.
- [160] L. BREIMAN, J. FRIEDMAN, C. J. STONE et R. OLSHEN, *Classification and Regression Tree, Wadsworth Statistics/Probability*. Chapman et Hall/CRC, 1984.
- [161] L. BREIMAN, « Random forests », *Machine Learning*, t. 45, n° 1, p. 5-32, 1^{er} oct. 2001, ISSN : 1573-0565.
- [162] Z. WANG, F. CHEGDANI, N. YALAMARTI, B. TAKABI, B. TAI, M. EL MANSORI et S. BUKKAPATNAM, « Acoustic emission characterization of natural fiber reinforced plastic composite machining using a random forest machine learning model », *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, t. 142, n° 3, p. 031 003, 2020, Publisher: American Society of Mechanical Engineers.
- [163] E. RACLE, N. GODIN, P. REYNAUD et G. FANTOZZI, « Fatigue lifetime of ceramic matrix composites at intermediate temperature by acoustic emission », *Materials*, t. 10, n° 6, p. 658, 2017, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [164] J. TIAN, L. LIU, F. ZHANG, Y. AI, R. WANG et C. FEI, « Multi-domain entropy-random forest method for the fusion diagnosis of inter-shaft bearing faults with acoustic emission signals », *Entropy*, t. 22, n° 1, p. 57, 2020, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [165] L. AI, V. SOLTANGHARAEI, M. BAYAT, M. VAN TOOREN et P. ZIEHL, « Detection of impact on aircraft composite structure using machine learning techniques », *Measurement Science and Technology*, t. 32, n° 8, p. 084 013, 2021, Publisher: IOP Publishing.

- [166] F. E. F. SAMANN, « Detecting Kissing Disbond Defect in Adhesively Bonded Structures: A Review », in *2019 International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE)*, avr. 2019, p. 214-219.
- [167] MATHWORKS FRANCE. (2021). « Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial (PCHIP) - MATLAB pchip », adresse : <https://fr.mathworks.com/help/matlab/ref/pchip.html> (visité le 30/06/2021).
- [168] F. N. FRITSCH et R. E. CARLSON, « Monotone Piecewise Cubic Interpolation », *SIAM Journal on Numerical Analysis*, t. 17, n° 2, p. 238-246, 1^{er} avr. 1980, Publisher: Society for Industrial and Applied Mathematics, ISSN : 0036-1429.
- [169] M. H. STONE, « The Generalized Weierstrass Approximation Theorem », *Mathematics Magazine*, t. 21, n° 5, p. 237-254, 1948, Publisher: Mathematical Association of America, ISSN : 0025-570X.
- [170] R. BOUSSELJOT et D. KREISELER, « Waveform recognition with 10,000 ECGs », in *Computers in Cardiology 2000. Vol.27 (Cat. 00CH37163)*, ISSN: 0276-6547, sept. 2000, p. 331-334.
- [171] MATHWORKS FRANCE. (2021). « Align two signals by delaying earliest signal - MATLAB alignsignals », adresse : <https://fr.mathworks.com/help/signal/ref/alignsignals.html> (visité le 30/06/2021).
- [172] J. GUO, « Propagation des ondes acoustiques dans des assemblages collés du génie civil : modélisation du contrôle par acoustoultrasons », Université de Nantes, Mémoire de maîtrise, 2021.
- [173] R.-R. NABER et H. BAHAI, « Analytical and experimental validations of a numerical band-limited Green's function approach for modelling acoustic emission waves », *Advances in engineering software*, t. 38, n° 11, p. 876-885, 2007, Publisher: Elsevier.
- [174] J. F. SEMBLAT, « RHEOLOGICAL INTERPRETATION OF RAYLEIGH DAMPING », *Journal of Sound and Vibration*, t. 206, n° 5, p. 741-744, 9 oct. 1997, ISSN : 0022-460X.
- [175] T. S. KING et V. M. CHINCHILLI, « A generalized concordance correlation coefficient for continuous and categorical data », *Statistics in medicine*, t. 20, n° 14, p. 2131-2147, 2001, Publisher: Wiley Online Library.
- [176] E. MAILLET, « Identification des Mécanismes d'endommagement et prévision de la durée de vie des composites à matrice céramique par émission acoustique », thèse de doct., Lyon, INSA, 2012.

ANNEXES

Dans ces annexes nous présentons les fiches techniques des matériaux composites utilisés dans le cadre cette thèse, puis les courbes de sensibilité des capteurs étudiés. Dans une troisième partie, nous donnons les spécifications de la machine utilisée pour la réalisation des mesures DSC (issues de la brochure du fournisseur) ainsi que les différentes configurations apportées à la machine lors des mesures. Enfin, nous donnerons des exemples de résultats de mesures DSC obtenus à deux dates différentes.

6.6 Annexe A : Courbes de sensibilité des capteurs

Les courbes de sensibilité des différents capteurs sont présentées sur les figures suivantes :

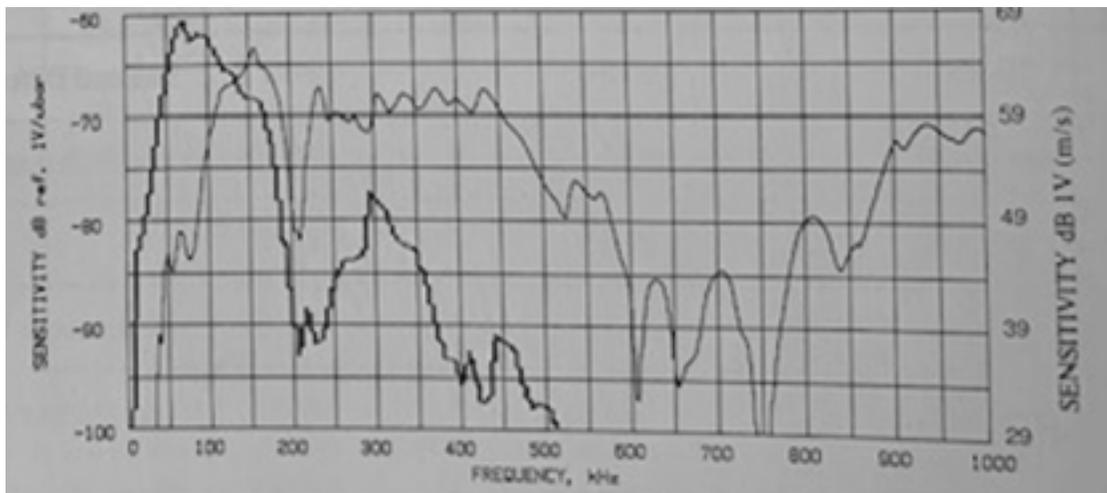


FIGURE 6.13 – Courbe de sensibilité du capteur R15 (Source Physical Acoustics Corporation)

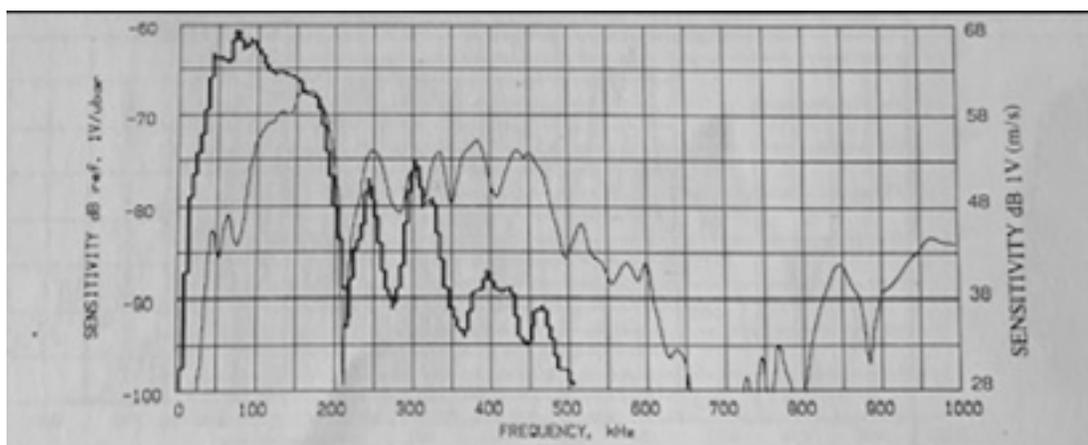


FIGURE 6.14 – Courbe de sensibilité du capteur S9204 (Source Physical Acoustics Corporation)

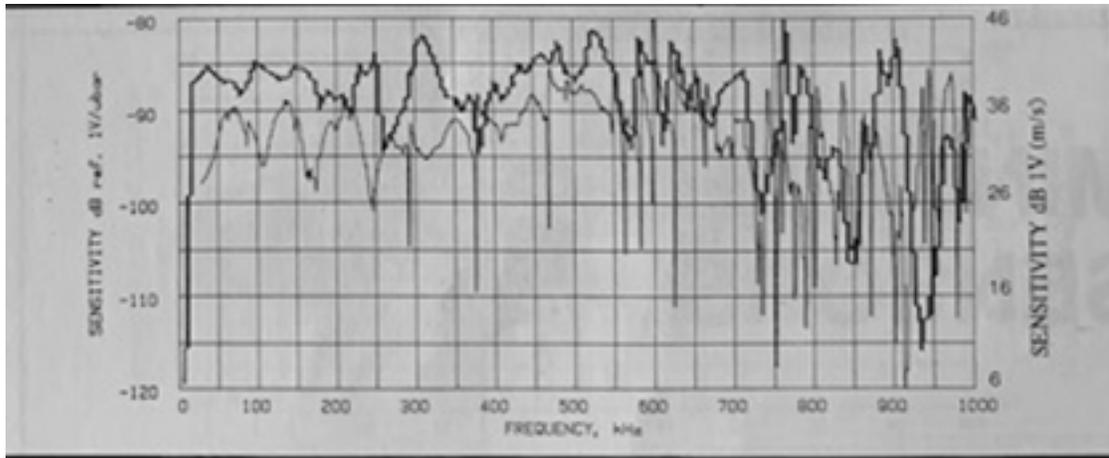


FIGURE 6.15 – Courbe de sensibilité du capteur S9208 (Source Physical Acoustics Corporation)

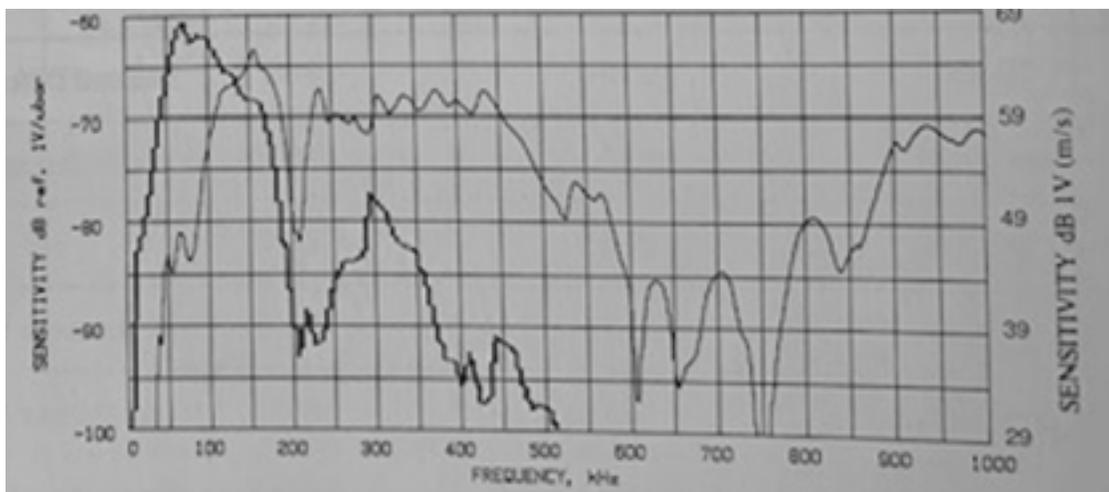


FIGURE 6.16 – Courbe de sensibilité du capteur WD (Source Physical Acoustics Corporation)

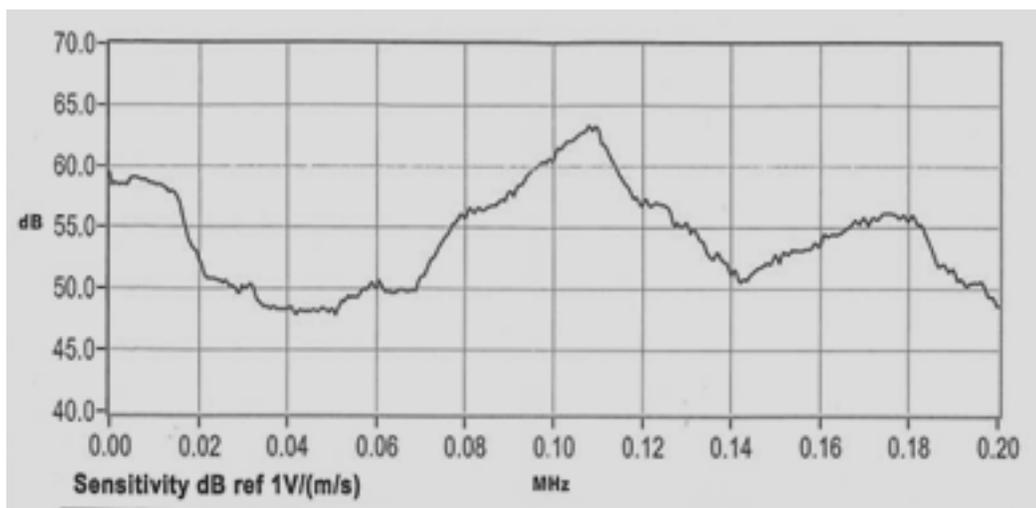


FIGURE 6.17 – Courbe de sensibilité du capteur SH10 (Source Physical Acoustics Corporation)

6.7 Annexe B : Fiches techniques des matériaux

Les caractéristiques mécaniques extraites des fiches techniques des matériaux utilisés pour la réalisation de nos éprouvettes sont répertoriées dans les tableaux suivants.

Notation	Valeur numérique	Unité	Définition
f_{ck}	25	MPa	Résistance caractéristique à la compression du béton (mesurée sur cylindre à 28 jours)
$f_{ck,cube}$	30	MPa	Résistance caractéristique à la compression du béton (mesurée sur cube à 28 jours)
f_{cm}	33	MPa	Résistance moyenne à la compression du béton
f_{ctm}	2.6	MPa	Résistance moyenne à la traction du béton
E_{cm}	31476	MPa	Module d'élasticité sécant du béton (déformation instantanée)
ϵ_{c2}	3,5‰	Sans	Déformation du béton (à l'ELU)

TABLEAU 6.1 – Caractéristiques mécaniques du béton C25/30 (source fiche technique)

Notation	Valeur numérique	Unité	Définition
f_e	355	MPa	Contrainte limite élastique de l'acier
E_a	210000	MPa	Module d'élasticité de l'acier (déformation instantanée)
ϵ_a	22 ‰	Sans	Déformation de l'acier à l'ELU

TABLEAU 6.2 – Caractéristiques mécaniques de l'acier S355 (source fiche technique)

Notation	Valeur numérique ou définition BAEL91	Unité	Définition
$\varepsilon_{f \text{ rupture}}$	16 ‰	Sans	Déformation des profilés COMPODEX C12 à la rupture
E_f	$1,63 \cdot 10^5$	MPa	Module d'Young des profilés COMPODEX C12
$f_{f \text{ rupture}}$	2800	MPa	à la rupture
$n_f = 15 \frac{E_f}{E_a}$ ($E_a = 200\,000$ MPa)	12	Sans	Coefficient d'équivalence COMPODEX C12 / béton
$\varepsilon_{fu} = \text{Min} \left\{ \frac{f_{fu}}{E_f}; 0,85\% \right\}$	8,5 ‰	Sans	Déformation des profilés COMPODEX C12 à l'ELU
$f_{fu} = \text{Min} \left\{ \frac{\alpha_f}{\gamma_f} f_{f \text{ rupture}}; 0,85\% \cdot E_f \right\}$ avec $\gamma_f = 1,25$	1385	MPa	à l'ELU
$f_{f \text{ lim}} = \text{Min} \left\{ \frac{\alpha_f}{\gamma_f} f_{f \text{ rupture}}; 450 \right\}$ avec $\gamma_f = 1,4$	450	MPa	à l'ELS
$\varepsilon_{f \text{ lim}} = \frac{f_{f \text{ lim}}}{E_f}$	2,76 ‰	Sans	Déformation du COMPODEX C12 à l'ELS

TABLEAU 6.3 – Caractéristiques mécaniques du COMPODEX C12 (source fiche technique)

Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
Masse volumique <ul style="list-style-type: none"> • durcisseur • résine • Mélange 		1,52 / 1,62 1,39 / 1,49 1.45-1.55	
DVP (durée de vie en pot)		2h30 à 23°C	
Température de mise en œuvre		Entre 5 et 45°C	Sans précaution particulière
Viscosité		Pâte thixotrope	
Dureté shore D		Max. 83. Durcissement complet à 23°C : 48h	
Résistance à la traction Allongement à la rupture		29.5 ± 1.2 MPa 0.65 ± 0,1 MPa	
Résistance à la compression		83 ± 1.5 MPa	
Résistance à la flexion		n m	
Module <ul style="list-style-type: none"> • E (0,2 %) traction • E (0,2 %) compression 		4940 ± 170 MPa 4200 ± 150 MPa	
Adhérence <ul style="list-style-type: none"> • sur béton sablé sec • sur béton sable humide 		> 2,5MPa > 2 MPa	Sur béton B40

TABLEAU 6.4 – Caractéristiques mécaniques du FOREVA LFC (source fiche technique)

6.8 Annexe C : Mesures DSC

Les mesures DSC ont été réalisées avec les configurations suivantes :

Porte-échantillon : Aluminum Standard 40ul

Technique TA : DSC

Température de départ : 20 °C

Température finale : 20 °C

Échantillon

Plage de Poids : 0 - 1000 mg

Temps d'acquisition : 1 s

Température d'insertion : automatique

Température de retrait : automatique

Ne pas maintenir

Stabilisation de l'expérience activé

Le programme de chauffe adopté lors des mesures est le suivant :

Segment 1

Température initiale : 20 °C

Température finale : 220 °C

Vitesse de chauffe : 10 K/min

Gaz : N₂, 150 ml/min

Segment 2

Température initiale : 220 °C

Température finale : 20 °C

Vitesse de chauffe : -10 K/min

Gaz : N₂, 150 ml/min

Segment 3

Température initiale : 20 °C

Température finale : 220 °C

Vitesse de chauffe : 10 K/min

Gaz : N₂, 150 ml/min

Segment 4

Température initiale : 220 °C

Température finale : 20 °C

Vitesse de chauffe : -10 K/min

Gaz : N₂, 150 ml/min

Nous présentons sur les figures 6.18 et 6.19 les pics exothermiques obtenus à la date initiale du mélange des deux composants de la résine époxy, et à 24h après le début de la réticulation.

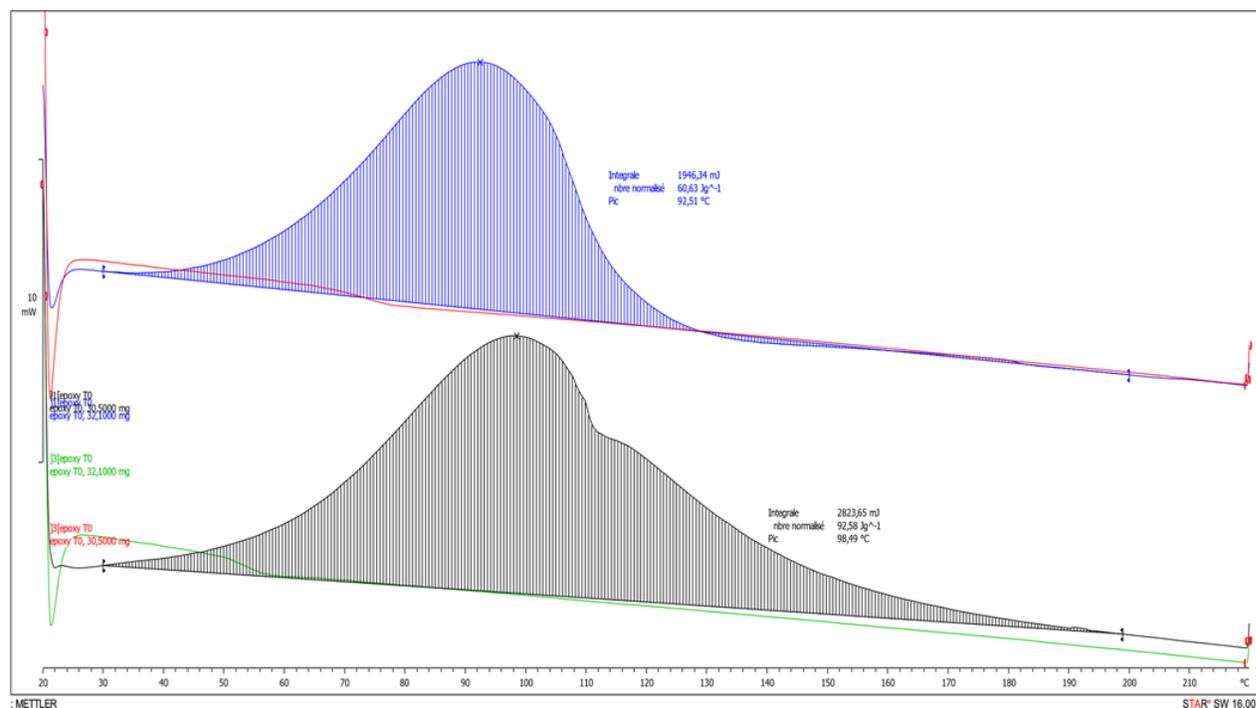


FIGURE 6.18 – Visualisation du pic exothermique correspondant à la réticulation de la résine époxy à t_0 : flux de chaleur (W/g) vs température (°C)

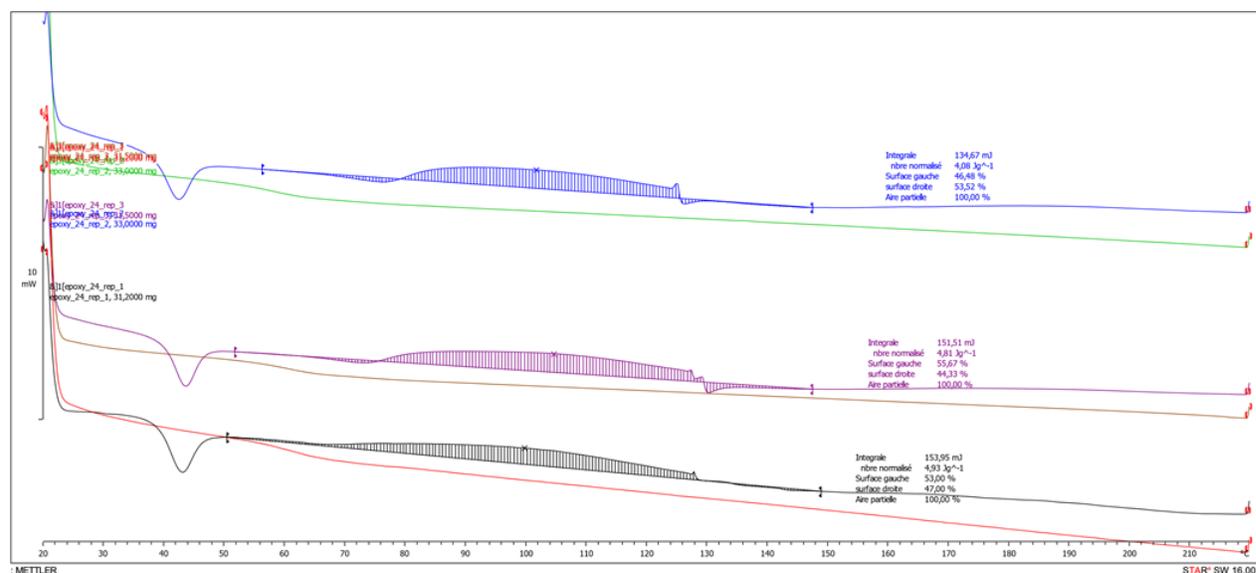


FIGURE 6.19 – Visualisation du pic exothermique correspondant à la réticulation de la résine époxy après 24h : flux de chaleur (W/g) vs température (°C)

Spécifications DSC 3+

Données sur le contrôle de la température

Plage de température	refroidissement par air	RT à 500 °C (200 W)	RT à 700 °C (400 W)
	cryostat	-50 à 450 °C	-50 à 700 °C
	IntraCooler	-100 à 450 °C	-100 à 700 °C
	azote liquide	-150 à 500 °C	-150 à 700 °C
Précision de la mesure ¹⁾		± 0,2 K	
Reproductibilité de la mesure ¹⁾		± 0,02 K	
Résolution de la température du four		± 0,00006 K	
Vitesse de chauffe ²⁾ RT à 700 °C		0,02 à 300 K/min	
Vitesse de refroidissement ²⁾		0,02 à 50 K/min	
Durée du refroidissement	refroidissement par air	8 min (500 à 100 °C)	9 min (700 à 100 °C)
	cryostat	5 min (100 à 0 °C)	
	IntraCooler	5 min (100 à 0 °C)	
	azote liquide	15 min (100 à -100 °C)	

Données calorimétriques

Modèle de capteur	FRS 6+	HSS 9+	
Matériau du capteur	céramique		
Nombre de thermocouples	56	120	
Constante de temps du signal	1,8 s	3,1 s	
Pic d'Indium (hauteur / largeur)	données brutes	19,5 ³⁾	6,9
	corrige	>155 ⁴⁾	>85 ⁴⁾
TAWN	résolution	0,12	0,20
	sensibilité	11,9	56,0
Plage de mesure	à 100 °C	± 350 mW	± 160 mW
	à 700 °C	± 200 mW	± 140 mW
Résolution	0,04 µW	0,02 µW	
Résolution numérique	16,8 millions de points		

Enregistrement des données

Vitesse d'acquisition	maximum 50 valeurs / seconde
-----------------------	------------------------------

Possibilité d'évolution

ADSC	standard
IsoStep®, TOPEM®	optionnel
Passeur d'échantillons	
Microscopie	
Photo calorimétrie	

Homologations

IEC/EN61010-1:2001, IEC/EN61010-2-010:2003
 CAN/CSA C22.2 No. 61010-1-04
 UL Std No. 61010A-1
 EN61326-1:2006 (class B)
 EN61326-1:2006 (Industrial environments)
 FCC, Part 15, class A
 AS/NZS CISPR 22, AS/NZS 61000.4.3
 Conformité : CE

¹⁾ basé sur des étalons standards métalliques

²⁾ suivant la configuration de l'instrument

³⁾ aucun traitement ou correction mathématique des données

⁴⁾ corrigé selon B. Wunderlich, Thermal Analysis of Polymeric Materials, Springer (2005), page 346

www.mt.com/dsc

Pour plus d'informations

Mettler-Toledo AG, Analytical

CH-8603 Schwerzenbach, Suisse
 Tél. +41 44 806 77 11
 Fax +41 44 806 72 60

Sous réserve de modifications techniques
 © 05/2015 Mettler-Toledo AG, 30247115A
 Marketing MatChar / MarCom Analytical



Certificat de qualité. Développement, production et tests selon ISO 9001.



Système de gestion de l'environnement selon ISO 14001.



« **Conformité Européenne** ». La marque vous donne l'assurance que nos produits sont conformes aux directives de l'Union européenne.

Titre : Vers une auscultation par acousto-ultrasons des renforcements par composites collés de structures du génie civil

Mots clés : renforts composite, assemblages collés, contrôle non destructif, acousto-ultrasons, ACP, Forêt d'arbres décisionnels,

Résumé : Un rapport sénatorial de Juin 2019 estime le parc d'ouvrages vieillissants de la France à plus de 25000 ponts routiers. Une des solutions préconisées pour éviter la ruine de ces structures est leur renforcement par collage de matériaux composites. Cette solution technique permet d'augmenter la durée de vie des ouvrages tout en prenant en compte de nouvelles sollicitations (augmentation drastique du trafic et risques sismiques). Cependant, elle est efficace que lorsque le joint de colle est bien exécuté et exempt de tout défaut ou endommagement. Ainsi, son utilisation est limitée par une méconnaissance de la qualité réelle des joints de colle sur site. L'objectif de cette thèse est de proposer à partir d'une technique non destructive, les acousto-ultrasons, une méthodologie de détection et d'identification des principaux types de défauts rencontrés dans des assemblages collés. Les deux types de substrats les plus communément utilisés en gé-

nie civil à savoir l'acier et le béton ont été étudiés dans cette thèse. Par le biais d'une analyse mono-paramétrique et d'une analyse statistique en composantes principales (ACP), l'ensemble des défauts créés dans des assemblages d'acier-composite et de béton-composite ont été détectés avec succès. L'identification de ces défauts a été obtenue grâce aux outils de l'intelligence artificielle (IA) à travers l'algorithme de classification de la forêt d'arbres décisionnels. Les facteurs pouvant influencer cette méthodologie ont été passés en revue avant qu'elle ne soit validée sur des échantillons de plus grande échelle, proches des réalisations sur site. Enfin, via une simulation par éléments finis de la propagation du signal dans un assemblage collé, nous soulignons les perspectives que peut offrir cette technique dans la constitution de bibliothèques d'apprentissage pour l'application des techniques de l'IA au diagnostic et au pronostic de l'état de joints de colle.

Title : Towards the nondestructive evaluation of FRP-reinforced structures in Civil Engineering using Acousto-ultrasonics

Key words : FRP-reinforcement, adhesively bonded joints, nondestructive technique, acousto-ultrasonics, PCA, Random forest,

Abstract : A Senate report from June 2019 estimates France's ageing structures at more than 25,000 road bridges. One of the recommended solutions to prevent the collapse of these structures is their bonding reinforcement of composite materials. This technical solution allows us to increase their life-service by taking into account new acquired stresses (drastic increase in traffic and seismic risks). However, the reinforcing is effective only when the adhesively bonded joint is well executed and free of defects or damages. Thus, the use of this method is limited by a lack of knowledge of the real quality of adhesive joints on site. The objective of this thesis is to propose from a nondestructive technique, the acousto-ultrasonics, a methodology of detection and identification of all types of defects encountered in adhesively bonded assemblies. We studied the most

common types of substrates used in civil engineering: steel and concrete. Through a mono-parametric analysis and a statistical principal components analysis (PCA), all the elaborated defects in composite-steel and composite-concrete assemblies were successfully detected. The identification of these defects was obtained using Machine Learning tools through the Random Forest classification algorithm. The factors that could influence this methodology were studied before it was validated on specimens of a larger scale, closer to the on-site achievements. Finally, through a finite element simulation of signal propagation in a bonded assembly, we underline the perspectives that this technique can offer in building learning libraries for the application of Machine Learning techniques to the diagnosis and prognosis of the state of adhesively bonded joints.