



HAL
open science

Evaluation par ondes guidées de niveaux d'adhésion dissymétriques dans des collages structuraux métal-matériau composite.: Modélisation et approches des cas de Kissing Bonds

Latifa Attar

► **To cite this version:**

Latifa Attar. Evaluation par ondes guidées de niveaux d'adhésion dissymétriques dans des collages structuraux métal-matériau composite.: Modélisation et approches des cas de Kissing Bonds. Acoustique [physics.class-ph]. Normandie Université, 2019. Français. NNT: 2019NORMMLH06. tel-02185601

HAL Id: tel-02185601

<https://theses.hal.science/tel-02185601>

Submitted on 16 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Acoustique

Préparée au sein de l'Université du Havre

Evaluation par ondes guidées de niveaux d'adhésion dissymétriques dans des collages structuraux métal-matériau composite. Modélisation et approches des cas de kissing bonds.

Présentée et soutenue par

Latifa ATTAR

**Thèse soutenue publiquement le 28/06/2019
devant le jury composé de**

M. Gilles DESPAUX	Professeur, Université de Montpellier	Rapporteur
M. Louis-Pascal TRAN HUU HUE	Professeur, INSA VAL de Loire, Blois	Rapporteur
M. Georges ZISSIS	Professeur, Université Paul Sabatier Toulouse 3	Examinateur
Mme. Jocelyne GALY	DR CNRS, IMP, INSA Lyon	Examinatrice
Mme. Ghizlane KHAISSIDI	Professeur HDR, ENSA de Fès, Fès, Maroc	Examinatrice
M. Mathieu RENIER	Maître de Conférences, Université de Bordeaux	Examinateur
M. Damien LEDUC	Maître de Conférences, Université Le Havre Normandie	Co-encadrant
M. Mounsiif ECH-CHERIF EL-KETTANI	Professeur, Université Le Havre Normandie	Directeur de thèse
M. Mathieu DUCOUSSO	Docteur Ingénieur, SAFRAN Tech	Membre invité
M. Mihai Valentin PREDOI	Professeur, Université Polytechnique de Bucarest, Roumanie	Membre invité

Thèse dirigée par Mounsiif ECH-CHERIF EL-KETTANI, laboratoire LOMC UMR CNRS 629



REMERCIEMENTS

Ces travaux de thèse ont été menés au Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC) au Havre au sein de l'équipe Ondes Acoustiques. A ce titre je tiens à remercier Innocent MUTABAZI et Pascal PAREIGE, le directeur et directeur adjoint du LOMC, pour m'avoir accueillie dans de si bonnes conditions.

Je souhaite ensuite remercier mon directeur de thèse Mounsiif ECH CHERIF EL KETTANI, pour sa générosité et sa grande patience, qui m'a encadré d'une manière permanente jusqu'à la fin de ce travail et m'a conseillé et donné le temps suffisant afin de mener à bien ce travail. Mes remerciements vont aussi et de manière respectueuse et combien reconnaissante à Damien LEDUC, qu'il veuille me permettre de rendre hommage à ses qualités exceptionnelles à son savoir-faire et à sa contribution bénéfique au bon déroulement de cette thèse.

J'adresse toute ma reconnaissance aux membres du jury qui ont accordé un temps précieux à l'étude de ce travail : Gilles DESPAUX et Louis-Pascal TRAN HUU HUE, qui ont eu la rude tâche de rapporteurs du présent manuscrit. Je tiens à remercier Georges ZISSIS d'avoir accepté de présider ce jury. Merci à Jocelyne GALY, Ghizlane KHAISSIDI et Mathieu RENIER, de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail. Je remercie également Mihai Valentin PREDOI, avec qui j'ai travaillé tout au long de ces années sur le développement du modèle numérique. Merci également à Mathieu DUCOUSSO d'avoir accepté de participer au jury de thèse.

Je remercie vivement l'ensemble des chercheurs du groupe Ondes Acoustique, personnel technique et administratif. Tout d'abord, Faroudja HADJAZ pour sa gentillesse et son efficacité dans l'exécution des tâches administratives. Jean DUCLOS pour le temps qu'il m'a consacré et pour son aide précieuse dans la mise en place des expérimentations « pulse-echo » et Pierre MARECHAL, pour ses encouragements et sa gentillesse.

Et puis, je remercie tous les doctorants et les post-doctorants que j'ai croisé durant toutes ces années : Nesrine, Daher, David, Feriel, Touria, Athina, Simon avec qui j'ai partagé de très bons moments.

REMERCIEMENTS

Enfin un merci très spécial à ma famille et tout particulièrement à mon mari Younes, tout simplement pour avoir été inconditionnellement là, pour m'avoir soutenue et pour m'avoir encouragée.

Cette thèse s'intéresse à l'évaluation de la qualité de l'adhésion dans des assemblages structuraux métal/adhésif/composite carbone-époxy, assemblages utilisés dans l'industrie automobile et aéronautique. La qualité du collage est évaluée par méthodes non destructives grâce à des ondes guidées ultrasonores de type Lamb et SH. Un nouveau modèle numérique par éléments finis a été développé au cours de ce travail : il s'agit d'un modèle rhéologique aux interfaces qui permet de tracer les courbes de dispersion des modes guidés dans les échantillons étudiés. Il permet aussi de prédire l'évolution de l'amplitude de ces modes et la répartition de l'énergie dans la structure suivant le niveau d'adhésion ou la présence d'un défaut de type kissing bond. Des échantillons à niveau d'adhésion connus et maîtrisés sont réalisés avec l'aide de physico-chimistes, où l'époxy est partiellement ou totalement réticulé, et où l'interface substrat/adhésif a subi différents traitements chimiques. En particulier sont étudiés des échantillons dont la dégradation du collage dans la structure n'est pas symétrique. Les résultats expérimentaux sont confrontés à ceux issus du modèle numérique. Ces résultats montrent qu'il est possible de caractériser deux niveaux d'adhésion proches et aussi de déterminer sur quelle interface (métal/adhésif ou composite/adhésif) le collage a été dégradé. L'utilisation d'un banc de mesure à transducteurs électromagnétiques acoustiques (EMAT) a permis l'étude de l'amplitude des modes SH. Des variations importantes de l'amplitude de certains modes ont été constatées lors du passage de l'onde d'une zone de bonne adhésion à une zone où le collage est dégradé.

This thesis focuses on the evaluation of the quality of adhesion in metal/adhesive/carbon-epoxy structural assemblies used in the automotive and aerospace industry. The quality of the bonding is assessed by non-destructive methods using ultrasonic guided waves of the Lamb and SH types. A new finite element numerical model was developed during this work: it is an interphase rheological model that allows the dispersion curves of the guided modes to be plotted in the samples studied. It also makes it possible to predict the evolution of the amplitude of these modes and the distribution of energy in the structure according to the level of adhesion or the presence of a kissing bond type defect. Samples with known and controlled adhesion levels are made with the help of physico-chemists, where the epoxy is partially or totally crosslinked, and where the substrate/adhesive interface has undergone different chemical treatments. In particular, samples are studied whose degradation of the bonding in the structure is not symmetrical. The experimental results are compared with those from the numerical model. These results show that it is possible to characterize two close levels of adhesion and also to determine on which interface (metal/adhesive or composite/adhesive) the bonding has been degraded. The use of a measurement bench with electromagnetic acoustic transducers (EMAT) allowed the study of the amplitude of the SH modes. Significant variations in the amplitude of some modes have been observed when the wave passes from an area of good adhesion to an area where the bonding is degraded.

TABLE DES MATIÈRES.....	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	13
Chapitre 1 : REVUE DE LITTÉRATURE PRÉLIMINAIRE.....	21
1 Revue de littérature préliminaire	23
1.1 Technique d'assemblage par collage structural	23
1.2 Familles de défauts de collage.....	25
1.2.1 Défauts cohésifs.....	25
1.2.2 Défauts adhésifs.....	25
1.2.3 Kissing bond.....	26
1.3 Les méthodes de contrôle et d'évaluation non destructives du collage	27
1.3.1 Ressuage.....	27
1.3.2 Radiographie.....	27
1.3.3 La thermographie infrarouge.....	28
1.3.4 Courants de Foucault.....	30
1.3.4 Les ultrasons.....	31
1.4 Conclusion	35
Chapitre 2 : Evaluation des niveaux d'adhésion dans un tricouche métal/époxy/matériau composite par ondes de Lamb.....	37
1 Introduction	39
2 Rappels théoriques sur les ondes de Lamb.....	40
2.1 Milieu élastique, homogène et isotrope.....	40
2.2 Théorie des ondes élastiques.....	42
2.3 Ondes de Lamb dans une plaque plane dans le vide.....	44
2.4 Ondes de Lamb dans une plaque plane anisotrope.....	48
2.5 Cas des matériaux orthotropes.....	52
3 Simulation 1D de l'adhésion aux interfaces collées substrat/colle par éléments finis.....	55
3.1 Modèle rhéologique aux interphases.....	55
3.1.1 Propriétés des matériaux de l'assemblage.....	55
3.1.2 Présentation du modèle.....	56
3.2 Comparaison avec le modèle adhésif de Jones.....	61
3.3 Implémentation sous Comsol.....	62
3.4 Courbes de dispersion numériques.....	65
3.5 Sensibilité des modes de Lamb aux coefficients d'adhésion α et β.....	67
3.5.1 Cas où $\alpha=1$ et $\beta<1$	67
3.5.2 Cas où $\alpha<1$ et $\beta=1$	70

3.6	Sensibilité aux épaisseurs des matériaux de la structure.....	72
3.6.1	Sensibilité à l'épaisseur de la couche de composite.....	73
3.6.2	Sensibilité à l'épaisseur de la couche d'aluminium.....	74
3.6.3	Sensibilité à l'épaisseur de la couche de colle.....	75
3.6.4	Sensibilité aux modules de cisaillement C_{ij} du matériau composite.....	756
4	Caractérisation expérimentale de la qualité de collage avec des modes de Lamb.....	78
4.1	Protocole de réalisation des échantillons.....	78
4.1.1	Préparation de surface.....	78
4.1.2	Choix de l'adhésif époxy et protocole d'assemblage des matériaux.....	81
4.1.3	Echantillons étudiés.....	83
4.2	Résultats expérimentaux de l'étude par ondes de Lamb.....	84
4.2.1	Dispositif expérimental.....	85
4.2.2	Acquisition et traitements de signal.....	86
4.2.3	Confrontation des résultats expérimentaux aux résultats de simulations.....	87
5	Conclusion.....	95
Chapitre 3 : évaluation de niveaux d'adhésion par ondes guidées de type SH. Modélisation et détection de défauts de type kissing bond.....97		
1.	Introduction.....	99
2.	Rappel théorique sur les ondes SH.....	100
3.	Simulation 1D de l'adhésion aux interfaces collées substrat/colle par éléments finis.....	103
3.1	Modèle rhéologique aux interphases pour les ondes SH.....	103
3.1.1	Présentation du modèle.....	103
3.2	Implémentation sous Comsol.....	104
3.3	Courbes de dispersion numériques.....	105
3.4	Sensibilité aux coefficients d'adhésion α et β.....	108
3.4.1	Cas où $\alpha=1$ et $\beta<1$	109
3.4.2	Cas où $\alpha<1$ et $\beta=1$	111
3.5	Sensibilité aux épaisseurs des matériaux de la structure.....	113
3.5.1	Sensibilité à l'épaisseur de la couche d'aluminium.....	113
3.5.2	Sensibilité à l'épaisseur de la couche de composite.....	114
3.5.3	Sensibilité à l'épaisseur de la couche de colle.....	115
3.5.4	Sensibilité aux modules de cisaillement C_{ij} du matériau composite.....	116
4.	Simulation 2D de la propagation d'une onde SH.....	117
4.1	Description du modèle.....	118
4.2	Implémentation sous Comsol.....	118
4.3	Validation du modèle de simulation 2D.....	120

4.4	Modélisation d'un défaut de type kissing bond (KB)	123
4.4.1.	Interaction d'un mode SH sensible à la qualité du collage avec un défaut de type kissing bond de grande dimension.....	124
4.4.2.	Interaction d'un mode SH insensible à la qualité du collage avec un défaut de type kissing bond de grande dimension.....	130
4.4.3.	Etude paramétrique selon la taille du kissing bond	133
5	Résultats expérimentaux	137
5.1	Etude énergétique sur la non excitabilité des modes SH sensibles à la qualité de l'adhésion.....	137
5.2	Le banc expérimental EMAT pour la génération des ondes SH.....	139
5.3	Reproductibilité des mesures.....	141
5.4	Etude d'atténuation des modes SH	143
5.4.1	Echantillons de l'étude.....	143
5.4.2	C-scan pour valider la présence d'une dégradation du collage	144
5.4.3	Résultats expérimentaux de l'étude d'atténuation.....	148
6	Conclusion	156
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	159
	BIBLIOGRAPHIE	165

Liste des figures

Figure 1 : Les techniques d'assemblage selon Schindell-Bidinelli (1992).....	15
Figure 1-1 : Schéma d'un assemblage collé.	23
Figure 1-2 : Comparaison de méthodes d'assemblages structuraux selon la distribution des contraintes de cisaillements.....	24
Figure 1-3 : Géométrie du modèle rhéologique de Jones adhésif (pour Lamb).....	32
Figure 1-4 : Géométrie du modèle rhéologique de Jones cohésif (pour Lamb).....	33
Figure 1-5 : Géométrie du modèle rhéologique aux interphases.....	34
Figure 2-1 : Déformée de la plaque pour les modes symétriques (a) et antisymétriques (b). ...	41
Figure 2-2 : Géométrie de la plaque et système d'axes utilisé.....	45
Figure 2-3 : Courbes de dispersion des ondes de Lamb dans une plaque d'aluminium d'épaisseur 4mm.	48
Figure 2-4 : Géométrie d'une plaque composite et système d'axes considéré.....	50
Figure 2-5 : Courbes de dispersion des ondes de Lamb dans une plaque de composite carbone-époxy d'épaisseur 1.8mm.....	54
Figure 2-6 : Lien entre l'adhésif et le substrat.....	57
Figure 2-7 : Dispositif utilisé pour la mesure de la rugosité des plaques.....	58
Figure 2-8: Profil de surface d'une plaque d'aluminium.....	58
Figure 2-9 : Profil de surface d'une plaque de composite carbone-époxy.....	59
Figure 2-10 : Représentation du modèle rhéologique aux interphases.....	59
Figure 2-11 : Courbes de dispersion de la structure aluminium/époxy/carbone-époxy pour les ondes de Lamb obtenues par le modèle de Jones pour $R_L=R_T=10^{10} \text{ N/m}^3$	62
Figure 2-12 : Représentation de la coupe transversale de la structure d'étude aluminium/époxy/carbone-époxy.....	64
Figure 2-13: Courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la structure aluminium (4 mm)/époxy (0.5 mm)/carbone-époxy (1.8 mm) obtenues par le modèle aux interphases pour ($\alpha=\beta=1$) en vert et celles obtenues par le modèle de Jones pour $R_L=R_T=10^{15} \text{ N/m}^3$ en bleu.....	66
Figure 2-14 : Courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la structure aluminium (4 mm)/époxy (0.5 mm)/carbone-époxy (1.8 mm) en vitesse de phase obtenues par le modèle aux interphases pour ($\alpha=\beta=1$) en vert et celles obtenues par le modèle de Jones pour $R_L=R_T=10^{15} \text{ N/m}^3$ en bleu.....	67
Figure 2-15 : Sensibilité des courbes de dispersion se propageant le long de la structure tricouche, à $\beta=0.1$ (*) (a), à $\beta=0.01$ (o) (b), à $\beta=0.001$ (+) (c) et à $\beta=0.0001$ (x) par rapport à l'adhésion parfaite obtenue pour $\alpha=\beta=1$ (en point gris).....	69

Figure 2-16 : Courbes de dispersion de la structure tricouchealuminium (4mm)/époxy (0.5 mm)/carbone-époxy (1.8 mm) pour ($\alpha=1$ et $\beta=0.0001$)(•) superposées aux courbes de dispersion d'une bicouche aluminium (4mm)/époxy (0.5 mm) (○) et à celles d'une plaque de composite carbone-époxy (1.8mm) (+).....70

Figure 2-17 : Sensibilité des courbes de dispersion se propageant le long de la structure tricouche, pour $\alpha=0.1$ (*) (a), à $\alpha=0.01$ (○) (b), à $\alpha=0.001$ (+) (c) et à $\alpha=0.0001$ (x) (d) par rapport à l'adhésion parfaite obtenue pour $\alpha=\beta=1$ (en point gris).....71

Figure 2-18 : Sensibilité des modes de Lamb dans la tricouchealuminium/époxy/carbone-époxy à la variation de +5% de l'épaisseur de la couche de composite (en bleu), de -5% (en gris) et pour une épaisseur de référence de 1.8 mm (en noir).....73

Figure 2-19 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la tricouchealuminium/époxy/carbone-époxy à la variation de +3% de l'épaisseur de la couche d'aluminium (en bleu), de -3% (en gris) et pour une épaisseur de référence 4 mm (en noir).....74

Figure 2-20 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la tricouchealuminium/époxy/carbone-époxy à la variation de +10% de l'épaisseur de la couche de colle (en jaune), de -10% (en gris) et pour une épaisseur de référence 0.5 mm (en noir).....75

Figure 2-21 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes de Lamb pour la tricouchealuminium/époxy/composite (cas de l'adhésion parfaite) aux paramètres C_{ij} du composite à +20% (en gris) et à -20% (en bleu) par rapport aux C_{ij} moyennes en a) du C_{66} en b) du C_{12} et en c) du C_{11}77

Figure 2-22 : Evolution du cycle de réticulation d'un adhésif bi-composant à base d'époxy.....79

Figure 2-23 : Etapes d'assemblage des matériaux.....82

Figure 2-24 : Dispositif expérimental pour la génération d'ondes de Lamb..... 85

Figure 2-25 : (a) Matrice temps-position et (b) exemple d'un signal temporel enregistré en $x=20\text{mm}$ 86

Figure 2-26 : Courbes de dispersion expérimentales pour l'échantillon a) $\text{Al}_{\text{DSi}}\text{E}_{100}\text{C}_{\text{N}}$ et b) $\text{Al}_{\text{D}}\text{E}_{80}\text{C}_{\text{N}}$88

Figure 2-27 : Superposition des courbes de dispersion expérimentales de l'échantillon $\text{Al}_{\text{DSi}}\text{E}_{100}\text{C}_{\text{N}}$ aux courbes de dispersion numériques des ondes de Lamb (•) pour $\alpha=\beta=1$88

Figure 2-28 : Superposition des courbes de dispersion expérimentales de l'échantillon $\text{Al}_{\text{DSi}}\text{E}_{100}\text{C}_{\text{N}}$ aux courbes de dispersion numériques des ondes de Lamb (•) pour $\alpha=0.001$, $\beta=1$89

Figure 2-29 : Superposition des courbes de dispersion expérimentales obtenues avec l'échantillon $\text{Al}_{\text{DSi}}\text{E}_{100}\text{C}_{\text{RA}}$ avec les courbes de dispersion numériques dans le cas où ($\alpha=1$ et $\beta=10^{-3}$) (en rose) et dans le cas où ($\alpha=10^{-5}$ et $\beta=1$) (en blanc).....90

Figure 2-30 : Zoom sur la zone sélectionnée de la figure 2-29.....91

Figure 2-31 : Courbes de dispersion expérimentales pour l'échantillon $\text{Al}_{\text{DSi}}\text{E}_{100}\text{C}_{\text{RA}}$ comparées aux courbes de dispersion numériques du modèle aux interphases pour $\alpha=1$ et $\beta=0,001$ (courbes roses) et celle de la bicouche aluminium/époxy (courbes jaunes).92

Figure 2-32 : Superposition des courbes de dispersion expérimentales obtenues avec l'échantillon $Al_{DRA}E_{100}C_N$ avec les courbes de dispersion numériques dans le cas où $\alpha=1$ et $\beta=10^{-3}$ (en rose) et dans le cas où $\alpha=10^{-5}$ et $\beta=1$ (en blanc).....	93
Figure 2-33 : Zoom sur la zone sélectionnée de la figure 2-32.....	93
Figure 2-34 : Courbes de dispersion expérimentales pour l'échantillon $Al_{DRA}E_{100}C_N$ comparées aux courbes de dispersion numériques du modèle aux interphases pour $\alpha=0.001$ et $\beta=1$ (courbes blanches) et celle d'une monocouche d'aluminium de 4 mm d'épaisseur (courbes rouges).....	94
Figure 3-1 : Géométrie de la plaque.....	100
Figure 3-2 : Courbes de dispersion des ondes SH dans une plaque d'aluminium d'épaisseur 4mm.....	102
Figure 3-3 : Déplacements des ondes SH dans la structure.....	103
Figure 3-4 : Courbes de dispersion des ondes SH dans la structure aluminium(4mm)/époxy(0.5mm)/carbone-époxy (1.8mm) obtenues par le modèle aux interphases en vert pour $\alpha=\beta=1$ et celles obtenues par le modèle de Jones pour ($R_T=10^{15}N/m^3$) en rose.....	106
Figure 3-5 : Courbes de dispersion des ondes SH de la structure aluminium/époxy/carbone-époxy pour $\alpha=\beta=10^{-5}$ (•), courbes de dispersion théoriques d'une plaque d'aluminium de 4mm d'épaisseur (—), les courbes de dispersion d'une couche d'époxy d'épaisseur 0.5mm (—) et les courbes de dispersion d'une plaque de composite d'épaisseur 1.8mm (•).....	107
Figure 3-6 : Courbes de dispersion numériques des ondes SH issues du modèle aux interphases pour $\alpha=\beta=1$ en rose, $\alpha=\beta=0.1$ en vert, $\alpha=\beta=0.01$ en violet.....	108
Figure 3-7 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouche, à $\beta=0.1$ (en rose) (a), à $\beta=0.01$ (en vert) (b), à $\beta=0.001$ (en orange) et à $\beta=0.0001$ (en bleu) par rapport à l'adhésion parfaite obtenue pour $\alpha=\beta=1$ (en noir).....	110
Figure 3-8 : Courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouchealuminium (4mm) / époxy (0.5 mm) / carbone-époxy (1.8 mm) pour $\alpha=1$ et $\beta=0.001$ (•) superposées aux courbes de dispersion d'une bicouche aluminium (4mm)/époxy (0.5 mm) (•) et à celles d'une plaque de composite carbone-époxy (1.8 mm)(•).....	111
Figure 3-9 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouche, à $\alpha=0.1$ (en bleu) (a), à $\alpha=0.01$ (en noir) (b), à $\alpha=0.001$ (en bleu clair) et à $\alpha=0.0001$ (en vert) par rapport à l'adhésion parfaite obtenue pour $\alpha=\beta=1$ (en rose).....	112
Figure 3-10 : Courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouchealuminium (4mm)/époxy (0.5 mm)/carbone-époxy (1.8) pour $\alpha=10^{-5}$ et $\beta=1$ (•) superposées aux courbes de dispersion d'une bicouche composite (1.8 mm)/époxy (0.5 mm) (○) et à celles d'une plaque d'aluminium (4 mm) (○).....	113
Figure 3-11 : Sensibilité des modes SH se propageant le long de l'assemblage collé aluminium/époxy/carbone-époxy à la variation d'épaisseur d'aluminium de +3% en rose et de -3% en bleu par rapport à une épaisseur de référence de 4mm (en vert).....	114
Figure 3-12 : Sensibilité des modes SH se propageant le long de l'assemblage collé aluminium/époxy/carbone-époxy à la variation d'épaisseur de la plaque de composite de +5% en gris et de -5% en jaune par rapport à une épaisseur de référence de 1.8mm (en noir).....	115

Figure 3-13 : Sensibilité des modes SH se propageant le long de l'assemblage collé aluminium/époxy/carbone-époxy à la variation de +10% de l'épaisseur de la colle (en bleu), de -10% (en gris) et pour une épaisseur de référence 0.5mm (en noir).....	116
Figure 3-14 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes SH pour la tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy au paramètre C_{44} du composite à -20% (en gris) et à +20% (en bleu).....	117
Figure 3-15 : Géométrie de la structure tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy et repère utilisé dans le modèle 2D	118
Figure 3-16 : Champ de déplacement du mode SH_4 de la tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy à la fréquence 900 kHz, a) pour $\alpha=\beta=1$ et b) pour $\alpha=0.001$ et $\beta=1$	121
Figure 3-17 : a) Matrice temps-position b) superposition des courbes de dispersion pour $\alpha=\beta=1$ avec les résultats de simulation 2D.....	122
Figure 3-18 : a) Matrice temps-position b) superposition des courbes de dispersion pour $\alpha=1$ et $\beta=0.001$ (en vert) et $\alpha=\beta=1$ (en rose) avec les résultats de simulation 2D.....	123
Figure 3-19 : Géométrie de la tricouche avec défaut KB.....	124
Figure 3-20 : FFT-2D dans la partie saine (colonne gauche) et dans la partie du défaut (colonne à droite), superposition des courbes de dispersion dans la tricouche (en rose) et celles d'une monocouche d'aluminium d'épaisseur 4mm (en rouge).....	126
Figure 3-21 : FFT-2D sur les déplacements relevés sur l'interface du composite, superposition des courbes de dispersion dans la tricouche (en rose) et celles d'une bicouche composite(1.8mm)/époxy(0.5mm) (en vert).....	127
Figure 3-22 : Comparaison d'amplitude des modes générés à la fréquence 852 kHz en amont du défaut (en gris) et dans le défaut (en bleu).....	128
Figure 3-23 : Evolution de l'amplitude du mode SH_4 dans la structure tricouche en présence d'un défaut « kissing bond » sur toute la moitié de la surface côté aluminium.....	129
Figure 3-24 : FFT-2D dans la partie saine (colonne gauche) et dans la partie du défaut (colonne à droite), superposition des courbes de dispersion dans la tricouche (en rose) et celles d'une monocouche d'aluminium d'épaisseur 4mm (en vert).....	131
Figure 3-25 : Evolution de l'amplitude du mode SH_3 dans la structure tricouche en présence d'un défaut KB sur toute la moitié de la surface côté aluminium (déplacements récupérés sur la surface d'aluminium).....	132
Figure 3-26 : Evolution de l'amplitude du mode SH_3 dans la structure tricouche en présence d'un défaut KB sur toute la moitié de la surface côté aluminium (déplacements récupérés sur la surface du composite).....	132
Figure 3-27 : Résultat de la FFT-2D sur la moitié du défaut KB sur les déplacements récupérés à la surface d'aluminium (colonne de gauche), à la surface du composite (colonne de droite), superposition des courbes de dispersion de la tricouche en adhésion parfaite en rose, de la monocouche d'aluminium en vert et de la bicouche composite/époxy en bleu.	133
Figure 3-28 : Modélisation d'un défaut KB local.....	134

Figure 3-29 : Evolution de l'amplitude du mode SH₄ dans la structure tricouche en présence d'un défaut KB de taille a) 1 λ, b) 3 λ et c) 5λ.....135

Figure 3-30 : Evolution de l'amplitude du mode SH₃ dans la structure tricouche en présence d'un défaut KB de taille a) 1 λ, b) 3 λ et c) 5λ.....136

Figure 3-31 : Répartition d'énergie des modes SH₂, SH₃ et SH₄ dans la tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy à la fréquence 900 kHz.....138

Figure 3-32 : Répartition d'énergie du mode SH₄ dans la tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy à différentes fréquences.....139

Figure 3-33 : Dispositif expérimental, génération et réception avec transducteurs EMAT...140

Figure 3-34 : a) Représentation spatio-temporelle des amplitudes des signaux mesurés par les EMAT pour l'échantillon Al_{DSi}E₁₀₀C_N. b) Courbes de dispersion des ondes SH pour α=β=1 superposées à la courbe expérimentale pour Al_{DSi}E₁₀₀C_N.....141

Figure 3-35 : Reproductibilité des mesures des amplitudes du mode SH₃ à différentes fréquences pour l'échantillon de référence Al_{DSi}E₁₀₀C_N.....142

Figure 3-36 : Signal temporel de l'échantillon Al_DE₈₀C_N.....145

Figure 3-37 : Cartographie C-scan de la fenêtre G3 correspondant à l'écho de fond du composite pour l'échantillon Al_DE₈₀C_N.....146

Figure 3-38 : Cartographie C-scan de la fenêtre G3 correspondant à l'interface colle/aluminium pour l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi\frac{1}{2}DRA}E_{100}C_N$147

Figure 3-39 : Superposition d'un signal temporel pris dans la moitié dégradée (en rouge) avec un signal temporel pris dans la partie saine (en bleu).....148

Figure 3-40 : Evolution de l'atténuation du mode SH₃ en fonction de la distance parcourue pour Al_{DSi}E₁₀₀C_N en gris et pour Al_DE₈₀C_N en bleu.....149

Figure 3-41 : Comparaison de l'amplitude du mode SH₃ à la fréquence 630 kHz pour Al_{DSi}E₁₀₀C_N (en bleu) et pour Al_DE₈₀C_N Al (en gris).....150

Figure 3-42 : Evolution de l'atténuation du mode SH₃ en fonction de la distance parcourue pour l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi\frac{1}{2}DRA}E_{100}C_N$152

Figure 3-43 : Evolution de l'atténuation du mode SH₃ en fonction de la distance : a) sur la partie avec une bonne adhésion de l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi\frac{1}{2}DRA}E_{100}C_N$. b) sur la partie avec l'adhésion dégradée du même échantillon.153

Figure 3-44: Coupe à la fréquence 630 kHz du mode SH₃ pour l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi\frac{1}{2}DRA}E_{100}C_N$154

Figure 3-45: Evolution de l'atténuation du mode SH₃ en fonction de la distance parcourue pour l'échantillon KB local.155

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Caractéristiques élastiques de la plaque d'aluminium.....	47
Tableau 2-2 : Caractéristiques viscoélastiques de la plaque du composite "carbone-époxy" ..	54
Tableau 2-3 : Propriétés des matériaux.....	55
Tableau 2-4 : Propriétés élastiques des matériaux constituant la structure d'étude.....	57
Tableau 2-5 : Paramètres des interphases considérées.	61
Tableau 2-6 : Caractéristiques des couches constituant l'assemblage, utilisées pour tracer les courbes de dispersion des modes de Lamb	65
Tableau 3-7 : Description des échantillons étudiés et leurs nomenclatures	84
Tableau 2-8 : Synthèse des résultats d'identification des niveaux d'adhésion exprimés par α et β pour chaque échantillon de l'étude.....	95
Tableau 3-1:Caractéristiques des matériaux utilisées pour tracer les courbes de dispersion des modes SH.....	105
Tableau 3-2: Coefficient de transmission du mode SH ₄ à la fréquence 850 kHz.....	135
Tableau 3-3: Coefficient de transmission du mode SH ₃ à la fréquence 630 kHz.....	137
Tableau 3-4: Assemblages tricouches réalisés et nomenclature associée.....	143
Tableau 3-5 : Coefficient d'atténuation pour les échantillons Al _{DSi} E ₁₀₀ C _N et Al _D E ₈₀ C _N	150
Tableau 3-6 : Résultat de calcul du χ et k'' pour Al _{DSi} E ₁₀₀ C _N et Al _D E ₈₀ C _N	151
Tableau 3-7 : Résultat de calcul du χ et k'' pour l'échantillon Al _{$\frac{1}{2}DSi\frac{1}{2}DRA$} E ₁₀₀ C _N	154

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les assemblages de matériaux existent dans de très nombreux secteurs industriels et peuvent prendre des formes différentes. Trois grandes familles de processus d'assemblage se dégagent comme le résume la *Figure 1* : l'assemblage mécanique, l'assemblage thermique et l'assemblage physico-chimique dans lequel on retrouve le collage structural.

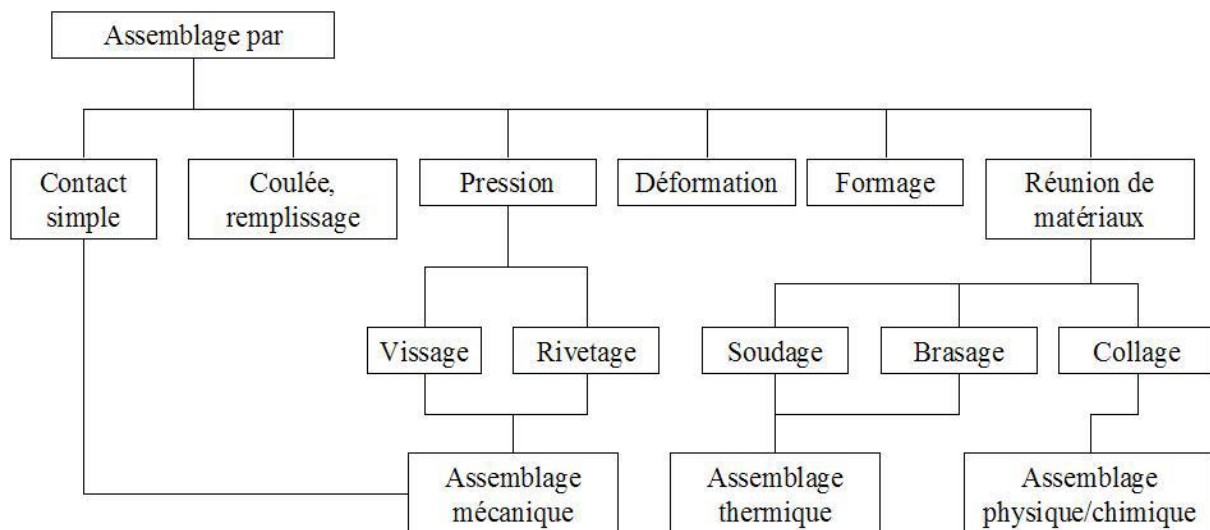


Figure 1 : Les techniques d'assemblage selon Schindell-Bidinelli (1992)[1].

Les collages structuraux intéressent de plus en plus les industriels des secteurs aéronautiques et automobiles grâce à leurs propriétés bien connues de légèreté et de répartition uniforme des contraintes sur l'ensemble de la structure collée contrairement aux techniques d'assemblage utilisées classiquement (rivetage ou boulonnage par exemple...)[2], [3]. Outre cette technique d'assemblage s'ajoute l'utilisation des matériaux composites qui a connu un essor important également dans les industries citées ci-dessus, notamment grâce à leur légèreté et robustesse. En effet les progrès réalisés dans la maîtrise de ces deux technologies complémentaires (collage structural et matériau composite) ont permis d'envisager leur utilisation dans des domaines pour lesquels de nombreux travaux de recherche et de développement sont encore en cours, comme l'aéronautique, l'automobile ou encore les énergies renouvelables (pales d'éolienne ou d'hydrolienne, par exemple).

Nous comprenons dès lors tout l'intérêt économique de ces assemblages et la nécessité de disposer de méthodes caractérisant leur fiabilité, à savoir principalement, leur niveau d'adhésion, leur tenue mécanique et leur durabilité depuis leur conception et tout au long de leur cycle de vie.

Qu'il s'agisse de caractériser la qualité d'adhésion entre deux substrats ou d'évaluer le niveau du collage aux interfaces collées en tenant compte des aspects cohésifs (nature de l'adhésif et son taux de réticulation), et adhésifs (traitements de surface aux interfaces substrat/adhésif), les techniques d'évaluation et de contrôle non destructifs (END/CND) ont prouvé leur efficacité. Parmi celles-ci, les méthodes ultrasonores d'évaluation non destructives sont largement utilisées dans ces industries (80% des tests non destructifs dans les avions menés par Airbus sont réalisés avec des ultrasons) et ont montré leur efficacité pour l'évaluation de la qualité de l'adhésion dans des structures collées. Il s'agit ici d'utiliser les ondes ultrasonores de types Lamb et SH (Shear Horizontal) comme moyen de prospection.

De nombreuses études ont été faites, en particulier au sein de notre laboratoire, sur la caractérisation acoustique ultrasonore des assemblages métal/métal par ondes de Lamb où l'aspect adhésif était particulièrement traité, notamment dans le cadre de l'ANR ISABEAU (Innovating for Structural Adhesive Bonding Evaluation and Analysis with Ultrasound) où les travaux menés par Gauthier [4] ont montré qu'il était possible de discriminer des niveaux d'adhésion différents sur des échantillons dont on connaissait au préalable les propriétés physico-chimiques [4]. Trois niveaux d'adhésion ont ainsi été mis en évidence : bon, moyen et faible. Les travaux de Siryabe [5] s'inscrivant aussi dans le cadre de ce projet, ont contribué à la caractérisation des propriétés cohésives et/ou adhésives des joints collés par l'étude du coefficient de transmission des ondes de Lamb à travers une structure sandwich tricouche métal/adhésif/métal. L'ensemble de ces études ont confirmé le fort potentiel de ces ondes à quantifier le niveau d'adhésion aux interphases de joints collés métal/métal. Quant à N. Alaoui et al [6], elle s'est intéressée plutôt à une dégradation cohésive où le film de colle a été mélangé à différents taux de graisse pour simuler une dégradation progressive de l'adhésion. Une méthode de problème inverse a été élaborée et appliquée permettant d'obtenir des constantes de raideur du modèle cohésif de Jones, décroissantes quand la quantité de graisse ajoutée à la colle augmentait. Avec le même type d'ondes, les travaux d'Elhadji [7] ont permis une détection de délaminage et de décohésion des collages, ainsi que la détection du vieillissement de structure sandwichs composite à âme en nid d'abeille, par mesure de la porosité à travers les fréquences et les largeurs des résonances. D'autres études utilisent les ondes SH comme moyen de prospection au sein d'une structure métal/adhésif/métal, en sollicitant ainsi les collages dans leur direction de faiblesse à savoir les efforts de cisaillement [8], [9]. Ces travaux ont montré la sensibilité de ce type d'ondes à la qualité d'interface et leur

capacité à détecter une épaisseur de film de colle variable. Le Crom [10] a analysé la transmission des modes de Lamb et SH sur des zones de réparations des structures métalliques par collage. Elle met en évidence le fort potentiel des modes SH_0 et SH_1 à évaluer de manière quantitative le module de cisaillement d'un joint de colle de 0.1 mm d'épaisseur, entre une plaque d'aluminium de 3 mm et un patch composite de 1.2 mm d'épaisseur. Notons au passage, que le point commun entre tous ces travaux, était de considérer des niveaux d'adhésion identiques (ou symétriques) aux deux interfaces substrat/adhésif.

Cette thèse a pour objectif l'étude de la propagation d'ondes ultrasonores dans des collages structuraux métal/matériau composite dans le but d'évaluer la qualité de l'adhésion aux interfaces. Des modélisations numériques et des expériences sur des échantillons avec des niveaux d'adhésion différents devront permettre à terme d'identifier les paramètres acoustiques les plus adéquats pour extraire l'information la plus pertinente sur l'état de l'adhésion.

Différents types de structures métal/adhésif/matériau composite seront étudiées, où les conditions d'interface seront particulièrement ciblées. Le but est d'évaluer leur niveau d'adhésion mais aussi d'identifier, dans le cas d'un collage à niveaux d'adhésion dissymétriques, l'interface la plus dégradée. Le cas des « kissing bonds » caractérisé par un contact sans adhésion et qui représente un souci majeur pour les industriels sera également traité. Le but étant de donner des indicateurs ultrasonores sur la caractérisation des collages de structures métal/matériau composite. Les méthodes expérimentales font appel aux ondes de Lamb et aux ondes SH. Des transducteurs EMAT (Electro Magnetic Acoustic Transducers) vont être utilisés aussi bien en émission qu'en réception. Ces transducteurs sans contact se distinguent par leur sélectivité d'un mode donné sur une bande de fréquence limitée et à un nombre d'onde donné. Des mesures par transducteur de contact en émission et un interféromètre laser en réception seront aussi réalisées pour l'émission-réception des ondes de Lamb. La caractérisation de ces types de collages entre métaux et composites va ainsi être analysée par le biais de différentes approches expérimentales. Un modèle prédictif aux interphases et résolu par éléments finis sous Comsol est établi. Les résultats issus de ce modèle et leur confrontation aux mesures, permettent de dégager les modes susceptibles d'extraire et de quantifier l'information sur le niveau d'adhésion dans les échantillons étudiés.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres. Dans le chapitre 1, nous présenterons une revue de littérature sans qu'elle soit exhaustive sur le collage structural et

son importance dans le domaine de l'industrie, les familles de défauts observés dans les assemblages collés et les différentes méthodes en END/CND appliquées aux collages structuraux afin de révéler la présence des défauts d'adhésion et/ou de cohésion, avec un éclairage particulier sur les méthodes ultrasonores.

Le chapitre 2 sera consacré à l'évaluation non destructive du niveau d'adhésion au sein d'un assemblage métal/adhésif/composite par ondes de Lamb. Un modèle aux interphases permettant de modéliser l'interface substrat/colle par une fine couche sera développé. Grâce à ce modèle, l'équation de dispersion sera résolue en se basant sur la méthode SAFE (Semi Analytical Finite Elements) permettant de déterminer les modes propres de vibration dans la structure étudiée. Une étude de sensibilité des modes de Lamb, à travers la représentation des courbes de dispersion, aux paramètres d'adhésion et également aux propriétés des couches constituant notre assemblage sera faite afin de pouvoir sélectionner les modes plutôt sensibles aux paramètres de collage et moins sensibles aux propriétés des matériaux. Ces modes présentent des candidats potentiels capables de nous apporter une information sur l'état de collage au sein d'un assemblage collé et seront visés expérimentalement. Un modèle 2D sous Comsol sera aussi présenté, simulant la propagation d'un mode donné, à l'image d'une étude expérimentale. Dans la suite, une étude expérimentale basée sur la technique de génération des ondes de Lamb en émission par transducteur piézoélectrique et en réception par interféromètre laser sera proposée. Cette technique nous permet une excitation de plusieurs modes de Lamb à la fois. La confrontation des résultats numériques et expérimentaux nous permet d'identifier le niveau d'adhésion propre à chacun des échantillons étudiés, et surtout de détecter l'interface dégradée (métal/colle ou composite/colle) dans le cas d'échantillon à niveaux d'adhésion dissymétriques (bon niveau sur une interface, faible niveau sur l'autre interface).

Dans le chapitre 3, nous proposons une étude similaire à celle du chapitre 2 mais en ondes SH. Nous procéderons de la même manière, une première étude numérique est réalisée pour obtenir les courbes de dispersion en ondes SH susceptibles de se propager au sein de l'assemblage en se basant sur le modèle aux interphases et la méthode SAFE. Par analogie au chapitre précédent, les modes SH les plus sensibles aux paramètres du collage sont sélectionnés. Expérimentalement, nous avons utilisé une technique basée sur les EMAT pour générer les ondes SH, l'avantage majeur de ce dispositif étant la reproductibilité des mesures (jusqu'à 99%) ce qui nous permet d'étudier un critère supplémentaire pour classifier les

INTRODUCTION GÉNÉRALE

échantillons et qui est l'atténuation des modes et leur amplitude. Des échantillons avec des kissing bonds localisés et de différentes dimensions seront étudiés dans le but de mettre en évidence leur présence et la détection de leur position dans la structure.

Enfin, il nous restera à conclure cette étude en résumant les résultats de ces travaux et en donnant quelques pistes de réflexion sur la suite de ce travail.

CHAPITRE 1

Chapitre 1 : REVUE DE LITTÉRATURE PRÉLIMINAIRE

1 Revue de littérature préliminaire

1.1 Technique d'assemblage par collage structural

Le collage structural est une alternative innovante et efficace à des procédés d'assemblages plus traditionnels comme le soudage, le rivetage ou encore le boulonnage. Il contribue de manière substantielle permanente à l'intégrité structurelle d'un produit manufacturé. C'est un procédé dans lequel deux matériaux identiques ou non sont assemblés par un adhésif de façon solide et permanente (*Figure 1-1*). Les adhésifs constituent ainsi « des jonctions » entre les surfaces des substrats à assembler.



Figure 1-1 : Schéma d'un assemblage collé.

Il y a plusieurs raisons qui incitent les industriels à se tourner vers les assemblages collés plutôt que les traditionnels. Le collage permet d'assembler des matériaux différents, durs, mous, flexibles ou fragiles. Il permet également d'améliorer l'apparence et surtout d'alléger des structures grâce à la suppression des éléments tels que les vis et boulons par exemple. Il garantit une meilleure répartition des efforts sur l'ensemble de la structure et permet d'amortir les vibrations à haute fréquence[11](cf *Figure 1-2*).

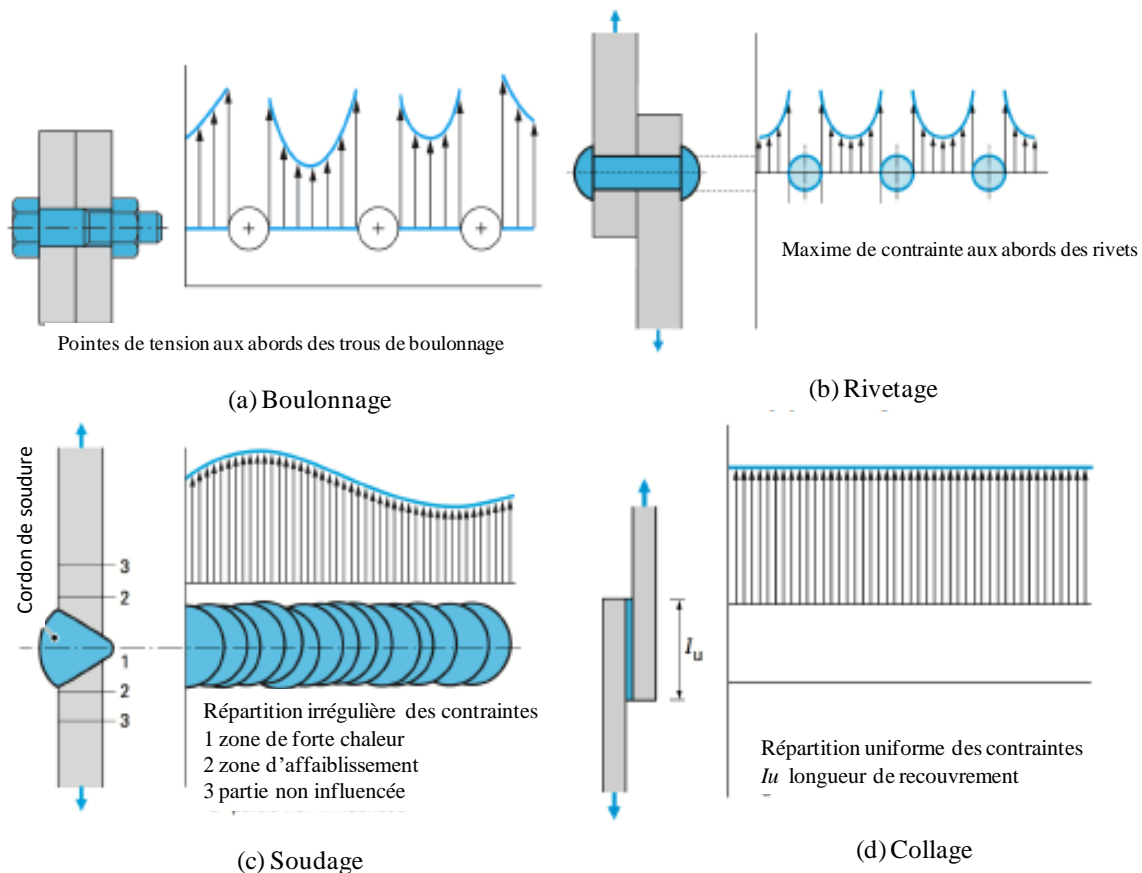


Figure 1-2 : Comparaison de méthodes d'assemblages structuraux selon la distribution des contraintes de cisaillements [2].

Cependant, le collage a des inconvénients aussi. D'une part, il faut veiller à la bonne préparation des surfaces des substrats à assembler. En effet, il est habituellement nécessaire de traiter les surfaces des substrats à encoller, via des traitements mécaniques et/ou chimiques ce qui est une opération coûteuse mais indispensable. D'autre part, le choix même de l'adhésif est important. Ce dernier doit généralement être sélectionné en fonction de l'application envisagée, de la nature des substrats à assembler, de ses caractéristiques de mouillabilité et de la durée de la solidification [12]. Cependant, cette technologie est encore relativement récente et l'évaluation systématique de la tenue mécanique des assemblages collés est absolument nécessaire via les essais mécaniques destructifs.

1.2 Familles de défauts de collage

Grâce aux essais mécaniques réalisés sur les assemblages collés, dont on peut citer ceux de traction, cisaillements, de pelage et en flexion 3 points, deux familles de rupture de collage ont été observées et classées comme suit :

1.2.1. Défauts cohésifs

On appelle défaut cohésif un défaut susceptible d'être localisé dans la couche de l'adhésif, comme par exemple des porosités ou des bulles d'air piégées dans la colle. Une réticulation incomplète de l'adhésif peut également provoquer un défaut cohésif. En effet, la réticulation est un phénomène chimique qui dépend des conditions environnantes, notamment la température. Plus le taux de réticulation de l'adhésif est élevé, plus la mobilité des chaînes moléculaires est réduite, ce qui permet à l'adhésif une meilleure cohésion. D'autres paramètres peuvent causer une faible cohésion d'après l'étude de Bikerman [13] comme la présence de substances (additifs du polymère ou impuretés du métal) ou encore de l'air au niveau de l'interphase, dû à la rugosité importante du substrat ou à une mouillabilité médiocre entre l'adhésif et le substrat.

1.2.2. Défauts adhésifs

Les défauts adhésifs se situent au niveau de l'interface entre l'adhésif et le substrat. On en distingue trois types :

- **Les décollements** qui peuvent avoir lieu à cause d'une mauvaise répartition de la colle pendant l'assemblage ou encore de la présence des impuretés comme de la graisse sur la surface des substrats à encoller, mais aussi d'une dégradation environnementale (humidité, infiltration d'eau) [14]. Afin d'éviter ce type de défauts, un nettoyage minutieux des surfaces des substrats est essentiel, permettant ainsi d'éliminer toutes les impuretés telles que les matières grasses et les poussières [13].

- **Une faible adhésion**

Elle peut être synonyme d'une liaison faible entre la colle et le substrat sans nécessairement provoquer un décollement. Ceci est souvent causé par la présence d'un polluant à la surface de l'adhérent ou d'un mauvais traitement de surface.

1.2.3. Kissing bond

Bien que les défauts cités plus haut aient une signification précise, la nature réelle des défauts de type kissing bond n'est pas bien établie et plusieurs définitions sont données dans la littérature[15]–[19]. Par contre, elles ne sont pas toujours cohérentes et peuvent même mener à des confusions.

Adams et al. [20] le définissent comme un contact sans adhésion, certains auteurs le classent parmi les défauts de faible adhésion[19], [20], alors que d'autres [16] le considèrent comme un contact parfait entre deux surfaces sans transmission de contraintes de cisaillement. Marty et al[23]énumèrent dans leur étude trois critères expérimentaux pour qualifier un kissing bond. En premier lieu, la contrainte de rupture doit être inférieure à 20 % de la contrainte de rupture nominale en cas d'adhésion parfaite pendant un test de pelage, en second lieu, la rupture est purement adhésive et en troisième lieu, la prospection de la structure par des ondes ultrasonores longitudinales ne détecte pas la présence d'un défaut au niveau des interphases. Najib et al [24] a étudié l'effet du kissing bond modélisé par des éléments de contact sur le comportement dynamique non-linéaire des structures avec un joint adhésif flexible, et a démontré que la zone du défaut kissing bond entraîne une distorsion harmonique. Il a défini ainsi, des indicateurs de dommage non linéaire capables d'identifier l'effet du kissing bond dans les joints adhésif.

1.3 Les méthodes de contrôle et d'évaluation non destructives du collage

Comment assurer la sûreté des structures collées dans les domaines du transport et de l'industrie ? Un défaut de collage pouvant avoir des conséquences sérieuses, plusieurs techniques de contrôle non destructif ont été élaborées et contribuent à prévenir ces défauts. Nous présentons ci-dessous un récapitulatif non exhaustif des méthodes les plus courantes.

1.3.1. Ressuage

Le *contrôle par ressuage* est une des méthodes non destructives les plus prisées dans le monde industriel. En effet, c'est une méthode très simple à mettre en œuvre et peu coûteuse utilisée pour faire apparaître les défauts superficiels débouchant comme les fissures à la surface de tous les matériaux non poreux. Sur une surface préalablement nettoyée, on applique un liquide mouillant et coloré afin qu'il pénètre par capillarité dans le défaut, après quelques minutes, on élimine l'excédent du liquide. Ensuite, toute la surface ainsi traitée est recouverte d'un révélateur qui va provoquer le ressuage du liquide coloré retenu dans les défauts, ces derniers sont alors révélés et localisés. Le *ressuage* permet de détecter les fissures, les éclats, la porosité, les piqûres, etc... sur des pièces à différents stades de la fabrication, lors de la préparation au soudage et lors du soudage. Le *ressuage* permet de détecter la fatigue du métal (fissures de fatigue,...), les piqûres, etc...sur des installations en service. Parmi ses avantages : sa haute sensibilité de détecter des défauts ainsi que son pouvoir de les localiser et les dimensionner.

1.3.2. Radiographie

Le *contrôle radiographique* est une technique utilisant des rayons de hautes énergies qui peuvent traverser certains matériaux et créer une imagerie indispensable au diagnostic et

au traitement[25], [26]. Ce contrôle est réalisé, soit à l'aide d'une source radioactive Y, soit par un poste émetteur de rayon X. Son principe est de faire traverser un matériau par un faisceau électromagnétique X ou Y et récupérer en sortant une image 3D qui traduit l'absorption subie par un rayonnement ayant traversé la structure [27]. Cette technique permet de détecter des défauts de compacité (internes) souvent très fins (fissures, soufflures, inclusions, manque de liaison, manque de fusion, etc...) en se basant sur la quantité de rayonnement transmise. Plus concrètement, la présence d'un défaut qui correspond en général à un manque de matière va engendrer une faible absorption et donc une forte intensité sur l'image récupérée.

Des études récentes employant cette technique de radiographie ont montré son efficacité pour caractériser et évaluer la qualité de collage à condition que les substrats n'aient pas une absorption trop élevée. En effet, elle a permis de localiser les défauts superposés en profondeur, ce qui représente une nouveauté dans ce domaine [28]–[30]. Jama et al [31] ont montré qu'il est possible d'observer des variations d'épaisseur du film de colle (en mesurant le taux de comptage des photons) et de détecter des décollements dans des assemblages aluminium/colle/composite à partir de la mesure du spectre d'énergie des photons diffusés. Dans tous les cas, les fortes contraintes d'utilisation en matière de sécurité limitent le recours à cette technique.

1.3.3. La thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique de maintenance conditionnelle qui s'installe durablement sur le marché des CND grâce à l'amélioration de la résolution des caméras infrarouges et au développement des méthodes efficaces de traitement d'image [32]. Aujourd'hui, son utilisation est normalisée (norme ASTM E2582-07 par exemple). Elle permet d'assurer un contrôle global rapide et sans contact aussi bien sur des matériaux métalliques que des composites.

On distingue deux types de thermographie infrarouge : la thermographie passive, dans laquelle la structure à contrôler génère elle-même de la chaleur, utilisée pour la surveillance des structures comme les installations électriques ou thermiques des bâtiments, et la thermographie active qui nécessite une stimulation thermique extérieure. Pour des applications de CND/END, notamment celles dédiées aux assemblages collés, les structures à contrôler ne générant pas elles-mêmes de la chaleur, c'est la thermographie active qui est généralement utilisée.

Le principe général de la thermographie est basé sur la collecte des radiations thermiques émises par les objets et à mesurer le flux thermique qui est diffusé à l'aide d'une caméra infrarouge, afin de le restituer sous forme d'une image colorée qui représente une carte de température à différents instants, à partir de la scène thermique observée dans le domaine infrarouge. L'image ainsi obtenue s'appelle « thermogramme ».

Les applications de la *thermographie infrarouge* sont nombreuses et très variées. Pour le CND des assemblage collés, de nombreux travaux existent [33]–[35], notamment les travaux de Genest et al [36] qui ont détecté des décollements réels ou simulés par insert de téflon aux interfaces d'une structure collée aluminium/colle/composite. Ou encore les travaux de Johnson et al [37] qui propose une approche de thermographie basée sur l'analyse des contraintes thermoélastiques et qui permet de détecter l'initiation des fissures ainsi que de suivre leur progression dans les joints collés composites à simple recouvrement. Il montre que cette technique permet d'obtenir des informations sur l'étendue des dommages dans la structure.

Cette technique a été utilisée également pour infiltrations de liquides aux interfaces collées, et localiser les défauts internes (trous d'air, porosités, inclusions, etc...) à travers l'établissement d'une cartographie en température. La capacité de détection dépend toutefois de la taille du défaut, de sa profondeur et des propriétés thermiques du matériau.

1.3.4. Courants de Foucault

Cette méthode de contrôle non destructif consiste à créer dans des matériaux conducteurs électriques des courants induits par un champ magnétique variable au moyen d'un capteur. Ces courants induits sont appelés courants de Foucault. Ils circulent localement dans le matériau et leur distribution dépend du champ magnétique d'excitation, de la géométrie de la pièce et de sa conductivité électrique ainsi que du lift-off (distance entre la bobine et la pièce à contrôler). En présence d'une anomalie, leurs déplacements vont être perturbés ce qui va entraîner une variation de l'impédance apparente sur le capteur. L'analyse de cette variation d'impédance peut indiquer l'emplacement du défaut ainsi que sa nature. Les avantages de cette méthode sont nombreux, à savoir qu'elle est très facile à mettre en œuvre et très rapide pour réaliser des contrôles. Elle permet de localiser et dimensionner les défauts. En revanche, elle ne peut être appliquée que sur des matériaux conducteurs, et détecter que des défauts à faible profondeur. A noter également que c'est une technique assez coûteuse.

Des travaux comme ceux de Mercier et al [38] ont exploité le signal de courants de Foucault comme une nouvelle alternative pour l'estimation de la profondeur de décarburation des aciers lors des traitements thermiques. L'analyse des résultats obtenus a permis de relier la décomposition harmonique du signal courant de Foucault à la durée du traitement thermique, à la profondeur totale de décarburation et, par conséquent, les propriétés mécaniques. Helifa et al[39] ont exploité cette méthode en vue d'une caractérisation complète des fissures débouchantes présentes dans des pièces critiques de matériaux conducteurs en utilisant des bobines connues et des pièces étalons comportant des fissures bien identifiées, ce qui permet la détermination de la morphologie de la fissure débouchante : position, forme et dimensions.

1.3.5. Les ultrasons

Afin de contrôler les assemblages collés, les techniques de contrôle par ultrasons sont les plus utilisées aujourd'hui [40]–[44]. Leur principe est basé sur l'émission et la propagation d'une onde ultrasonore de fréquences élevées (0.5-10 MHz) dans le volume de la structure à inspecter. Les types d'ondes ultrasonores souvent utilisés en CND sont les ondes de volume (longitudinales et transversales), les ondes de surface de type Rayleigh par exemple et les ondes guidées (Lamb ou SH). Les ondes de volume sont utilisées seulement pour réaliser des contrôles localisés de la structure [45]. En revanche, l'utilisation des ondes guidées permet une inspection sur un large volume de la structure, grâce à leur capacité de se propager sur plusieurs dizaines de longueurs d'onde, toujours guidées par les parois de la structure d'une part et du fait de leur faible atténuation géométrique d'autre part.

L'utilisation des ondes guidées en CND, dans le cas d'un assemblage collé, a fait l'objet de plusieurs études numériques [46], [47]. Ces études ont montré que certains modes sont plus sensibles que d'autres aux propriétés de l'adhésif et/ou du substrat. De façon générale, deux types de modèles sont utilisés pour caractériser le niveau d'adhésion des assemblages substrat/colle/substrat : *le modèle rhéologique de Jones aux interfaces* et *le modèle aux interphases*.

Le premier permet d'étudier la qualité d'adhésion au niveau des interfaces collées. On en distingue deux types :

- *Le modèle de Jones adhésif* présenté à la *Figure 1-3* qui permet de modéliser l'interface substrat/adhésif par une distribution de ressorts (un travaillant en cisaillement pour les ondes SH et deux pour les ondes de Lamb dont un travaillant en cisaillement et l'autre en compression) [48], [49]. Les ressorts sont caractérisés par une constante de raideur transversale et/ou longitudinale, indicatives de la qualité d'adhésion. Dans la littérature, l'adhésion parfaite est obtenue théoriquement lorsque cette constante tend vers l'infini, et le délaminage total est obtenu pour une valeur théoriquement nulle. Camille et al[49] ont utilisé ce modèle adhésif en ondes de Lamb dans le cas des assemblages métal/colle/métal ayant des niveaux d'adhésion différents.

Grace à ce modèle, une valeur de constantes de raideur pour chaque échantillon a été attribuée en distinguant trois niveaux d'adhésion : bon, moyen et faible. D'autres travaux basés sur le même modèle en ondes SH ont concerné une structure tricouche où les substrats sont en aluminium [50] pour étudier une dégradation adhésive. L'étude montre que l'observation d'une propagation simultanée de deux modes dont les courbes de dispersion sont proches peut être un indicateur de la qualité du couplage entre les substrats.

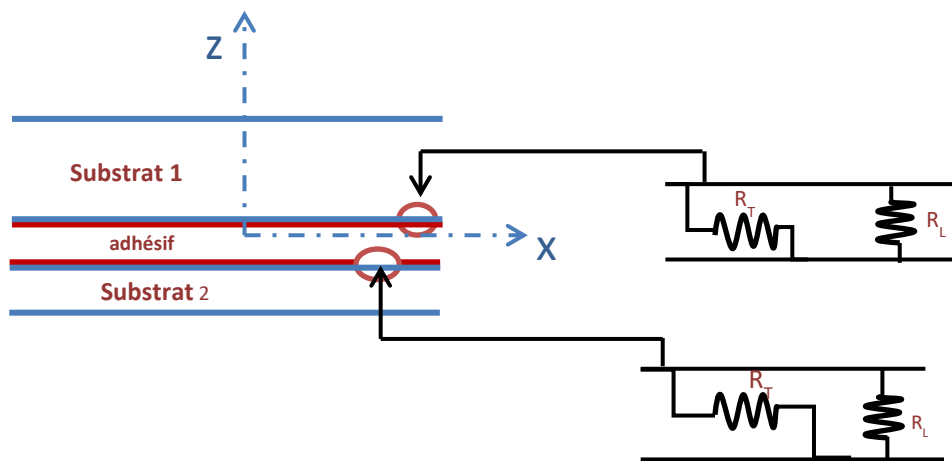


Figure 1-3 : Géométrie du modèle rhéologique de Jones adhésif (pour Lamb).

Dans le modèle de Jones cohésif, la couche de colle est remplacée totalement par deux distributions de ressorts en ondes de Lamb (cf. Figure 1-4) et une seule pour les ondes SH. Dans le cas d'un collage parfait, la valeur des constantes de raideur des ressorts est infinie et en cas d'un délaminage total, elle correspond à une valeur nulle. Pour les deux types de modèles rhéologiques de Jones, les conditions aux interfaces sont exprimées par un saut de déplacements comme définies par Jones et Whittier [51]. De Barros [42] a utilisé ce modèle de Jones cohésif, dans le cas d'un assemblage de deux métaux identiques. Il décrit ainsi l'interaction des ondes de Lamb et ondes SH en fonction des constantes de raideur et montre que seuls les modes SH antisymétriques varient alors que tous les modes de Lamb sont systématiquement modifiés. Dans le cas

d'un problème inverse, Ismaili [6] utilise ce même modèle pour travailler avec les ondes de Lamb sur la qualité cohésive d'un assemblage composé de deux substrats d'aluminium. Elle montre ainsi que les valeurs de raideurs des deux ressorts décroissent au fur et à mesure que la qualité de l'adhésif est dégradée progressivement par ajout de graisse. De plus, les constantes de raideur des deux ressorts sont du même ordre de grandeur.

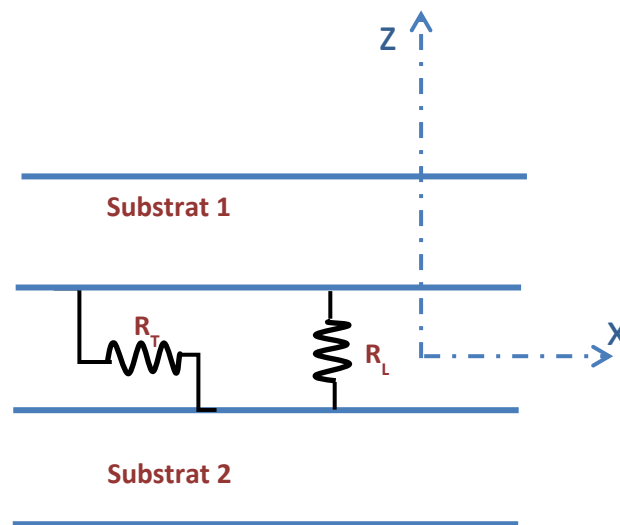


Figure 1-4 : Géométrie du modèle rhéologique de Jones cohésif (pour Lamb).

Le deuxième *modèle aux interphases* consiste à représenter l'interface par une très fine couche entre le substrat et l'adhésif et caractérisant la zone où il y a interaction entre le substrat et l'adhésif. Cette couche appelée « interphase » possède donc une dimension géométrique à l'inverse du modèle aux interfaces de Jones. Ces interphases sont mises en évidence par des variations de propriétés physico-chimiques [52] et des variations de propriétés mécaniques [53]. Autrement dit, la structure tricouche sera modélisée par cinq couches comme le montre la *Figure 1-5*.



Figure 1-5 : Géométrie du modèle rhéologique aux interphases.

L'épaisseur de cette interphase, de façon générale assez faible de l'ordre de quelques micromètres, dépend de la nature du substrat [54], [55] et des traitements de surface appliqués avant collage [52]. Il est possible de considérer cette interphase comme un milieu isotrope et homogène [56]–[58] ce qui peut être une bonne approximation aux vues des longueurs d'onde souvent utilisées. Cependant, d'autres approches existent considérant cette interphase comme un milieu composite. Kinloch [59] a observé une interphase nommée micro-composite avec des propriétés mécaniques graduelles entre celles du substrat et celles de l'adhésif. L'aspect viscoélastique de l'interphase peut être négligé devant la viscoélasticité de l'adhésif [60] et de ce fait, l'interphase est considérée comme élastique. Ce modèle permet *a priori* de distinguer un défaut adhésif d'un défaut cohésif. Une faiblesse inter-faciale peut alors être simulée par des modules d'élasticité des couches minces (les interphases) plus faibles alors qu'une cohésion faible (réticulation imparfaite par exemple) sera simulée par une chute des modules de viscoélasticité de la couche adhésive.

Plusieurs techniques expérimentales permettant la génération des ondes guidées ont été développées. La méthode de pitch-catch dont le principe consiste à positionner deux transducteurs de part et d'autre de la structure à inspecter, l'un en émission et l'autre en réception. L'ensemble des signaux temporels récupérés à différentes positions se présente sous forme d'une image appelée B-scan. Cette méthode a été utilisée par Santos [40] pour détecter des ondes de Lamb à 1 MHz au sein des assemblages collés à simple recouvrement, constitués de plaques en aluminium. Ses études ont montré la présence de trous au niveau de

la couche d'adhésif et ont déterminé leurs dimensions. Marks et al. [61] ont étudié l'interaction des ondes de Lamb à l'aide de la vibrométrie 3D sur un assemblage collé avec un défaut de décollement réalisé à l'aide d'un morceau de téflon. Comparé à un assemblage sain, ils ont pu remonter à la taille et à la forme du défaut grâce à la détermination de l'endroit où l'énergie des ondes de Lamb a été réfléchi, atténuée et transmise en fonction de la fréquence étudiée.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir introduit quelques définitions relatives au collage structural et indiqué ses nombreux avantages mais aussi ses inconvénients, nous avons effectué un état de l'art de quelques méthodes END/CND existantes appliquées aux assemblages collés. Les limites d'application de chaque méthode ont été répertoriées. Nous nous sommes particulièrement attardés sur les méthodes ultrasonores, sujets de ce travail de thèse.

Dans la suite de ce manuscrit et pour répondre aux problématiques posées dans l'introduction de ce document, nous allons utiliser aussi bien les ondes guidées de type Lamb dans le chapitre 2 que les ondes guidées de types SH dans le chapitre 3 comme moyens de prospection, étant donné leur potentiel à caractériser des structures collées. L'objectif sera de caractériser des niveaux d'adhésion dissymétriques et des collages avec des défauts de type kissing bond.

CHAPITRE 2

Chapitre 2 : Evaluation des niveaux d'adhésion dans une tricouche métal/époxy/matériau composite par ondes de Lamb

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous rappelons dans un premier temps les bases théoriques et les principales propriétés concernant les ondes de Lamb se propageant dans un milieu élastique homogène isotrope puis dans un milieu anisotrope [62]–[64]. Ensuite, et dans le but d'étudier et d'évaluer les différents niveaux d'adhésion dans une structure tricoche métal/adhésif/matériau composite, nous avons développé un nouveau modèle numérique aux interphases inspiré par le modèle à cinq couches utilisé dans la littérature [18], [65], [66]. Des améliorations sont été apportées à ce dernier concernant les propriétés mécaniques et géométriques des interphases en tenant compte de la nature du substrat ainsi que de son état de surface.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du modèle rhéologique aux interphases. Ce modèle permettra de prédire les courbes de dispersion des ondes de Lamb se propageant dans la structure tricoche, par résolution de l'équation caractéristique numériquement par la méthode des éléments finis sous *Comsol Multiphysics*®5.1. Des études de sensibilité des modes de Lamb seront effectuées, dans l'objectif d'identifier les modes les plus aptes à rendre compte des propriétés mécaniques des interphases.

La dernière partie sera consacrée à l'étude expérimentale qui aura pour objectif de générer les modes sensibles prédits par le modèle numérique, et de comparer les courbes de dispersion expérimentales aux courbes numériques afin de dégager le niveau d'adhésion de l'échantillon considéré.

Nous allons étudier des assemblages où les propriétés de l'interphase substrat/colle seront modifiées par des traitements de surface variés et contrastés. L'objectif est de pouvoir estimer leur niveau d'adhésion. Nous proposons une méthode d'évaluation non destructive par ondes guidées de Lamb nous permettant de tracer dans un premier temps les courbes de dispersion expérimentales pour les différents échantillons. L'objectif est ensuite de déterminer les courbes de dispersion numériques qui se superposent le mieux aux courbes

expérimentales, permettant ainsi de quantifier et de classer les différents échantillons selon leur niveau d'adhésion.

2 Rappels théoriques sur les ondes de Lamb

2.1 Milieu élastique, homogène et isotrope

Dans un solide élastique infini, il existe deux types d'onde : une onde longitudinale ou de compression pour laquelle le déplacement des particules est parallèle à la direction de propagation, et une onde transversale ou de cisaillement pour laquelle le déplacement des particules est perpendiculaire à la direction de propagation. Les ondes de Lamb, ou ondes de plaque, sont des ondes guidées par les parois de la structure. Elles résultent de la combinaison entre ondes longitudinale et transversale dans le milieu considéré. Cette combinaison a lieu à des fréquences particulières, appelées fréquences de résonance : l'énergie reste localisée dans la plaque et une onde guidée par les surfaces du guide plan se propage. L'onde de Rayleigh est un cas particulier d'une onde de Lamb dans le cas d'un milieu semi-infini : c'est une onde de surface avec un déplacement localisé à la surface du guide, et une décroissance exponentielle dans l'épaisseur de celui-ci.

Les ondes de Lamb, découvertes par Sir H. Lamb en 1889 [63], [67] sont des ondes se propageant dans une plaque plane d'épaisseur finie. Elles sont susceptibles de se propager sur des distances pouvant atteindre plusieurs dizaines de longueurs d'onde suivant la nature des matériaux et en fonction de la fréquence. Deux types d'ondes de Lamb existent: symétriques et antisymétriques, suivant que les surfaces vibrent respectivement de façon symétrique ou antisymétrique par rapport au plan médian. Une représentation de la déformée de la surface de la plaque pour les ondes symétriques est donnée sur la *Figure.2-1.a*. Dans ce cas, les composantes longitudinales (selon l'axe des x , dans la direction de propagation) du déplacement u_x sont égales, alors que les composantes transversales u_z (selon l'axe des z , dans la direction de la section du guide) sont opposées de part et d'autre du plan médian. Le plan médian est un plan de symétrie, qui est par conséquent immobile dans la direction de l'axe

des z . Les particules de cet axe médian sont animées d'une vibration longitudinale, dans la direction de propagation. Les déplacements vérifient alors:

$$\begin{aligned} u_x(-z) &= u_x(z) \\ u_z(-z) &= u_z(z) \end{aligned} \quad 2.1$$

A l'inverse, pour les ondes de Lamb de type antisymétriques, dont la déformée de la surface de la plaque est illustrée sur la *Figure.2-1.b*, la composante u_x change de signe contrairement à la composante u_z de part et d'autre du plan médian. Par conséquent le plan médian est mobile dans la direction de l'axe des z , ses particules sont animées d'un mouvement transversal. Les déplacements vérifient alors:

$$\begin{aligned} u_x(-z) &= -u_x(z) \\ u_z(-z) &= u_z(z) \end{aligned} \quad 2.2$$

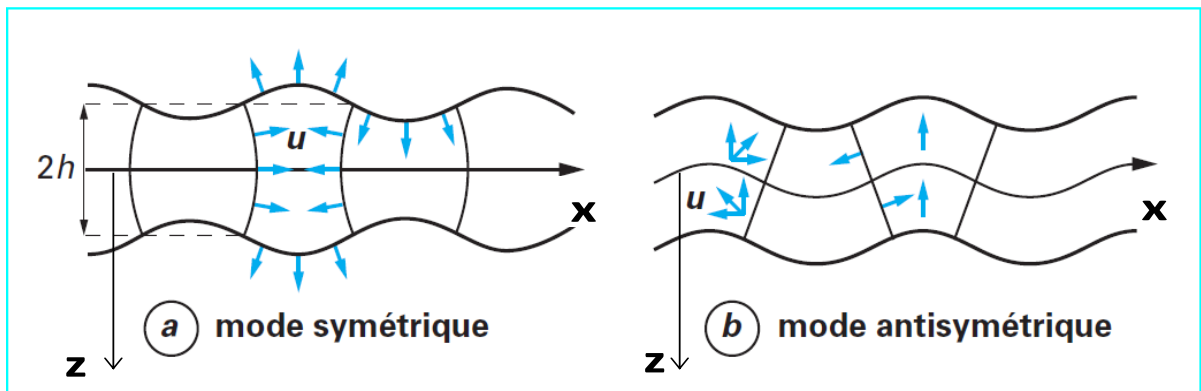


Figure.2-1 : Déformée de la plaque pour les modes symétriques (a) et antisymétriques (b).

2.2 Théorie des ondes élastiques

Nous allons nous intéresser dans cette partie à la propagation des ondes guidées dans des milieux homogènes, isotropes et élastiques. Nous nous intéresserons ensuite aux cas des ondes de Lamb dans une plaque.

Un solide élastique reprend sa forme initiale quand toutes les charges qui lui sont appliquées sont retirées. Toute contrainte appliquée à un solide élastique, isotrope et homogène, provoque une déformation et inversement.

Dans l'hypothèse de faibles déformations, la relation tensorielle liant les contraintes et les déformations est linéaire :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{avec } (i, j, k) = 1, 2, 3 \text{ (loi de Hooke)} \quad 2.3$$

Où σ_{ij} représente les composantes du tenseur des contraintes σ d'ordre 2 du matériau, C_{ijkl} représente les composantes du tenseur des constantes élastiques C d'ordre 4 du matériau et ε_{kl} représente les composantes du tenseur des déformations ε d'ordre 2.

Dans le cas d'un solide élastique isotrope, les composantes C_{ijkl} peuvent s'exprimer en fonction des coefficients de Lamé λ et μ :

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad 2.4$$

δ_{ij} est le symbole de Kronecker tel que: $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$ et $\delta_{ij} = 1$ si $i = j$.

En substituant l'équation (2.4) dans (2.3), la loi de Hooke:

$$\sigma_{ij} = \lambda \Delta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad 2.5$$

Où $\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ représente la dilatation volumique.

En prenant $j=i$ dans (2.5), on obtient les contraintes normales telles que :

$$\sigma_{ii} = \lambda \Delta \delta_{ii} + 2\mu \varepsilon_{ii} \quad 2.6$$

Et si $i \neq j$, on obtient les contraintes tangentielles données par:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \quad 2.7$$

Les déformations ε_{ij} peuvent s'écrire en fonction des déplacements :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad 2.8$$

On considère : $x_1 = x$, $x_2 = y$ et $x_3 = z$.

Le tenseur des déformations est symétrique donc (2.8) devient :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad 2.9$$

Par conséquent, la loi de Hooke dans le cas isotrope s'écrit :

$$\sigma_{ii} = \lambda \text{div}(\vec{u}) + 2\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad 2.10$$

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{pour } i \neq j \quad 2.11$$

Dans le cas d'un milieu homogène, isotrope et élastique, le champ de déplacement \vec{u} doit vérifier la loi de bilan de quantité de mouvement (en utilisant la règle de sommation des indices d'Einstein) :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad 2.12$$

Ainsi (2.10), (2.11) et (2.12) nous donnent :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}(\vec{u})) - \mu \overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{u})) \quad 2.13$$

D'après le théorème de décomposition de Helmholtz, le champ de déplacement \vec{u} dérive d'un potentiel scalaire φ et d'un potentiel vecteur $\vec{\Psi}$. Ainsi, dans un solide isotrope, le déplacement apparaît comme la somme d'un vecteur sans divergence et d'un vecteur irrotationnel.

$$\vec{u} = \overrightarrow{\text{grad}}\varphi + \overrightarrow{\text{rot}}\vec{\Psi} \quad 2.14$$

En reportant l'équation (2.14) dans (2.13), on obtient alors deux équations de propagation d'ondes découplées :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - C_L^2 \Delta \varphi = 0 \\ \frac{\partial^2 \vec{\Psi}}{\partial t^2} - C_T^2 \Delta \vec{\Psi} = 0 \end{cases} \quad 2.15$$

Avec :

$$\begin{cases} C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} & \text{vitesse longitudinale} \\ C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} & \text{vitesse transversale} \end{cases} \quad 2.15$$

φ correspond à la propagation d'onde longitudinale à la vitesse C_L et traduit la déformation liée à la dilatation.

$\vec{\Psi}$ correspond à la propagation d'onde transversale à la vitesse C_T et traduit la déformation liée au cisaillement.

2.3 Ondes de Lamb dans une plaque plane dans le vide

On considère une plaque plane élastique, homogène et isotrope, placée dans le vide, et dont la configuration géométrique est donnée sur la Figure 2-2. On note \vec{K}_L le vecteur d'onde

de l'onde longitudinale (de composante K_{Lx} et K_{Lz}) et \vec{K}_T le vecteur d'onde de l'onde transversale (de composantes K_{Tx} et K_{Tz}). La recherche d'une onde guidée se propageant dans la direction de l'axe des x impose que tous les vecteurs d'onde possèdent la même projection selon l'axe des x, soit : $K_{Lx} = K_{Tx} = K_x$. On a alors :

$$\begin{cases} K_L^2 = \left(\frac{\omega}{C_L}\right)^2 = K_x^2 + K_{Lz}^2 \\ K_T^2 = \left(\frac{\omega}{C_T}\right)^2 = K_x^2 + K_{Tz}^2 \end{cases} \quad 2.17$$

Les solutions générales des équations d'onde longitudinale et transversale peuvent s'écrire en régime harmonique sous la forme :

$$\varphi = [A_L \cos(K_{Lz}z) + B_L \sin(K_{Lz}z)] \exp(i(K_x x - \omega t)) = \varphi_a + \psi_s \quad 2.18$$

$$\psi = [A_T \cos(K_{Tz}z) + B_T \sin(K_{Tz}z)] \exp(i(K_x x - \omega t)) = \varphi_s + \psi_a \quad 2.19$$

Où φ_s et ψ_s sont les parties symétriques des potentiels par rapport à la variable z, φ_a et ψ_a les parties antisymétriques.

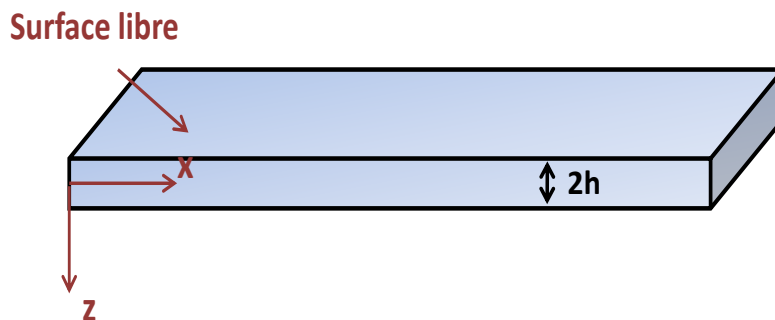


Figure 2-2 : Géométrie de la plaque et système d'axes utilisé.

Les ondes doivent respecter les conditions de surface libre, soit des contraintes nulles aux surfaces [68]:

$$\begin{aligned}\sigma_{xz} &= 0 & \text{à } z &= \pm h \\ \sigma_{zz} &= 0 & \text{à } z &= \pm h\end{aligned}\tag{2.20}$$

Avec

$$\begin{aligned}\sigma_{zz} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \lambda \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2\mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \\ \sigma_{xz} &= \mu \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \lambda \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + 2\mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} \right)\end{aligned}\tag{2.21}$$

On a donc quatre équations à quatre inconnues A_L , B_L , A_T et B_T qui, en tenant compte de la décomposition (2.20) et (2.21), se ramènent à deux sous-systèmes, un pour les modes symétriques et un autre pour les modes antisymétriques.

Cas des modes symétriques :

Le 1^{er} sous-système noté (S) pour les modes symétriques obtenu est :

$$\begin{pmatrix} -2iK_x K_{Lz} \sin(K_{Lz} h) & (K_T^2 - 2K_x^2) \sin(K_{Tz} h) \\ -(K_T^2 - 2K_x^2) \cos(K_{Lz} h) & 2iK_x K_{Lz} \cos(K_{Tz} h) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_L \\ B_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\tag{2.22}$$

Ce système admet une solution non triviale si son déterminant est nul. L'équation de dispersion des ondes symétriques, est donnée par l'annulation du déterminant du système (S) :
Det (S) = 0, soit

$$4K_x^2 K_{Tz} K_{Lz} \cot(K_{Tz} h) + (2K_x^2 - K_T^2)^2 \cot(K_{Lz} h) = 0\tag{2.23}$$

Les solutions $K_x(\omega)$ de cette équation correspondent à des ondes guidées dans la couche, appelées modes de Lamb symétriques et notés S, caractérisés par une déformée de la plaque comme nous l'avons illustrée sur *la Figure (2-1.a)*.

Cas des modes antisymétriques :

Le 2^{ème} sous-système noté (A) pour les modes antisymétriques est :

$$\begin{pmatrix} -2iK_x K_{Lz} \cos(K_{Lz}h) & (K_T^2 - 2K_x^2) \cos(K_{Tz}h) \\ (K_T^2 - 2K_x^2) \sin(K_{Lz}h) & -2iK_x K_{Tz} \sin(K_{Tz}h) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_L \\ A_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad 2.24$$

On procède de la même manière que pour les des modes symétriques. Pour que ce sous-système admette une solution non triviale, il faut que le déterminant correspondant soit nul.

L'équation caractéristique des modes de Lamb antisymétriques, $\text{Det}(A) = 0$, soit

$$4K_x^2 K_{Tz} K_{Lz} \tan(K_{Tz}h) + (2K_x^2 - k_T^2)^2 \tan(K_{Lz}h) = 0 \quad 2.25$$

Les modes correspondants sont notés avec un indice A, et dont la déformée a déjà été illustrée sur la *Figure 2.1.b*. Des exemples des courbes de dispersion en nombre d'onde des premiers modes de Lamb pour une plaque d'aluminium sont donnés sur la *Figure 2-3*.

Les paramètres élastiques des plaques sont donnés dans le tableau ci-dessous. Les courbes des modes symétriques sont notées « S », celles des modes antisymétriques « A ».

Matériau	ρ (Kg/m ³)	C_L (m/s)	C_T (m/s)	Epaisseur (mm)
aluminium	2800	6380	3100	4

Tableau 2-1 : Caractéristiques élastiques de la plaque d'aluminium.

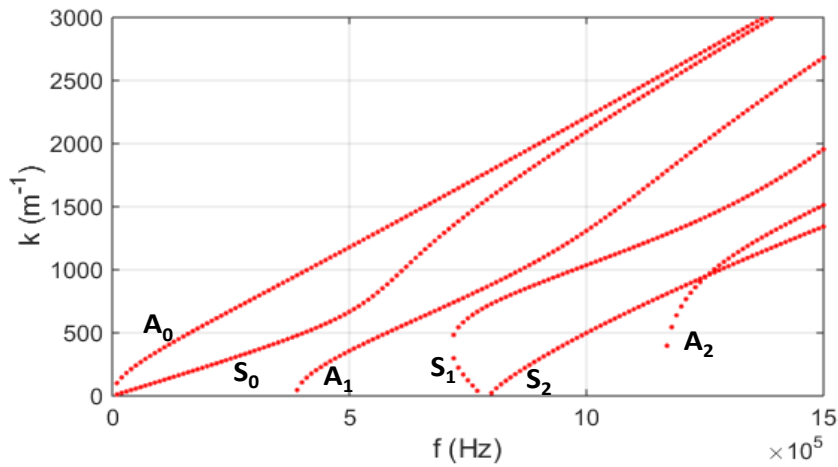


Figure 2-3 : Courbes de dispersion des ondes de Lamb dans une plaque d'aluminium d'épaisseur 4mm.

2.4 Ondes de Lamb dans une plaque plane anisotrope

Dans le cas d'un matériau anisotrope, tels les matériaux composites intervenant dans les assemblages collés objets de cette thèse, l'obtention de ces équations devient plus compliquée, particulièrement lorsque l'onde guidée se propage hors d'un plan principal. Si le guide est constitué de plusieurs couches, il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes matricielles [69]–[72] ou numériques [73]–[77] pour trouver les nombres d'onde, les champs de déplacements et de contraintes des modes de Lamb.

Dans cette partie, nous présentons le calcul permettant d'obtenir ces courbes de dispersion dans un matériau anisotrope élastique dont la matrice des constantes élastiques s'écrit en utilisant les indices contractés :

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \quad 2.26$$

Cette matrice des rigidités C permet de relier les champs de déformation ε aux contraintes σ par la loi de Hooke généralisée (expression tensorielle) :

$$\sigma = C.\varepsilon. \quad 2.27$$

L'équation du mouvement résulte de l'application du principe fondamental de la dynamique en négligeant les forces d'inertie et de pesanteur et avec ρ la masse volumique du matériau par :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad 2.28$$

En tenant en compte de la loi de Hooke en fonction des déplacements :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \quad 2.29$$

L'équation de propagation se met alors sous la forme :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \quad 2.30$$

On obtient ainsi un système d'équations différentielles du second ordre. Il permet, en imposant des conditions aux limites, de calculer les vitesses de phase des ondes de Lamb en annulant les contraintes aux frontières de la plaque placée dans le vide.

L'étude de la propagation d'ondes de Lamb dans des structures anisotropes est complexe et des auteurs comme Nayfeh et Rose y ont grandement contribué [64]. Nayfeh propose une méthode permettant de résoudre les équations de dispersion qu'il a établies. Comme dans le cas d'un matériau isotrope, la plaque est supposée infinie suivant les axes x et y , l'axe z étant normal à la plaque (cf *Figure 2-4*). Dans cette configuration, les ondes se propagent donc suivant l'axe x . On peut toujours se ramener à ce cas en effectuant une rotation d'axe z de la matrice de rigidité du matériau. Les ondes se propageant dans la direction x et la plaque étant infinie suivant y , les composantes du vecteur déplacement sont donc indépendantes des coordonnées suivant l'axe y .

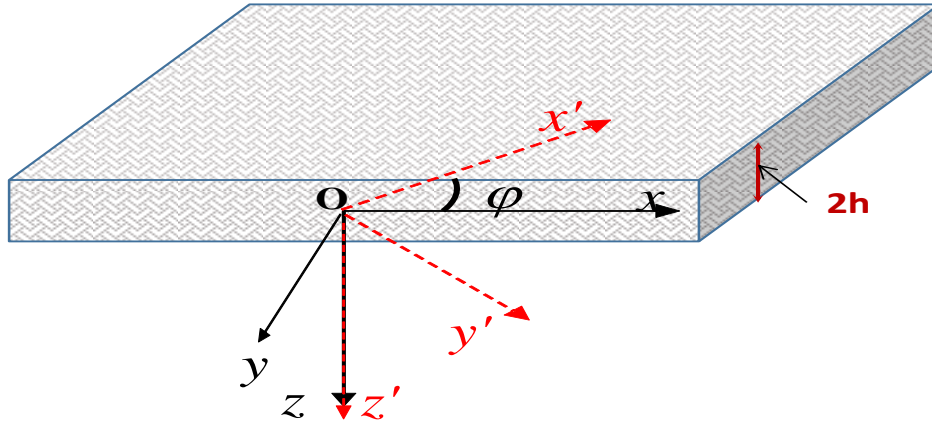


Figure 2-4 : Géométrie d'une plaque composite et système d'axes considéré.

Dans ces conditions, le vecteur déplacement particulière peut s'écrire :

$$u = Ue^{jk(x+\alpha xz-ct)} = Ue^{j(kx+qz-\omega t)} \quad 2.31$$

Avec k le nombre d'onde suivant x , $c = \frac{\omega}{k}$ la vitesse de phase et $\alpha = \frac{q}{k}$ un coefficient à déterminer, sachant que l'inconnue q est la composante du nombre d'onde suivant l'axe z .

Les équations de propagation suivant ces types de déplacements dans le cas général (système triclinique) peuvent s'écrire sous la forme d'un système de trois équations sous forme matricielle $Ku = 0$ où K est une matrice symétrique d'ordre 3 :

$$K = \begin{bmatrix} C_{11} - \rho c^2 + 2C_{15}\alpha + C_{55}\alpha^2 & C_{16} + (C_{14} + C_{36})\alpha + C_{45}\alpha^2 & C_{15} + (C_{13} + C_{35})\alpha + C_{35}\alpha^2 \\ C_{16} + (C_{14} + C_{36})\alpha + C_{45}\alpha^2 & C_{66} - \rho c^2 + 2C_{46}\alpha + C_{44}\alpha^2 & C_{56} + (C_{36} + C_{45})\alpha + C_{34}\alpha^2 \\ C_{15} + (C_{13} + C_{35})\alpha + C_{35}\alpha^2 & C_{56} + (C_{36} + C_{45})\alpha + C_{34}\alpha^2 & C_{55} - \rho c^2 + 2C_{35}\alpha + C_{33}\alpha^2 \end{bmatrix} \quad 2.32$$

On peut, en outre, écrire les éléments de la matrice K sous la forme :

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= C_{11} + 2C_{15}\alpha + C_{55}\alpha^2 - \rho c^2 \\
 K_{12} &= C_{16} + (C_{14} + C_{56})\alpha + C_{45}\alpha^2 \\
 K_{13} &= C_{15} + (C_{13} + C_{55})\alpha + C_{35}\alpha^2 \\
 K_{22} &= C_{66} + 2C_{46}\alpha + C_{44}\alpha^2 - \rho c^2 \\
 K_{23} &= C_{56} + (C_{36} + C_{45})\alpha + C_{34}\alpha^2 \\
 K_{33} &= C_{55} + 2C_{35}\alpha + C_{33}\alpha^2 - \rho c^2
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

Le système ainsi défini admet une solution non triviale si le déterminant de la matrice K s'annule. On peut alors résoudre l'équation caractéristique qui est un polynôme d'ordre 6 en α . Ainsi, pour chaque valeur de c , cette équation admet 6 racines α_r . Pour chaque racine, le système d'équation permet d'obtenir les rapports suivants :

$$V_r = \frac{U_{2r}}{U_{1r}} = \frac{K_{11}(\alpha_r)K_{23}(\alpha_r) - K_{13}(\alpha_r)K_{12}(\alpha_r)}{K_{13}(\alpha_r)K_{22}(\alpha_r) - K_{12}(\alpha_r)K_{23}(\alpha_r)} \quad \text{avec } r \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \tag{2.34}$$

$$W_r = \frac{U_{3r}}{U_{1r}} = \frac{K_{11}(\alpha_r)K_{23}(\alpha_r) - K_{12}(\alpha_r)K_{13}(\alpha_r)}{K_{12}(\alpha_r)K_{33}(\alpha_r) - K_{23}(\alpha_r)K_{13}(\alpha_r)} \quad \text{avec } r \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \tag{2.35}$$

D'après la loi de Hooke et avec l'aide du théorème de superposition, il est possible d'obtenir les valeurs des déplacements et des contraintes en fonction de ces rapports :

$$(u_1, u_2, u_3) = \sum_{r=1}^6 (1, V_r, W_r) U_{1r} e^{jk(x + \alpha_r z - ct)} \tag{2.36}$$

$$(T_{13}, T_{23}, T_{33}) = \sum_{r=1}^6 jk(D_{1r}, D_{2r}, D_{3r}) U_{1r} e^{jk(x + \alpha_r z - ct)} \tag{2.37}$$

avec :

$$D_r = \begin{bmatrix} D_{1r} \\ D_{2r} \\ D_{3r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{13} + \alpha_r C_{35} + (C_{36} + \alpha_r C_{34})V_r + (C_{35} + \alpha_r C_{33})W_r \\ C_{15} + \alpha_r C_{55} + (C_{56} + \alpha_r C_{45})V_r + (C_{55} + \alpha_r C_{35})W_r \\ C_{14} + \alpha_r C_{45} + (C_{46} + \alpha_r C_{44})V_r + (C_{45} + \alpha_r C_{34})W_r \end{bmatrix} \tag{2.38}$$

L'écriture des conditions aux limites à $z = \pm h$ permet d'obtenir deux systèmes sur les contraintes que l'on peut regrouper en un seul système sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} D_{11}E_1 & D_{12}E_2 & D_{13}E_3 & D_{14}E_4 & D_{15}E_5 & D_{16}E_6 \\ D_{21}E_1 & D_{22}E_2 & D_{23}E_3 & D_{24}E_4 & D_{25}E_5 & D_{26}E_6 \\ D_{31}E_1 & D_{32}E_2 & D_{33}E_3 & D_{34}E_4 & D_{35}E_5 & D_{36}E_6 \\ D_{11}E_1^* & D_{12}E_2^* & D_{13}E_3^* & D_{14}E_4^* & D_{15}E_5^* & D_{16}E_6^* \\ D_{21}E_1^* & D_{22}E_2^* & D_{23}E_3^* & D_{24}E_4^* & D_{25}E_5^* & D_{26}E_6^* \\ D_{31}E_1^* & D_{32}E_2^* & D_{33}E_3^* & D_{34}E_4^* & D_{35}E_5^* & D_{36}E_6^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11} \\ U_{12} \\ U_{13} \\ U_{14} \\ U_{15} \\ U_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 2.39$$

avec :

$$E_r = e^{jk\alpha_r h} \quad \text{et} \quad E_r^* = e^{-jk\alpha_r h} \quad \text{avec } r = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \quad 2.40$$

Pour les amplitudes aussi, la solution non triviale existe lorsque le déterminant de ce système est nul. C'est la condition qui permet d'obtenir les courbes de dispersion. Dans le cas général, en présence d'un matériau présentant un fort degré d'anisotropie (21 coefficients indépendants), la résolution s'avère complexe. On peut cependant effectuer le calcul sur des matériaux dont les structures cristallographiques présentent au moins une condition de symétrie.

2.5 Cas des matériaux orthotropes

Un matériau possédant trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux est dit orthotrope. Dans ce cas, dans le repère (O, x, y, z) appelé repère d'orthotropie, on constate l'annulation des constantes C_{16} , C_{26} , C_{36} et C_{45} et la matrice de rigidité ne comporte plus que 9 coefficients indépendants.

En assimilant la direction de propagation et l'axe principal (de symétrie) du matériau, la matrice de rigidité peut se mettre alors sous la forme :

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Avec ces nouvelles conditions, la matrice K devient :

$$K = \begin{bmatrix} C_{11} - \rho c^2 + C_{55}\alpha^2 & 0 & (C_{13} + C_{55})\alpha \\ 0 & C_{66} - \rho c^2 + C_{44}\alpha^2 & 0 \\ (C_{13} + C_{55})\alpha & 0 & C_{55} - \rho c^2 + C_{33}\alpha^2 \end{bmatrix} \quad 2.41$$

et les valeurs littérales des coefficients peuvent être calculées :

$$\begin{cases} \alpha_1 = -\alpha_2 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\ \alpha_3 = -\alpha_4 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\ \alpha_5 = -\alpha_6 = \sqrt{\frac{\rho c^2 - C_{66}}{C_{44}}} \end{cases} \quad 2.42$$

$$\text{avec : } \begin{cases} A = C_{33}C_{55} \\ B = C_{33}(C_{11} - \rho c^2) + C_{55}(C_{55} - \rho c^2) - (C_{13} + C_{55})^2 \\ C = (C_{11} - \rho c^2)(C_{55} - \rho c^2) \end{cases}$$

Les coefficients de D deviennent alors :

$$\begin{aligned} D_{1r} &= (C_{13} + C_{33}\alpha_r W_r) \\ D_{2r} &= C_{55}(\alpha_r + W_r) \end{aligned} \quad \text{pour } r = \{1, 2, 3, 4\} \quad \text{avec } W_r = \frac{\rho c^2 - C_{11} - C_{55}\alpha_r^2}{(C_{13} + C_{55})\alpha_r}$$

Et pour l'onde transverse : $D_{36} = -D_{35} = C_{44}\alpha_5$.

A ce stade, on peut maintenant écrire les équations caractéristiques des ondes respectivement symétriques, antisymétriques et transverses :

$$\begin{cases} D_{11}D_{23} \cotan(k\alpha_1 h) - D_{13}D_{21} \cotan(k\alpha_3 h) = 0 \\ D_{11}D_{23} \tan(k\alpha_1 h) - D_{13}D_{21} \tan(k\alpha_3 h) = 0 \\ \sin(k\alpha_5 2h) = 0 \end{cases} \quad 2.43$$

La résolution des équations de dispersion se fait numériquement grâce au logiciel *Comsol Multiphysics* pour obtenir les courbes de dispersion, en se basant sur la méthode des éléments finis. Cela fera l'objet de la partie suivante de ce manuscrit.

Un exemple de jeu de courbes de dispersion d'une plaque de composite orthotrope (carbone époxy) utilisé dans notre guide est fourni sur la *Figure 2-5*. Les paramètres élastiques du composite sont données dans le *Tableau 2-2*.

Matériau	ρ (Kg/m ³)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{66} (GPa)	Epaisseur (mm)
carbone-époxy	1800	72.31	8.55	4.87	1.8

Tableau 2-2 : Caractéristiques viscoélastiques de la plaque du composite carbone-époxy.

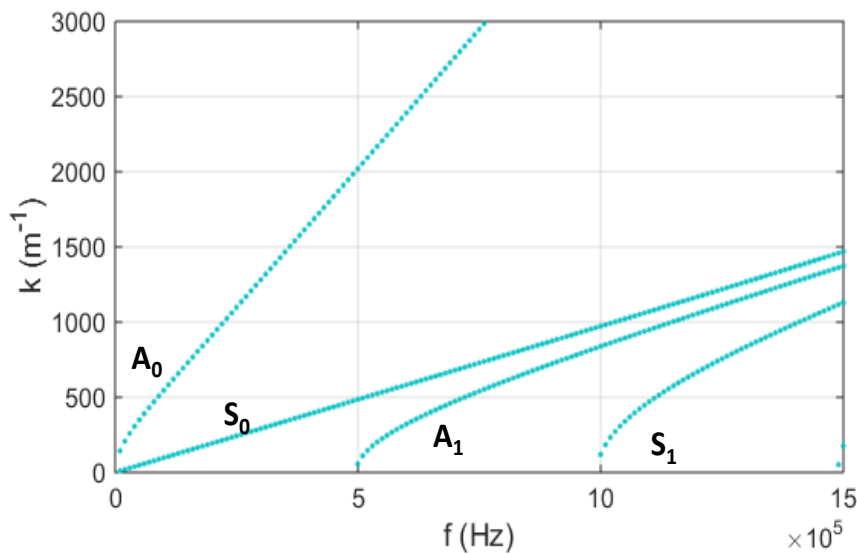


Figure 2-5 : Courbes de dispersion des ondes de Lamb dans une plaque de composite carbone-époxy d'épaisseur 1.8mm.

3 Simulation 1D de l'adhésion aux interfaces collées substrat/colle par éléments finis

Pour caractériser et contrôler la qualité de l'adhésion au niveau des interfaces substrat/colle, nous avons choisi de travailler dans le cadre d'un nouveau modèle appelé modèle aux interphases. Il s'agit d'un modèle rhéologique qui consiste à modéliser le couplage entre substrat et colle par une très fine couche sans masse. Cette partie sera consacrée à la présentation de ce modèle.

3.1. Modèle rhéologique aux interphases

3.1.1. Propriétés des matériaux de l'assemblage

Avant de commencer la description du modèle, la caractérisation des matériaux constituant notre assemblage est nécessaire pour connaître avec précision leurs paramètres qui servent de données d'entrée à ce modèle.

En ce qui concerne le substrat d'aluminium et l'adhésif, nous avons repris des résultats de caractérisation obtenus par Gauthier [4](voir *Tableau 2-3*) étant donné qu'on a utilisé les mêmes plaques d'aluminium et le même adhésif (DGEBA Diglycidyl Ether du Bisphénol A, fabriquée par Huntsman sous la référence LY 556, et en proportion équivalente un durcisseur, la Jeffamine D 230).

Matériau	ρ (kg/m ³)	C_L (m/s)	C_T (m/s)
aluminium	2800	6380	3100
époxy (TR-100%)	1100	2512	1121
époxy (TR-80%)	1100	2441	1116

Tableau 2-3 : Propriétés des matériaux.

Pour le matériau composite carbone-époxy fourni par Safran Nacelle, une caractérisation des constantes élastiques C_{ij} du composite était nécessaire. La matrice d'élasticité a été déterminée expérimentalement par la méthode de fonction de transfert par Mathieu Rénier (MCF, université de Bordeaux) de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (UMR CNRS 5295). Les résultats de cette caractérisation sont donnés ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{11}^{composite} = 72.31^{\pm 20\%} \text{ GPa} \\ C_{22}^{composite} = 69.96^{\pm 20\%} \text{ GPa} \\ C_{33}^{composite} = 16.89^{\pm 20\%} \text{ GPa} \\ C_{44}^{composite} = 4.98^{\pm 20\%} \text{ GPa} \\ C_{55}^{composite} = C_{66}^{composite} = 4.87^{\pm 20\%} \text{ GPa} \\ C_{12}^{composite} = C_{23}^{composite} = 8.55^{\pm 20\%} \text{ GPa} \end{array} \right.$$

3.1.2. Présentation du modèle

L'interphase, ou région interfaciale, est définie comme le siège principal des phénomènes physicochimiques conditionnant la tenue mécanique et la durabilité des assemblages collés. La formation d'une interphase est régie par les interactions et les réactions entre le substrat et l'adhésif. Ces interactions sont différentes d'un couple {adhésif, substrat} à un autre ce qui rend l'interphase spécifique à chaque couple.

Le collage étudié est modélisé par une structure à cinq couches (cf *Figure 2-10*). Elle est composée de deux substrats différents, une plaque d'aluminium couplée à une plaque de composite carbone-époxy via une couche d'adhésif, dont les paramètres sont rappelés dans le *Tableau 2-*. Les interphases substrat/adhésif sont modélisées par deux fines couches.

Matériau	ρ (kg/m ³)	C_{12} (GPa)	C_{11} (GPa)	C_{66} (GPa)	Epaisseur (mm)
aluminium	2800	60.15	113.97	26.91	4
époxy	1160	4.02	6.94	1.46	0.5
carbone-époxy	1700	8.55	72.31	4.87	1.8

Tableau 2-4 : Propriétés élastiques des matériaux constituant la structure d'étude.

Les propriétés de ces interphases dépendent de la nature du substrat et de l'adhésif. Leurs propriétés physico-chimiques sont différentes à la fois de celles du substrat et de l'adhésif [78]. Pour cette raison, nous avons choisi pour les interphases des propriétés intermédiaires entre les deux pour représenter le cas de l'adhésion parfaite.

L'épaisseur des interphases est liée à la rugosité naturelle des substrats à encoller. Cette rugosité sera déduite de l'épaisseur du substrat concerné de manière à ce que l'épaisseur totale de la structure reste inchangée. Le couplage entre substrat et adhésif est lié à la pénétration de l'adhésif dans les rugosités du substrat (la mouillabilité). Plus l'adhésif pénètre dans les anfractuosités et meilleure est l'adhésion, comme on peut le voir sur la Figure 2-6.

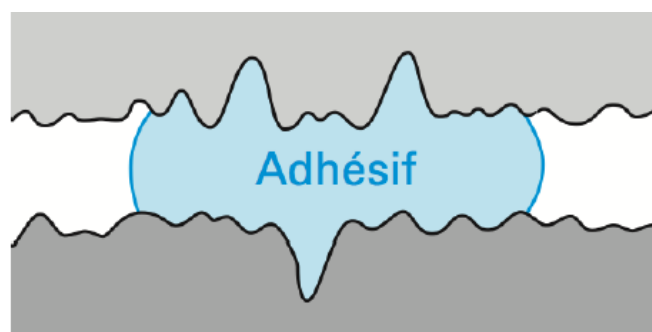


Figure 2-6: Lien entre l'adhésif et le substrat.

Un relevé de profil de surface a été réalisé sur les plaques d'aluminium et de carbone-époxy en utilisant un rugosimètre Mitutoyo® SV-1200 (cf Figure 2-7). Les deux plaques ont été analysées sur une distance de 5 cm avec une résolution d'environ 1 μm .

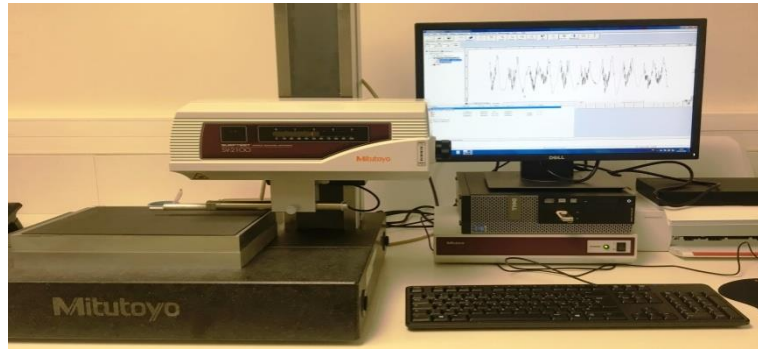


Figure 2-7 : Dispositif utilisé pour la mesure de la rugosité des plaques.

Sur les Figures 2-8 et 2-9 sont représentés un zoom sur les profils correspondants à chacune des plaques étudiées.

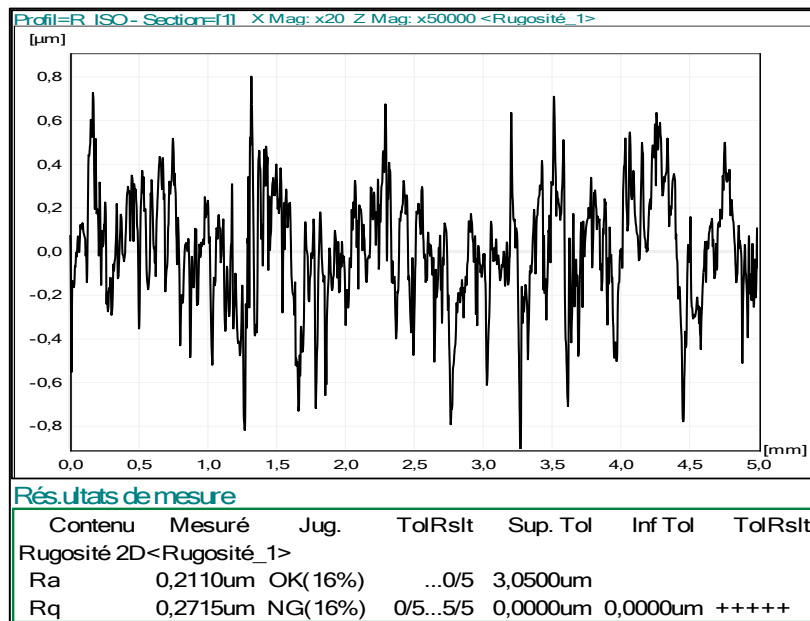


Figure 2-8: Profil de surface d'une plaque d'aluminium.

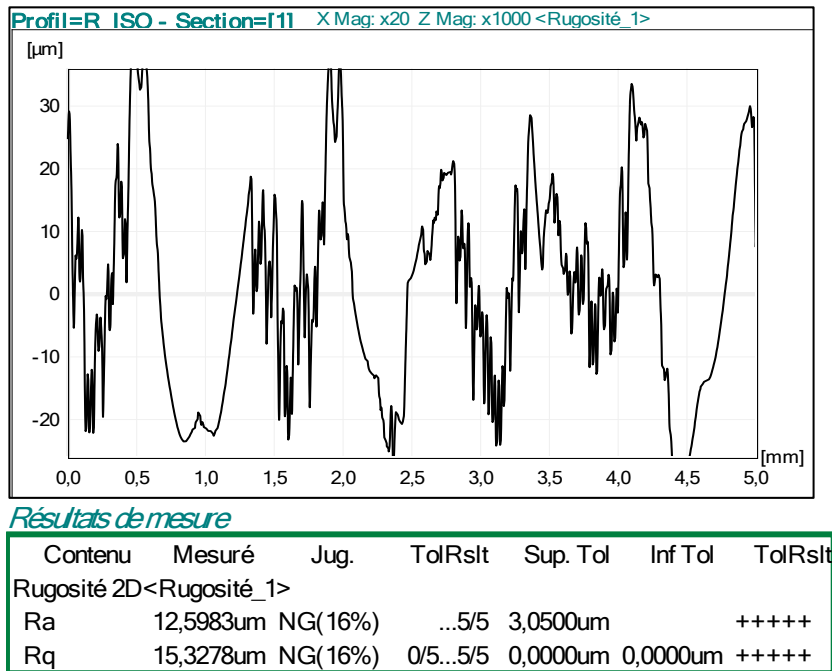
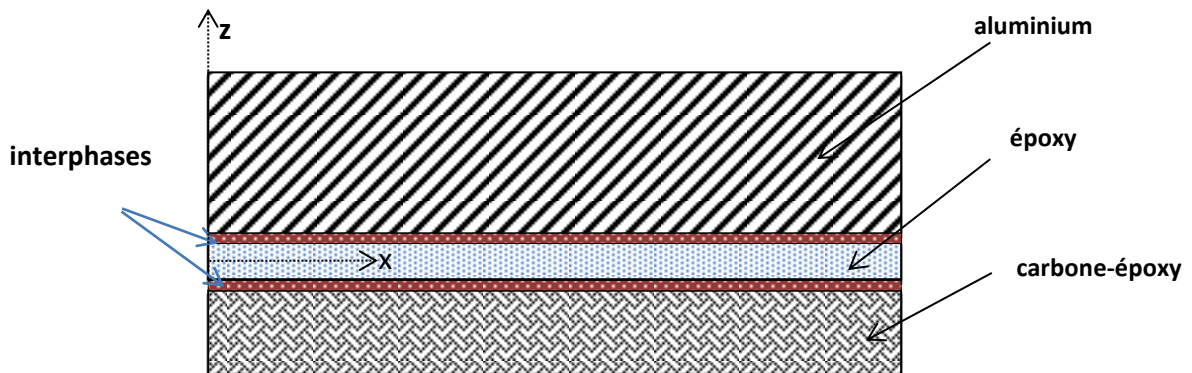


Figure 2-9 : Profil de surface d'une plaque de composite carbone-époxy.

A partir de ces relevés et la mesure de l'écart moyen quadratique du profil R_q , on peut évaluer approximativement les épaisseurs des interphases aluminium/adhésif et composite/adhésif. Les résultats sont regroupés dans le *Tableau 2-5* et notre assemblage sera modélisé comme présenté à la *Figure 2-10*.



Les interphases sont considérées comme un milieu homogène isotrope, ayant les caractéristiques d'un fluide compressible visqueux et sans masse. On peut négliger leurs effets viscoélastiques devant ceux de l'adhésif qui ne sont pas pris en compte dans ces travaux [60]. Leurs propriétés mécaniques sont données par des modules d'élasticité C_{11} et C_{66} pour l'interphase aluminium/époxy et puis C'_{11} et C'_{66} pour l'interphase composite/époxy. Dans ces modules d'élasticité interviennent ceux de l'adhésif et ceux du substrat selon :

$$\begin{cases} C_{11} = \alpha \frac{C_{11}^{\text{époxy}} + C_{11}^{\text{Aluminium}}}{2} \\ C_{66} = \alpha \frac{C_{66}^{\text{époxy}} + C_{66}^{\text{Aluminium}}}{2} \end{cases}$$

Et

$$\begin{cases} C'_{11} = \beta \frac{C_{11}^{\text{époxy}} + C_{11}^{\text{Carbone-époxy}}}{2} \\ C'_{66} = \beta \frac{C_{66}^{\text{époxy}} + C_{66}^{\text{Carbone-époxy}}}{2} \end{cases}$$

Les paramètres α et β sont une pondération des moyennes des constantes élastiques du substrat et de l'adhésif, et caractérisent respectivement le niveau d'adhésion entre la couche d'adhésif et l'aluminium et celui entre le composite et l'adhésif. Plus leur valeur est proche de 1, meilleur est le collage. Le cas de l'adhésion parfaite est obtenu pour $\alpha=\beta=1$. Le délaminage est obtenu pour des valeurs de α et β tendant vers zéro.

Le *Tableau 2-5* récapitule les paramètres liés aux interphases aluminium/époxy et époxy/composite. Ils serviront par la suite de paramètres d'entrée dans le modèle numérique.

Interphases	C ₁₁ (GPa)	C ₆₆ (GPa)	Epaisseur (μm)
aluminium/époxy	60.45	14.18	1
époxy/carbone-époxy	39.62	3.16	15

Tableau 2-5 : Paramètres des interphases considérées.

3.2. Comparaison avec le modèle adhésif de Jones

De nombreuses études ont été faites, notamment au sein de notre laboratoire, où un modèle adhésif de Jones a été utilisé pour caractériser le niveau d'adhésion dans des assemblages collés métal-métal. Dans ce modèle, les interfaces sont modélisées pour les ondes de Lamb à l'aide de distributions surfaciques de ressorts travaillant en compression et en cisaillement. Ces ressorts sont caractérisés par des constantes de raideurs longitudinale R_L et transversale R_T .

Le changement des propriétés physico-chimiques au niveau des interfaces est traduit par une réécriture des conditions aux interfaces, correspondant à un saut de déplacement tels que fournies par Jones et Whittier [51] :

$$\begin{cases} \sigma_{xz}^{Substrat} = \sigma_{xz}^{Adhésif} = R_T \left[u_x^{Adhésif} - u_x^{Substrat} \right] \\ \sigma_{zz}^{Substrat} = \sigma_{zz}^{Adhésif} = R_L \left[u_z^{Adhésif} - u_z^{Substrat} \right] \end{cases}$$

Selon ce modèle, une adhésion parfaite correspond théoriquement à des valeurs infinies des raideurs des ressorts R_L et R_T , le délaminage total à des valeurs nulles. D'un point de vue numérique, les valeurs des constantes de raideur varient entre 10^{16} N/m³ pour une adhésion parfaite et 10^8 N/m³ pour un délaminage total [4], [6], [42], [79], [80].

L'utilisation de ce modèle dans notre cas, c'est-à-dire dans le cas d'une structure tricoche antisymétrique métal/adhésif/composite en a révélé les limites. Lorsqu'on dégrade fortement la qualité de collage en mettant des valeurs faibles pour R_T et R_L , on s'aperçoit que le modèle fournit soit des solutions incorrectes pour certaines fréquences et très difficiles à expliquer physiquement, soit pas de solutions du tout. Le résultat du modèle de la structure

aluminium/époxy/composite carbone-époxy pour $R_T = R_L = 10^{10} \text{ N/m}^3$ est représenté sur la Figure 2-11.

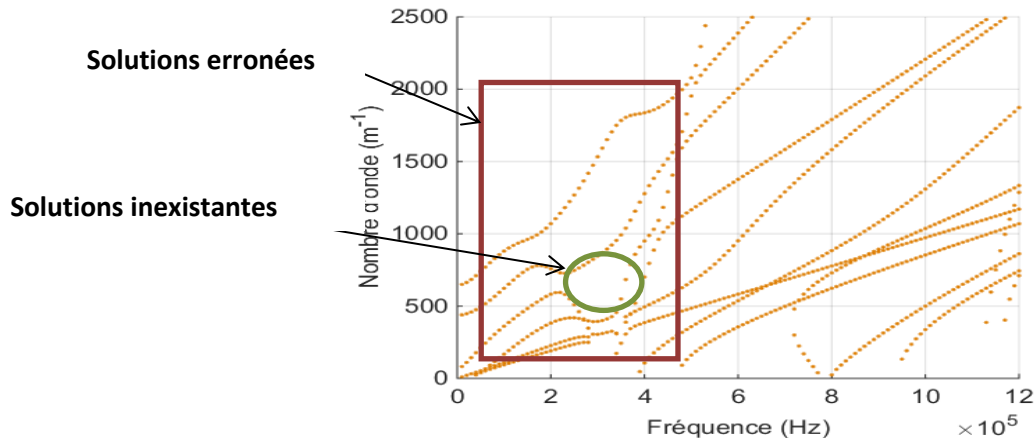


Figure 2-11 : Courbes de dispersion de la structure aluminium/époxy/ carbone-époxy pour les ondes de Lamb obtenues par le modèle de Jones pour $R_L=R_T=10^{10} \text{ N/m}^3$.

Pour ces raisons, il s'est avéré nécessaire d'utiliser un autre modèle plus adapté à notre structure, et qui pourra converger quelle que soit la condition d'interface. Dans la suite du présent travail, on adopte le modèle aux interphases déjà défini dans le paragraphe précédent.

3.3. Implémentation sous Comsol

Tout phénomène physique pourra être décrit par des équations différentielles, permettant d'approcher un problème continu par un problème discret. Plusieurs méthodes ont été développées pour la résolution de ces équations telles que les différences finies, les éléments de frontière [81] et les éléments finis. Dans ce rapport, on s'intéresse à la méthode des éléments finis. Il existe différents types d'éléments finis selon la géométrie du problème : unidimensionnelle 1D, bidimensionnelle 2D, tridimensionnelle 3D [82].

Le problème de propagation d'ondes dans une plaque est exprimé sous Comsol, par l'équation différentielle suivante:

$$\nabla \cdot (-c \nabla U - \alpha U) + \beta \cdot \nabla U + a U = k d_a U$$

Où U , c , α , β , a et d_a représentent respectivement le déplacement, le coefficient de diffusion, le coefficient de convection de flux conservatif, le coefficient de convection, le coefficient d'absorption et le coefficient de masse.

Cette équation est considérée comme équation de dispersion des ondes de Lamb avec :

$$c = \begin{pmatrix} -C_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \alpha = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -i * C_{66} \\ 0 & 0 & -i * C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\beta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & i * C_{66} \\ 0 & 0 & i * C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} \rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho\omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho\omega^2 \end{pmatrix},$$

$$d_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & C_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{66} \\ \rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho\omega^2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

C_{11} , C_{66} et C_{12} représentent les constantes de rigidité élastiques du matériau considéré.

Pour le cas des matériaux isotropes, on a :

$$C_{66} = \mu = \rho \cdot c_T^2$$

$$C_{11} = \rho \cdot c_L^2$$

$$C_{12} = C_{11} - 2 \cdot C_{66}$$

Pour le matériau composite carbone-époxy, ces hypothèses ne sont plus valables, d'où l'intérêt de caractériser ces constantes élastiques C_{ij} déjà présentés au paragraphe 3.1.1.

L'équation de propagation d'ondes sera écrite pour chaque sous-domaine de la structure, pour la plaque d'aluminium, la couche d'époxy, la plaque de composite carbone-époxy ainsi que pour les interphases substrat/colle. A ces différentes équations, s'ajoutent les conditions aux limites, l'annulation des contraintes au niveau des interfaces libres, telle que :

$$\nabla U = 0$$

- **Maillage**

Pour obtenir les courbes de dispersion de la structure tricouche étudiée, on modélise sa coupe transversale selon son épaisseur (cf *Figure 2-12*). Les déplacements correspondant aux ondes de Lamb sont portés par l'axe (Oz). Plusieurs études portant sur la simulation de la propagation d'ondes ont montré qu'il faut nécessairement avoir une taille maximale de l'élément inférieur au dixième de la plus petite longueur d'onde (soit au moins cinq fois le critère de Shannon) toutes fréquences confondues et pour tous les modes susceptibles de se propager [83], [84]. Cela implique que l'ordre de grandeur de la plus petite longueur d'onde dans le domaine d'étude doit être connu. Ainsi, la connaissance de ce dernier permet d'adapter le dimensionnement du maillage au problème considéré. Autrement dit, mieux la taille de l'élément est choisie et plus le temps de calcul est optimal.

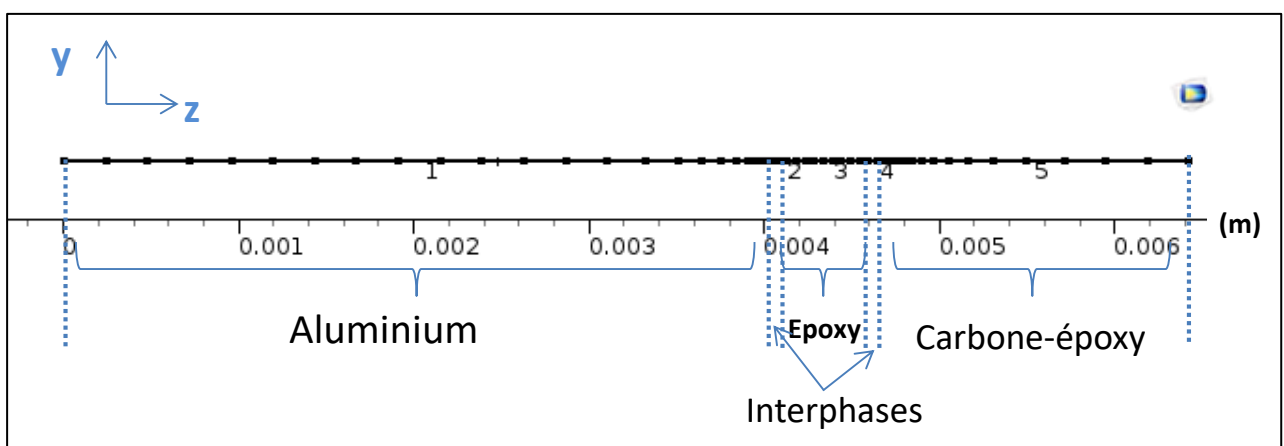


Figure 2-12 : Représentation de la coupe transversale de la structure d'étude aluminium/époxy/carbone-époxy.

3.4. Courbes de dispersion numériques

La résolution de l'équation de dispersion est obtenue par la méthode SAFE (Semi Analytical Finite Element). Il s'agit d'une résolution aux valeurs propres, permettant de déterminer pour chaque fréquence les nombres d'onde des modes de Lamb dans la structure tricoche. On s'intéresse dans cette étude aux solutions purement réelles correspondant aux modes propagatifs. Le résultat de la simulation se présente sous forme de nuage de points et est obtenu en un temps de calcul relativement court (quelques minutes). Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques des matériaux utilisés pour la résolution de l'équation de dispersion des ondes de Lamb.

Matériau	ρ (kg/m ³)	C_{12} (GPa)	C_{11} (GPa)	C_{66} (GPa)	Epaisseur (mm)
aluminium	2800	60.15	113.97	26.91	3.999
époxy	1160	4.02	6.94	1.46	0.5
carbone-époxy	1700	8.55	72.31	4.87	1.705
Interphase aluminium/époxy	--	--	60.45	14.18	10 ⁻³
Interphase époxy/carbone-époxy	--	--	39.62	3.16	15*10 ⁻³

Tableau 2-6 : Caractéristiques des couches constituant l'assemblage, utilisées pour tracer les courbes de dispersion des modes de Lamb.

A la Figure 2-13 sont présentées en vert les courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la structure tricoche aluminium/époxy/carbone-époxy obtenues par le modèle aux interphases pour $\alpha=\beta=1$. Pour valider le modèle aux interphases en Lamb, ces modes ont été comparés à ceux obtenus par le modèle à ressorts en adhésion parfaite pour une constante de raideur $R_T=R_L=10^{15}$ N/m³. Les deux jeux de courbes se superposent parfaitement, cela nous permet de valider notre modèle.

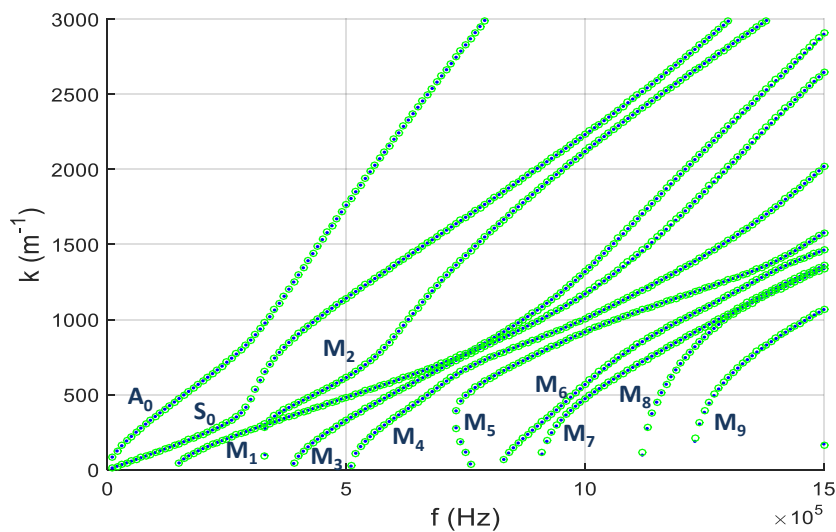


Figure 2-13: Courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la structure aluminium (4 mm)/époxy (0.5 mm)/carbone-époxy (1.8 mm) obtenues par le modèle aux interphases pour $\alpha=\beta=1$ en vert et celles obtenues par le modèle de Jones pour $R_L=R_T=10^{15}$ N/m³ en bleu.

Grâce à la représentation des vitesses de phase en fonction de la fréquence (*Figure 2-14*), on peut distinguer facilement les modes dispersifs ayant une fréquence de coupure à partir de laquelle ils peuvent se propager. C'est le cas de tous les modes sauf les modes A_0 et S_0 , seuls modes qui peuvent exister quelle que soit la fréquence. Cette figure met également en évidence les vitesses limites. On peut remarquer par exemple, qu'à hautes fréquences, la vitesse du mode A_0 tend vers la vitesse de l'onde de Rayleigh dans le composite soit 1650 m/set pour les autres modes vers la vitesse de Rayleigh dans l'aluminium soit 2800 m/s.

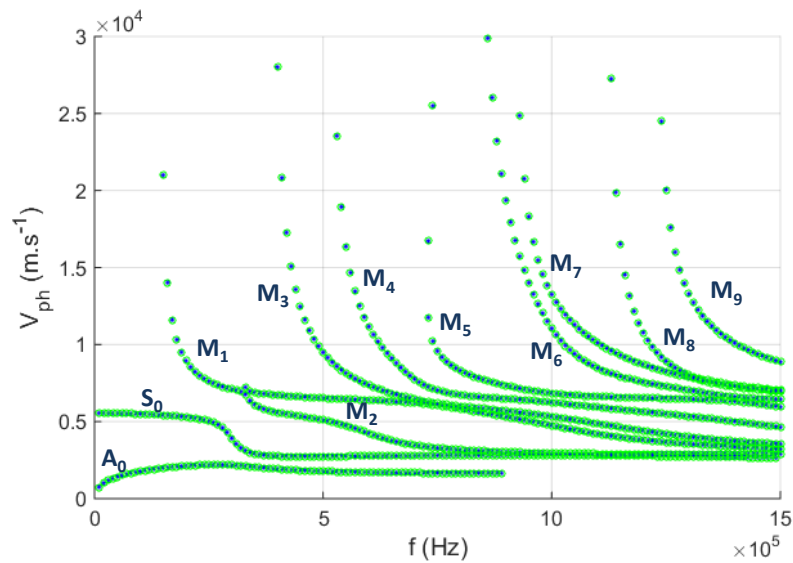


Figure 2-14 : Courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la structure aluminium (4 mm)/époxy (0.5mm)/carbone-époxy (1.8 mm) en vitesse de phase obtenues par le modèle aux interphases pour $\alpha=\beta=1$ en vert et celles obtenues par le modèle de Jones pour $R_L=R_T=10^{15} \text{ N/m}^3$ en bleu.

3.5. Sensibilité des modes de Lamb aux coefficients d'adhésion α et β

L'objectif de cette démarche est d'étudier l'effet de la variation des coefficients d'adhésion α et β sur les courbes de dispersion de la structure tricouche étudiée. Les valeurs de ces coefficients traduisent le niveau d'adhésion au sein de l'assemblage. Comme nous l'avons déjà vu dans le paragraphe 1.2, plus les valeurs de α et β tendent vers 1, meilleur est le collage. Et inversement, le délaminage de la structure est obtenu lorsque les valeurs de α et β tendent vers zéro.

On va effectuer une étude paramétrique dissymétrique en ne dégradant la qualité de l'adhésion que sur une interface et en conservant l'autre interface en adhésion parfaite.

3.5.1 Cas où $\alpha=1$ et $\beta<1$

Considérons le cas où l'adhésion aluminium/adhésif est parfaite ($\alpha=1$) et dégradons progressivement l'adhésion composite/adhésif. Les résultats sont donnés à la

Figure 2-15. A chaque fois, on compare les courbes pour un couple ($\alpha=1$ et $\beta<1$) avec les courbes correspondant à l'adhésion parfaite. Ici on constate que pour une valeur de $\beta=0.1$, les modes de Lamb sont très peu sensibles, car un décalage très faible avec les courbes du cas de l'adhésion parfaite est observé. Cette sensibilité augmente considérablement pour $\beta\leq 0.01$. En effet, en dessous de cette valeur, on observe un comportement très différent du cas de l'adhésion parfaite. Les courbes de dispersion se décalent nettement, et on peut sélectionner ainsi les modes M_2 et M_3 par exemple qui présentent une forte sensibilité (décalage pouvant être supérieur à 60% en k par rapport aux courbes de dispersion en adhésion nominale) pour les fréquences supérieures à 600 kHz. Ces modes sont de bons candidats pour qualifier la qualité de collage. Pour $\beta\leq 0.0001$, le réseau de courbes obtenu se superpose très bien à la fois aux courbes d'une bicouche aluminium (4mm d'épaisseur)/adhésif (0.5 mm d'épaisseur) et à celles d'une plaque de composite carbone-époxy de 1.8 mm d'épaisseur comme le montre la Figure 2-16. Il y a donc, pour $\beta\leq 0.0001$, un délaminage total côté composite.

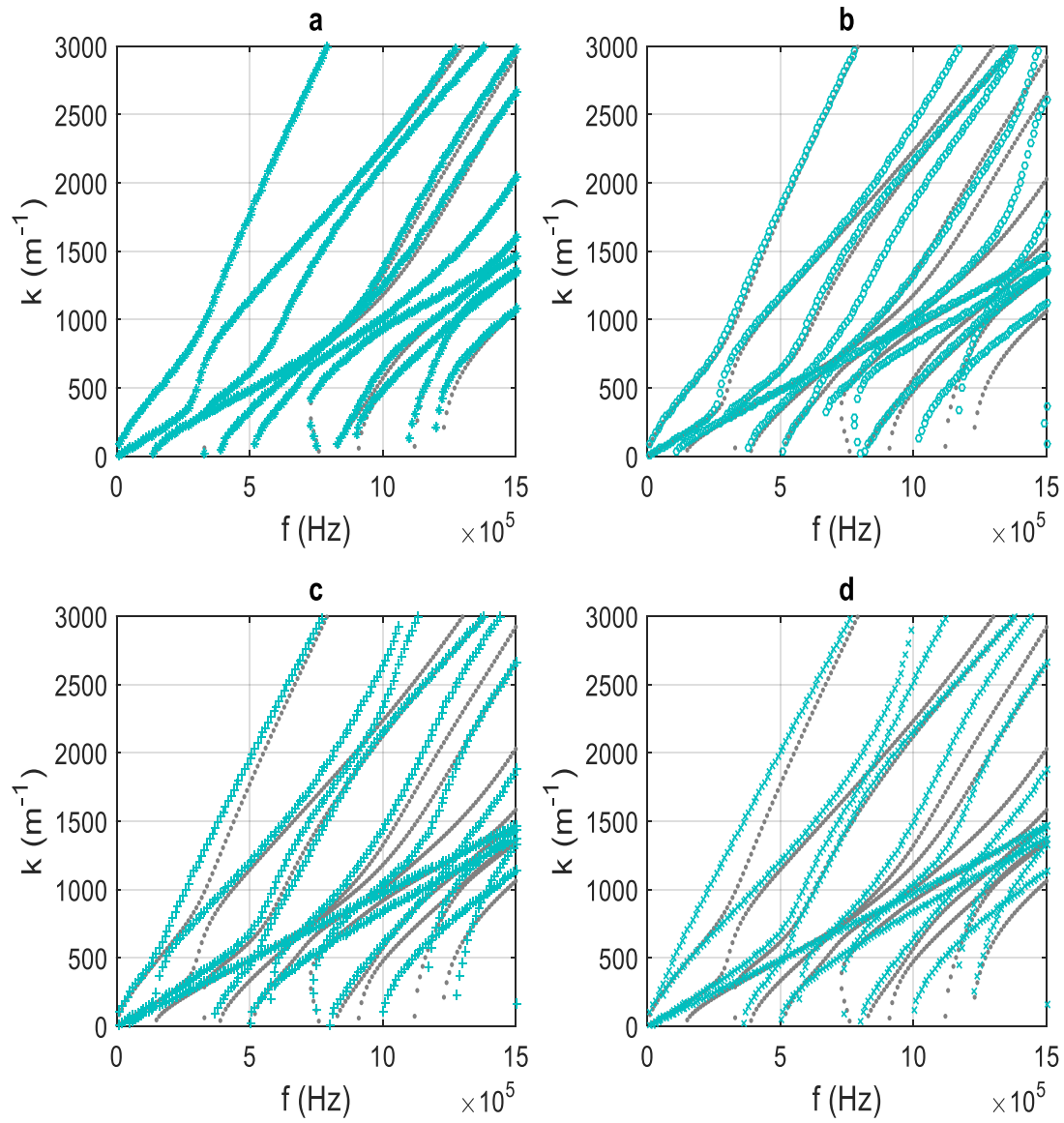


Figure 2-15 : Sensibilité des courbes de dispersion se propageant le long de la structure tricouche, à $\beta=0.1$ (*), à $\beta=0.01$ (o), à $\beta=0.001$ (+) et à $\beta=0.0001$ (x) par rapport à l'adhésion parfaite obtenue pour $\alpha=\beta=1$ (en point gris).

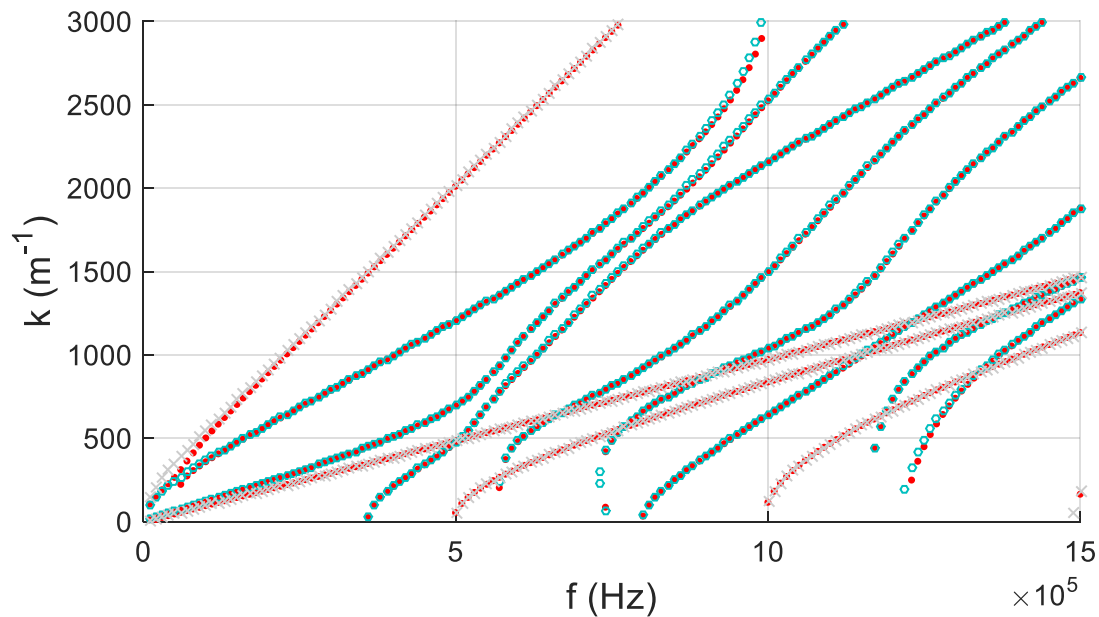


Figure 2-16 : Courbes de dispersion de la structure tricouche aluminium (4mm)/époxy (0.5 mm)/carbone-époxy (1.8 mm) pour $\alpha=1$, $\beta=0.0001$ (•) superposées aux courbes de dispersion d'une bicouche aluminium (4mm)/époxy (0.5 mm) (o) et à celles d'une plaque de composite carbone époxy (1.8mm) (+).

3.5.2 Cas où $\alpha < 1$ et $\beta = 1$

Considérons maintenant le cas où la dégradation du collage est au niveau de l'interface aluminium/adhésif, l'adhésion composite/adhésif étant considérée parfaite. Cette fois-ci, le paramètre α prend successivement les valeurs : 0.1, 0.01, 0.001 et 0.0001 tandis que β reste égale à 1. La Figure 2-17 montre le résultat de cette étude. Pour des valeurs de $\alpha \geq 0.01$, aucune sensibilité n'est observée, les courbes de dispersion se superposant à celles du cas de l'adhésion parfaite. C'est pour $\alpha \leq 0.001$ qu'un décalage significatif des courbes de dispersion pour certains modes est observé. On trouve pour $\alpha=0.001$ par exemple, la sensibilité moyenne du mode M_9 est de 37% en nombre d'onde par rapport à l'adhésion parfaite. La sensibilité moyenne du mode S_0 passe de 1% pour $\alpha=0.001$ à 29% pour $\alpha=0.0001$. On constate également que plus la fréquence est élevée, plus la sensibilité des modes au niveau de leur fréquence de coupure est importante.

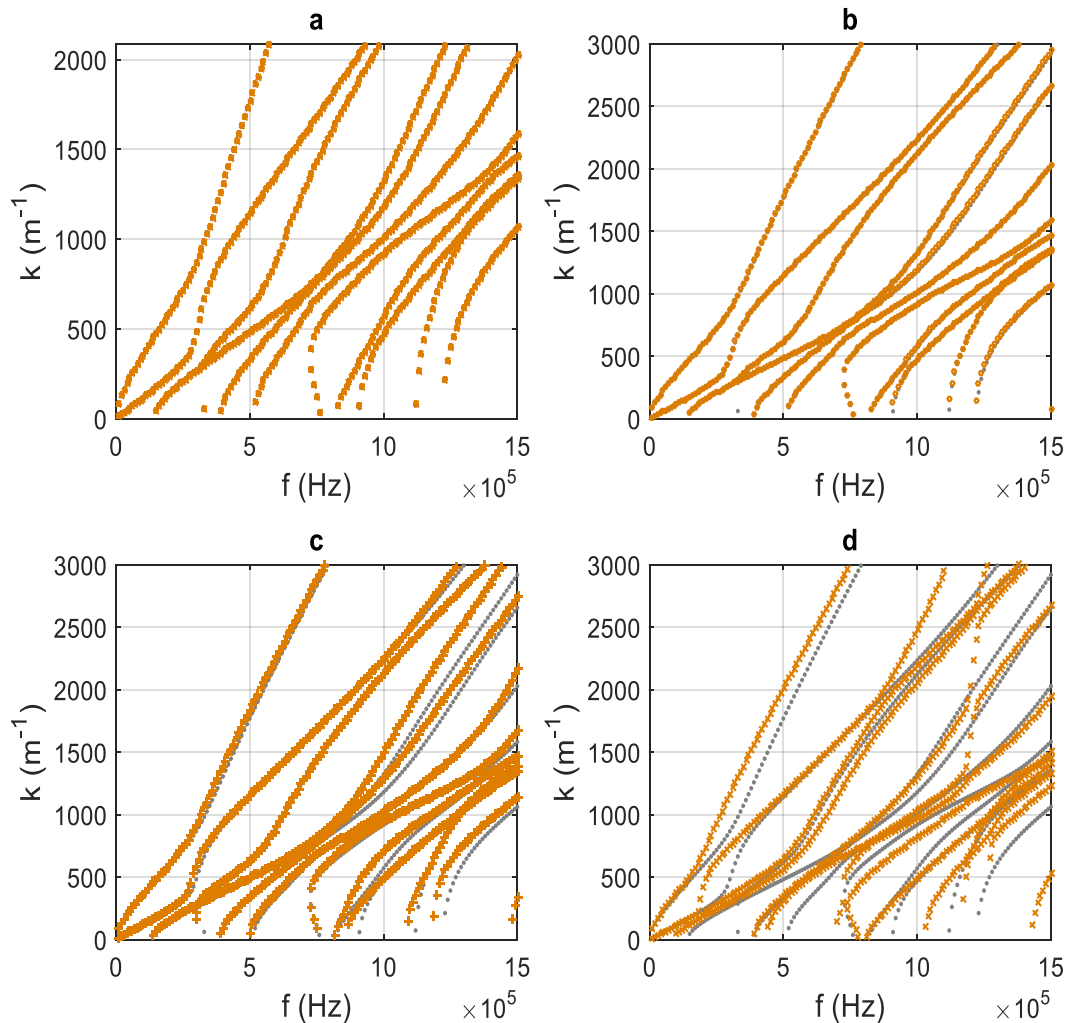


Figure 2-17 : Sensibilité des courbes de dispersion se propageant le long de la structure tricoche, pour $\alpha=0.1$ (*) (a), à $\alpha=0.01$ (o) (b), à $\alpha=0.001$ (+) (c) et à $\alpha=0.0001$ (x) (d) par rapport à l'adhésion parfaite obtenue pour $\alpha=\beta=1$ (en point gris).

Cette étude de sensibilité des modes de Lamb à la variation des paramètres α et β a mis en évidence les modes de Lamb suffisamment sensibles pour permettre de qualifier la qualité de collage dans la structure étudiée. Ce sont donc ces modes qui seront ciblés expérimentalement. Cette sensibilité dépend fortement de la fréquence, certains modes étant plus sensibles dans une bande de fréquence donnée que dans d'autres.

Cette étude a montré également que les courbes de dispersion ne se décalent pas de la même manière si on dégrade fortement une seule des deux interfaces. En effet, la sensibilité des modes de Lamb à la dégradation de la qualité du collage côté composite est plus importante que celle côté aluminium, nous avons constaté une sensibilité significative des ondes de Lamb pour des valeurs de $\beta \leq 0.01$, contrairement au côté aluminium où il faut des valeurs de $\alpha \leq 0.001$ pour observer un décalage des courbes de dispersion par rapport au cas de l'adhésion parfaite. Ceci pourrait être exploité pour identifier l'interface dégradée dans un assemblage où les niveaux d'adhésion sont dissymétriques.

Plusieurs paramètres, autres que la variation du coefficient d'adhésion, peuvent influencer les courbes de dispersion. Puisque notre objectif est de classer des niveaux d'adhésion par différenciation des courbes de dispersion, il nous faudra nous affranchir de toute influence d'autres paramètres, en particulier des épaisseurs des substrats et de leurs modules viscoélastiques. Donc, une étude de sensibilité est nécessaire afin de quantifier l'impact des variations de ces paramètres et de relever les domaines de fréquences où les courbes de dispersion ne se décalent pas ou peu, c'est-à-dire qu'elles sont insensibles ou faiblement sensibles à ces paramètres. Le paragraphe suivant est dédié à cette étude.

3.6 Sensibilité aux épaisseurs des matériaux de la structure

On étudie tout d'abord l'influence de la variation d'épaisseur des substrats constituant notre assemblage sur les courbes de dispersion, variation que nous avons pu constater par les mesures avant et après assemblage des matériaux. Les épaisseurs de chaque matériau constituant chacun des échantillons ont été mesurées à l'aide d'un comparateur. Les mesures d'épaisseurs ont indiqué un certain intervalle de variation pour chaque matériau.

Ensuite, grâce au modèle numérique, et pour étudier l'influence de la variation d'épaisseur de l'adhésif par exemple, on se place dans l'hypothèse d'une adhésion parfaite, et on trace les courbes de dispersion pour des valeurs d'épaisseurs comprises dans l'intervalle évalué par les mesures. On fait la même démarche pour chaque matériau.

3.6.1 Sensibilité à l'épaisseur de la couche de composite

Les erreurs de mesures d'épaisseur du matériau composite utilisé dans notre guide sont estimées à $\pm 5\%$. L'influence de telle variation sur les courbes de dispersion est présentée sur la *Figure 2-18*. On considère trois épaisseurs différentes du composite constituant l'assemblage ($1.8\text{mm} \pm 5\%$) telle que 1.8 mm est l'épaisseur de référence. On constate que les cinq premiers modes de Lamb sont insensibles à la variation d'épaisseur du matériau composite, ce qui en fait des candidats potentiels pour l'évaluation de la qualité de collage. La sensibilité des modes au niveau de leurs fréquences de coupure augmente avec la fréquence. En particulier, le mode M_9 présente une forte sensibilité par rapport aux autres modes. Pour quantifier sa sensibilité à cette variation d'épaisseur, l'écart en nombre d'onde Δk pour ce mode à différentes fréquences a été relevé : on calcule une variation de 20.7% en moyenne. Etant donnée la grande sensibilité de ce mode à la variation d'épaisseur du composite, ce mode ne sera pas sollicité expérimentalement.

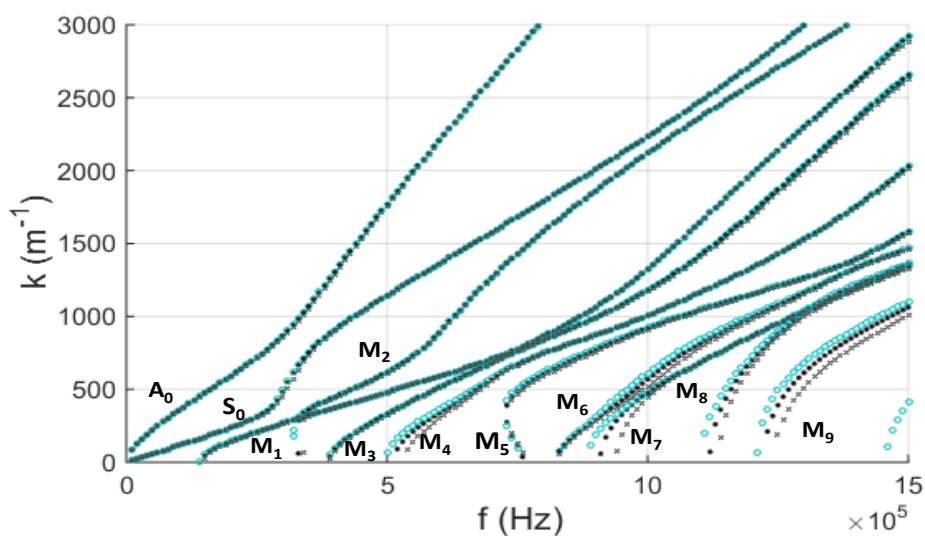


Figure 2-18 : Sensibilité des modes de Lamb dans la tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy à la variation de +5% de l'épaisseur de la couche de composite (en bleu), de -5% (en gris) et pour une épaisseur de référence de 1.8 mm (en noir).

3.6.2 Sensibilité à l'épaisseur de la couche d'aluminium

La variation d'épaisseur constatée de la couche d'aluminium a été évaluée à $\pm 3\%$ autour d'une valeur moyenne de 4 mm. L'analyse numérique des courbes de dispersion de la tricouche aluminium/époxy/composite en adhésion parfaite pour une telle variation d'épaisseur a été réalisée. Sur la *Figure 2-19* sont présentées les courbes de dispersion des modes de Lamb correspondants aux différentes valeurs d'épaisseur de l'aluminium, allant de 3.988mm à 4.012mm. Il est clair, qu'une telle variation d'épaisseur n'entraîne pas de changements notables sur le comportement des six premiers modes (variation inférieure à 1%). Les modes M_5 et M_8 semblent les plus touchés par cette variation surtout autour de leur fréquence de coupure, leur sensibilité moyenne mesurée ne dépasse pas 20%.

D'après cette analyse numérique de la sensibilité des modes de Lamb à la variation de l'épaisseur de la couche d'aluminium, nous pouvons conclure sur la nécessité d'étudier les modes à des fréquences inférieures à 700kHz sous réserve qu'ils soient sensibles aux propriétés des interphases, ou à des fréquences supérieures à 1.5 MHz à condition que leur sensibilité aux propriétés adhésives soit largement supérieure à celle des épaisseurs.

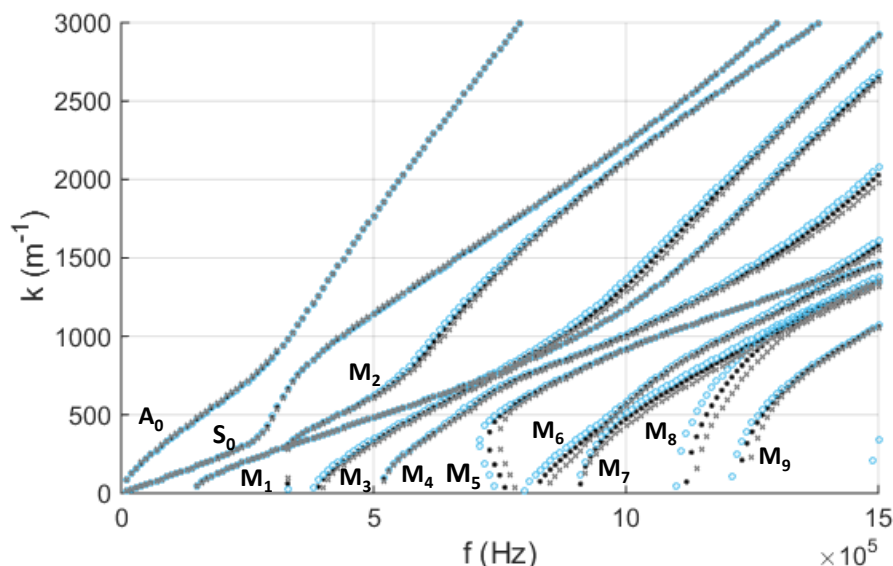


Figure 2-19 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy à la variation de +3% de l'épaisseur de la couche d'aluminium (en bleu), de -3% (en gris) et pour une épaisseur de référence 4 mm (en noir).

3.6.3 Sensibilité à l'épaisseur de la couche de colle

On peut également étudier l'effet de la variation de l'épaisseur du joint adhésif sur le comportement des modes de Lamb dans notre guide. La plage de variation d'épaisseur évaluée pour les différents échantillons que nous avons réalisés est estimée à $0.5\text{mm} \pm 10\%$. Nous avons tracé à la *Figure 2-20* les courbes de dispersion relatives à une telle variation et les avons comparées aux courbes nominales. On remarque sur cette figure l'impact significatif de telle variation d'épaisseur de la couche de colle sur les courbes de dispersion notamment en hautes fréquences où les courbes se décalent fortement par rapport aux courbes en adhésion parfaite. La sensibilité d'un tel mode dépend étroitement de la fréquence considérée. On peut constater par exemple un écart maximal de 260 m^{-1} pour le mode M_3 à la fréquence 1.2 MHz qui correspond à une variation de 15.2% par rapport au nombre d'onde du même mode à l'épaisseur de référence de 0.5 mm . Néanmoins, les modes A_0 , S_0 , M_1 , M_4 , M_5 et M_8 restent très faiblement impactés par une telle variation d'épaisseur de colle.

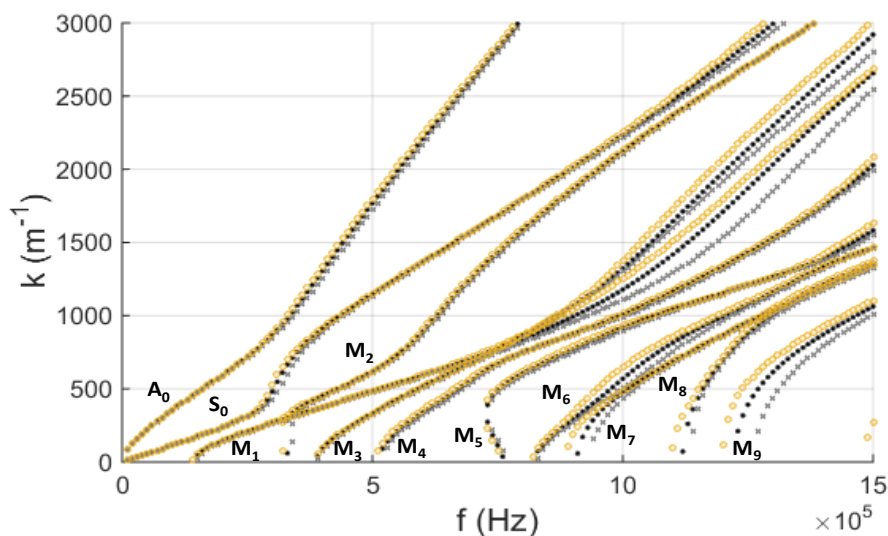


Figure 2-20 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes de Lamb dans la tricoche aluminium/époxy/carbone-époxy à la variation de +10% de l'épaisseur de la couche de colle (en jaune), de -10% (en gris) et pour une épaisseur de référence 0.5 mm (en noir).

En résumé, cette étude a permis de cerner les zones de fréquences auxquelles les modes de Lamb présentent une forte sensibilité aux épaisseurs des substrats et de l'adhésif.

D'après cette étude également, nous avons pu constater que l'effet de l'épaisseur de l'adhésif est plus important que celui des substrats, ceci nous oblige à connaître précisément l'épaisseur de l'adhésif au sein de chaque échantillon avant de procéder à la comparaison des résultats. Cette étude est complétée ci-dessous par la sensibilité aux constantes élastiques des différents matériaux.

3.6.4 Sensibilité aux modules de cisaillement C_{ij} du matériau composite

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à la sensibilité des courbes de dispersion des ondes de Lamb à des variations des paramètres C_{ij} du composite. Le matériau composite, fourni par Safran Nacelles, a été caractérisé au paragraphe 3.3. D'après les résultats de cette caractérisation, les valeurs de C_{ij} ont été évaluées à $\pm 20\%$. Nous avons étudié, en effet, l'influence due à cette variation des C_{ij} , notamment des coefficients C_{66} , C_{12} et C_{11} .

A la *Figure 2-21.a*, sont tracées les courbes de dispersion des ondes de Lamb pour une variation de $\pm 20\%$ du C_{66} . Nous constatons que certains modes sont sensibles à cette variation de ce paramètre, tels que les M_4 , M_7 , M_8 et M_9 autour de leur fréquence de coupure tandis que d'autres modes ne présentent aucune sensibilité tels les modes S_0 , M_1 et M_2 dans la gamme de fréquence considérée. La *Figure 2-21.b* montre que la variation de $\pm 20\%$ du C_{12} du composite carbone-époxy n'a aucune influence sur les courbes de dispersion. A la *Figure 2-21.c*, l'influence d'une variation de $\pm 20\%$ du C_{11} sur les courbes de dispersion a été évaluée. Globalement, une très faible sensibilité de certains modes à haute fréquence est observée (inférieure à 2%).

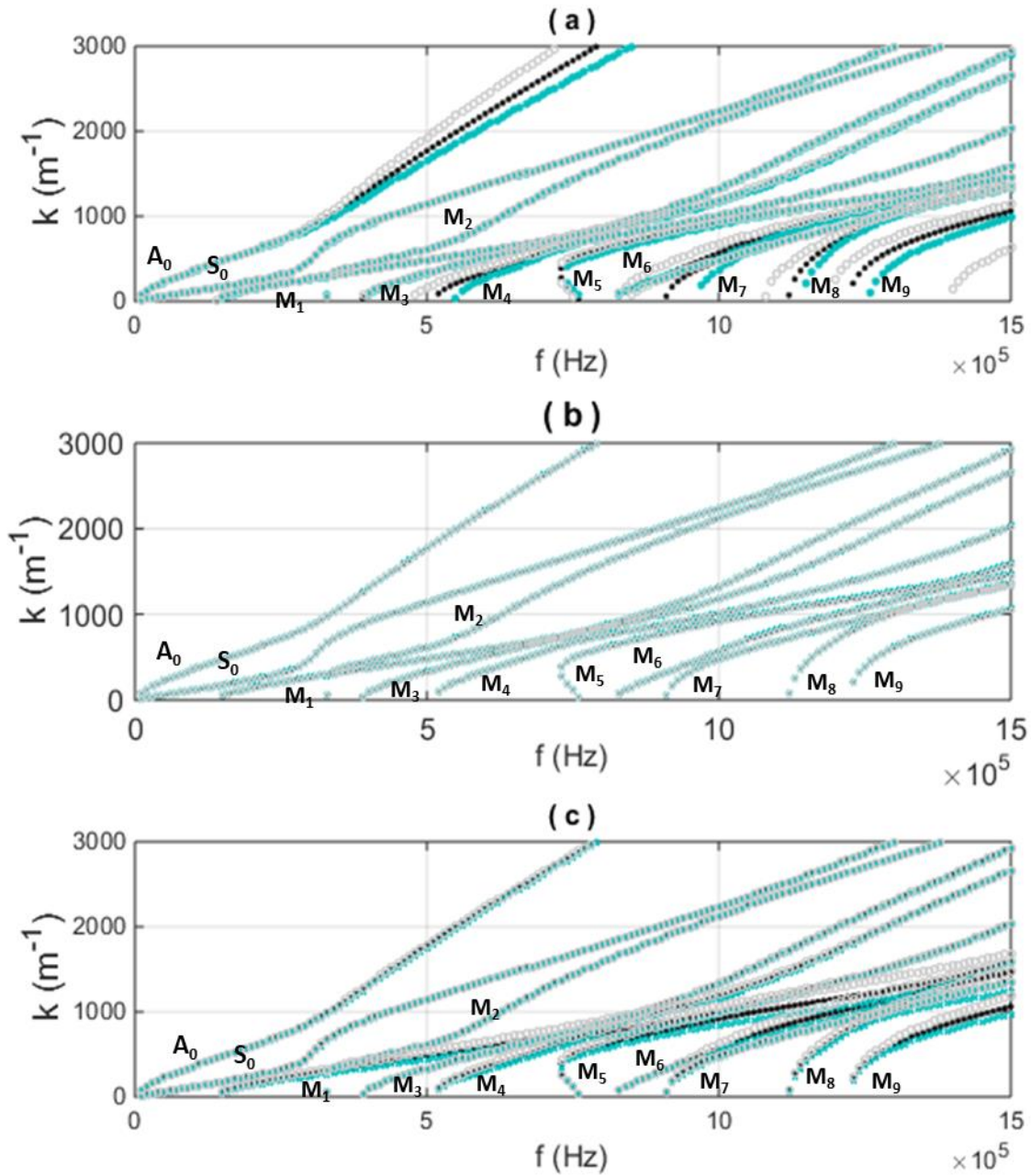


Figure 2-21 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes de Lamb pour la tricoche aluminium/époxy/composite (cas de l'adhésion parfaite) aux paramètres C_{ij} du composite à +20% (en gris) et à -20% (en bleu) par rapport aux C_{ij} moyennes en a) du C_{66} en b) du C_{12} et en c) du C_{11} .

4 Caractérisation expérimentale de la qualité de collage avec des modes de Lamb

4.1 Protocole de réalisation des échantillons

4.1.1 Préparation de surface

La préparation des surfaces à encoller est une étape préliminaire très importante dans tout processus d'élaboration de collage. L'objectif est d'éliminer les contaminants provenant de la fabrication et/ou du stockage des substrats, tels que les poussières, les limailles, les traces de graisses et les agents de démoulage. L'objectif peut être aussi de modifier la morphologie de surface et d'augmenter ainsi la rugosité (et donc la mouillabilité) et de changer la composition chimique superficielle en créant des couches actives par l'ajout d'agents promoteurs d'adhésion, tel le silane par exemple. Cette préparation par application des traitements chimiques et/ou mécaniques est l'un des meilleurs moyens pour favoriser l'adhésion.

La nature physique de l'adhésif ainsi que son taux de réticulation sont aussi des aspects à considérer. Puisque la dynamique de réticulation d'un adhésif dépend de sa nature chimique et de la température d'utilisation, le choix de l'adhésif peut influencer significativement l'évolution de sa viscosité et sa réticulation en fonction du temps. Généralement, le cycle de réticulation d'un adhésif comprend un temps de travail, un temps de gélification et un temps de durcissement. Dans le premier temps, la mouillabilité de l'adhésif est maximale, on peut le mélanger, l'injecter et l'étaler sur les substrats. Vers la fin du temps de travail, l'adhésif commence à être difficile à étendre, on peut ainsi parler de gélification de l'adhésif car il est en train de perdre son aspect gommant. A ce stade de la réticulation, il est nécessaire de manipuler les substrats avec beaucoup de précaution, en les gardant plans et immobiles car tout mouvement pourra engendrer des contraintes résiduelles dans le joint et affectera par conséquent la qualité d'adhésion. La dernière phase du cycle de réticulation est le durcissement, à ce niveau l'adhésif atteint les 80 à 90% de réticulation. Pour un durcissement

total, et pour obtenir la totalité des propriétés physico-chimiques, l'assemblage est post-cuit à une température de 160°C. La Figure 2-22 détaille l'évolution du cycle de réticulation d'un adhésif bi-composant à base d'époxy[85].

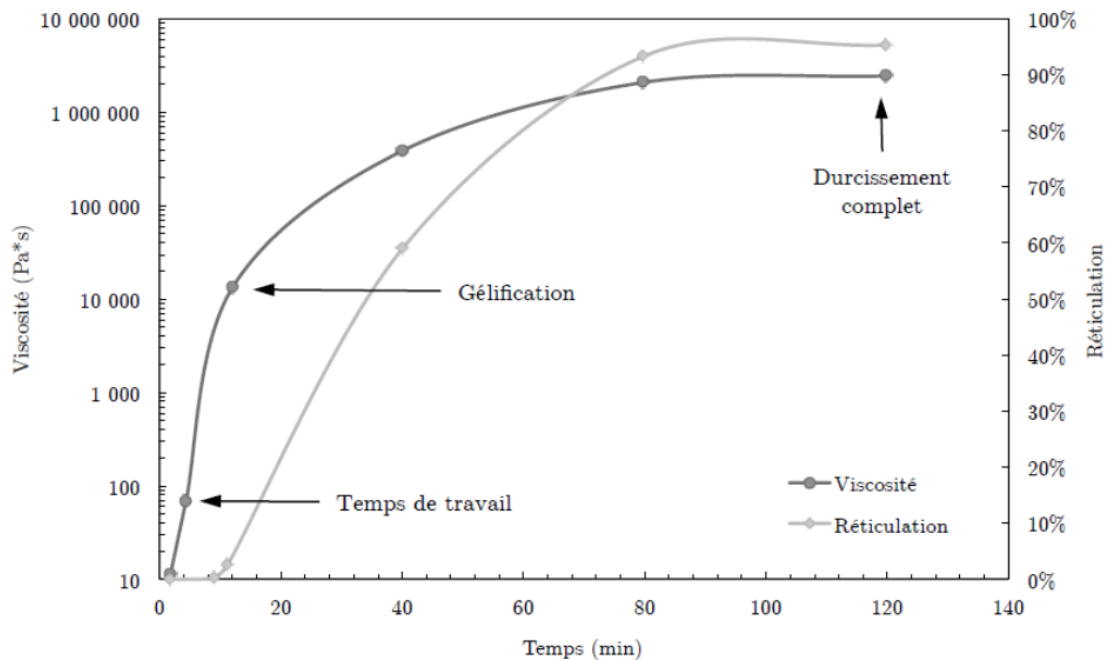


Figure 2-22 : Evolution du cycle de réticulation d'un adhésif bi-composant à base d'époxy.

Parmi les nombreux traitements de surface qui existent dans la littérature [86], [87], trois traitements ont été privilégiés dans cette étude et sont détaillés ci-dessous. L'objectif est de concevoir des échantillons à niveaux d'adhésion contrastés : fort (silane), moyen (dégraissage), faible (démoulant), et dissymétrique c'est-à-dire différencier les niveaux par interface aluminium/époxy ou époxy/composite car un des objectifs visé est de distinguer l'interface délaminiée à partir de l'observation sur la surface de l'un des substrats, ici l'aluminium.

❖ **Le dégraissage**

Ce traitement de surface est essentiel avant tout assemblage. Il permet de décoller et d'enlever les matières grasses ou les particules de poussière ou tout autre contaminant qui se trouvent à la surface agissant comme « couche faible » entre l'adhésif et les substrats[20]. Les solutions employées dans l'industrie sont généralement les solvants organiques et les dégraisseurs alcalins. On utilise pour dégraisser les plaques d'aluminium de l'acétone et l'alcool isopropanol en délogeant la graisse avec un chiffon propre.

❖ **La silanisation**

Il s'agit ici d'un traitement chimique à l'aide d'une molécule appelée promoteur d'adhésion (ou agent de couplage) qui fera le lien entre le substrat et l'adhésif. Le substrat est complètement immergé dans un bain contenant des organo-silanes. Ces composés ont deux fonctionnalités X-R-Y où la fonction X (silane) se lie au substrat et Y (organique) se lie à l'adhésif. Grâce à ces molécules, de fortes liaisons chimiques (liaisons covalentes, les plus énergétiques) peuvent se former au niveau des interphases [88]. Donnant lieu à une nouvelle surface sur le substrat, au niveau de cette surface, les propriétés seront localement modifiées et différentes de celles du substrat. Des études antérieures [89], [90] ont montré les améliorations apportées aux assemblages suite à la silanisation en termes d'adhérence, de résistance mécanique et de durée de vie.

Le protocole de silanisation est élaboré à partir des données de la littérature [91], [92] :

- Préparer la solution aqueuse de silane et ajuster le $\text{pH} \approx 5$ avec de l'acide chlorhydrique (pour la stabilité des silanols).
- Hydrolyser la solution sous agitation à température ambiante pendant 1 heure.
- Immerger les substrats aluminium dans la solution pendant 10 minutes.
- Enlever l'excès de la solution en tapotant les substrats verticalement sur un chiffon papier.

- Sécher les substrats dans une étuve ventilée à 93°C pendant 1heure.

❖ **Le délaminage**

Dans le but d'étudier et de caractériser le faible niveau d'adhésion, on peut dégrader les propriétés physico-chimiques au niveau de l'interphase substrat/colle. Il s'agit donc de délaminer le collage. Pour cela, on applique une couche de démoulant sur la surface à encoller de chaque substrat avant de les assembler par collage. On place ensuite le substrat dans l'étuve pendant 2heures à 120°C pour dégazer. On laisse ensuite refroidir à température ambiante et on essuie avec un chiffon.

4.1.2 Choix de l'adhésif époxy et protocole d'assemblage des matériaux

Nous avons choisi de continuer à utiliser l'adhésif pris dans l'ANR ISABEAU. Il s'agit de la formulation adhésive époxy bi-composant. Elle est constituée d'une résine, appelée DGEBA (Diglycidyl Ether du Bisphénol A) fabriquée par Huntsman sous la référence LY 556 et en proportion stœchiométrique d'un durcisseur, la Jeffamine D 230, qui est une diamine aliphatique fabriquée par Huntsman. Les paramètres caractéristiques sont repris des travaux de Gauthier et al [4], [49]c'est-à-dire les valeurs de sa masse volumique et de la célérité des ondes longitudinales et transversales en fonction du taux de réticulation.

Pour assembler les deux substrats, on suit le même protocole pour l'ensemble des échantillons de l'étude. La première étape consiste à percer deux trous de diamètre 5mm dans le substrat d'aluminium, sur deux côtés opposés. Par l'un des trous, la résine époxy va être injectée et de l'autre trou, l'excédent de résine va pouvoir être évacué. Ensuite, on dégraisse les plaques d'aluminium à l'isopropanol. Et puis, selon le niveau d'adhésion désiré, on réalise différents traitements de surface (dégraissage simple, silanisation et/ou démoulant) détaillés au paragraphe précédent.

Ensuite, et dans le but de garantir, une épaisseur de colle la plus constante possible, on utilise une empreinte métallique de 500 μm d'épaisseur. Pour assurer l'étanchéité, on utilise un joint de mastic souple en silicone déposé sur le contour de l'un des deux substrats. Puis l'échantillon assemblé est mis sous presse à température ambiante et à une pression de 1 bar

pendant toute une nuit pour permettre au joint de sécher complètement et devenir bien étanche.

L'assemblage étant désormais étanche, on peut procéder à l'infusion de la résine par l'un des trous précédemment percé dans le substrat d'aluminium. Pour un volume de 17 cm^3 correspondant à une épaisseur de $500 \text{ }\mu\text{m}$ de colle, on a besoin de 30g de résine époxy (Ly556) et de 9.7g de durcisseur (D230). Une fois le mélange effectué, il est ensuite agité au réacteur pendant 30 minutes pour bien l'homogénéiser. Le mélange est ensuite placé dans un bain à ultrasons afin de le dégazer. La viscosité de la préparation devant rester faible, on infuse aussitôt par l'un des trous. Sous l'effet de la gravité, la résine se répartit dans tout le volume et l'excès ressort par le trou opposé se trouvant à l'autre extrémité de l'échantillon. Un exemple d'assemblage d'une tricouche aluminium/époxy/plexiglas est montré à la *Figure 2-23*, assemblage réalisé à l'identique des échantillons en aluminium/matériau composite.

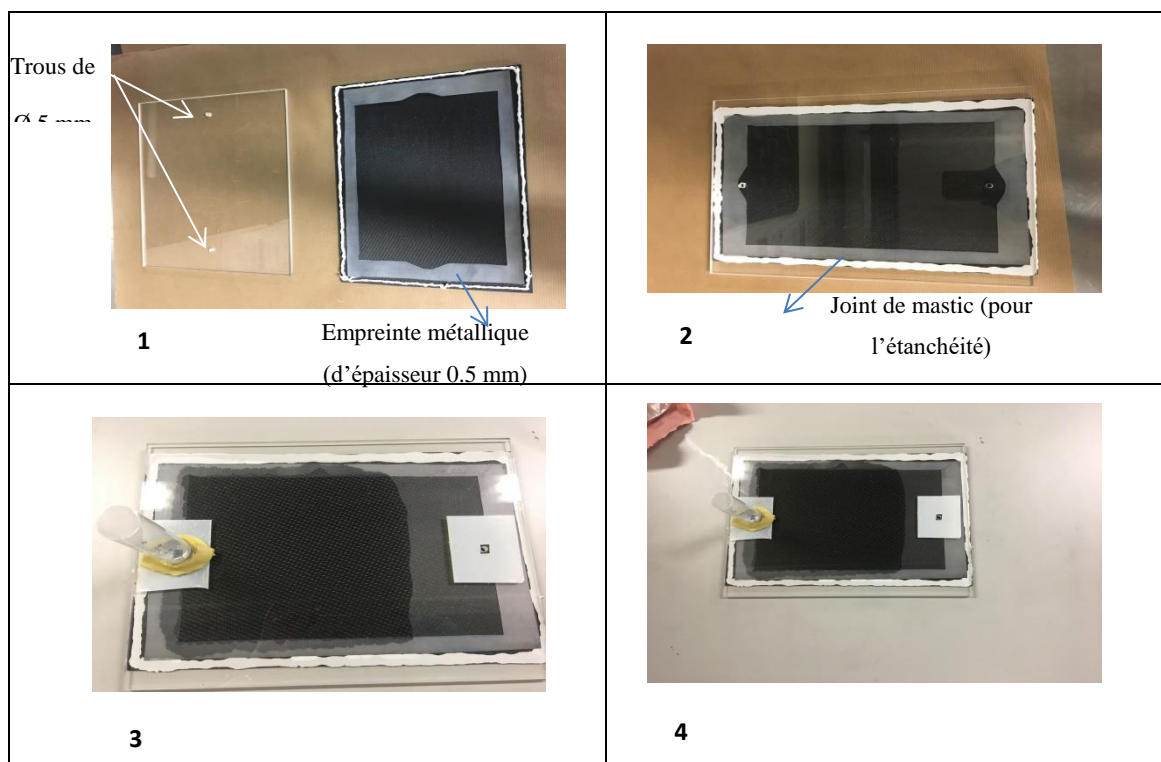


Figure 2-23 : Etapes d'assemblage des matériaux.

4.1.3 Echantillons étudiés

Nous avons réalisé quatre échantillons tricouches aluminium/adhésif/composite carbone-époxy avec des traitements de surface différents. L'épaisseur des substrats est respectivement 4mm et 1.8mm pour la plaque d'aluminium et le composite, l'adhésif a une épaisseur de 0.5mm.

Le matériau composite carbone-époxy utilisé a été fabriqué par Safran Nacelles. Il est composé de 6 plis de tissus pré-impregnés orientés à 0°, l'épaisseur d'un pli est de 0.3 mm, soit une épaisseur totale de 1.8 mm. Le tissu de carbone est à haute résistance avec une masse surfacique de 285g/m². Le système époxy est de classe 180. Le taux d'impregnation est de 40%. La réticulation se fait à une température inférieure à 190°C. La température de transition vitreuse est d'environ 200°C. La gamme d'utilisation est entre -55°C et 120/140°C. Sur une des faces est placé un tissu dit d'arrachage qui a le double objectif de protection et d'imposer une certaine rugosité de surface améliorant la mouillabilité du composite. Le fait d'appliquer un film de colle directement après arrachage de ce film et sans autre traitement devrait aboutir à un niveau d'adhésion fort pour cette interface adhésif/matériau composite.

Tous les collages ont été réalisés avec l'aide de Jocelyne Galy, Directrice de Recherche, au sein du laboratoire d'Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP, UMR CNRS 5223) de l'INSA de Lyon. Leurs descriptions sont faites ci-dessous.

Le 1^{er} échantillon a subi un dégraissage puis une silanisation de sa surface d'aluminium. Côté composite, aucun traitement particulier n'est réalisé, seul le tissu d'arrachage est retiré avant encollage. Le taux de réticulation de la colle époxy est de 100% (réticulation totale). Cet échantillon est noté Al_{DSi}E₁₀₀C_N (DSi pour dégraissage et silanisation ; N pour normal c'est-à-dire aucun traitement particulier côté composite). C'est l'échantillon avec le niveau d'adhésion le plus élevé.

Le 2^{ème} échantillon a subi un simple dégraissage côté aluminium. Une fois l'assemblage effectué, il a été laissé sous presse pendant 48 heures à température ambiante. Le taux de réticulation de l'adhésif est de 80%. Comme pour le 1^{er} échantillon, aucun

traitement particulier n'a été fait côté composite. Cet échantillon est noté $Al_D E_{80} C_N$. Cet échantillon a un niveau d'adhésion moyen côté aluminium et fort côté composite.

Pour les 3^{ème} et 4^{ème} échantillons, nous avons réalisé des niveaux d'adhésion contrastés et dissymétriques : on a fortement dégradé l'adhésion soit côté aluminium, soit côté composite, tout en gardant l'autre l'interface avec un niveau d'adhésion élevé. Pour l'échantillon appelé $Al_{DSi} E_{100} C_{RA}$, l'interface aluminium/époxy a un niveau d'adhésion élevé par l'application de silane sur l'interface côté aluminium. Par contre, l'interface époxy/composite a été fortement dégradée en appliquant une couche de démoulant (Release Agent noté RA) sur la surface du composite avant encollage. Pour l'échantillon appelé $Al_{DRA} E_{100} C_N$, le collage côté aluminium a été dégradé par application du démoulant avant encollage, tandis que sur l'autre interface adhésif/composite, nous n'avons appliqué aucun traitement particulier.

Le *Tableau 2-* récapitule l'ensemble des échantillons réalisés avec leur nomenclature.

Nomenclature	Traitement de l'aluminium	Traitement du composite	Taux de réticulation de l'époxy
$Al_D E_{80} C_N$	Dégraissage	Aucun	80 %
$Al_{DSi} E_{100} C_N$	Dégraissage+silanisation	Aucun	100 %
$Al_{DRA} E_{100} C_N$	Dégraissage+démoulant	Aucun	100 %
$Al_{DSi} E_{100} C_{RA}$	Dégraissage+silanisation	Démoulant	100 %

Tableau 2-7 : Description des échantillons étudiés et leurs nomenclatures.

4.2 Résultats expérimentaux de l'étude par ondes de Lamb

Dans cette partie, nous présentons le dispositif expérimental, son fonctionnement ainsi que le post-traitement des données.

4.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour étudier la propagation des ondes de Lamb dans les structures est présenté sur la *Figure 2-24*. Un signal impulsionnel, de durée 300 ns, est envoyé au transducteur piézoélectrique à ondes longitudinales de marque Krautkramer, de fréquence centrale de 2.25 MHz (bande passante à -6 dB de 2 MHz). L'impulsion est délivrée par un générateur de type *Agilent 33500B*.

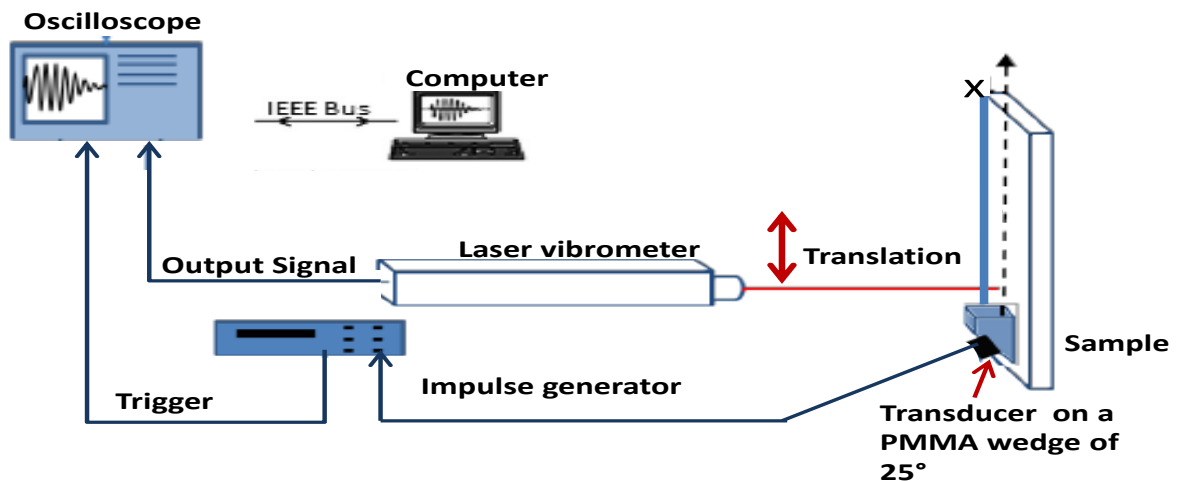


Figure 2-24 : Dispositif expérimental pour la génération d'ondes de Lamb.

Afin de générer des ondes guidées, on place le transducteur émetteur sur un sabot en plexiglas incliné à 25°. Le sabot est placé sur la surface libre du côté aluminium. La transmission acoustique entre le transducteur, le sabot et l'échantillon est assurée par un gel de couplage. Le signal impulsionnel reçu par le transducteur sera converti en conséquence en une onde ultrasonore de type Lamb dans l'échantillon. On utilise un vibromètre laser Polytec OFV-5000 (sensibilité de 20 V/(m.s⁻¹)) comme récepteur. L'interférométrie laser (méthode optique de détection basée sur l'interaction opto-acoustique) présente l'avantage d'un examen local, sans contact, dans une bande passante très large. Les déplacements normaux de l'onde en fonction du temps sont ainsi recueillis à la surface libre de l'échantillon, dans la direction

de propagation sur une distance de 70 mm avec un pas de 0.1 mm (ce pas est adapté aux longueurs d'ondes des ondes générées qui sont de l'ordre de 6 mm). Pour chaque position, l'acquisition du signal temporel s'effectue sur une durée de 100 μs , correspondant à 10000 échantillons temporels, soit une fréquence d'échantillonnage de 100 MHz, largement suffisante pour des ondes de l'ordre du mégahertz. A l'issue de chaque suivi de modes, on obtient ainsi une matrice temps-position $M(x,t)$ de 10000 lignes et 700 colonnes. Les éléments de la matrice représentent les amplitudes des déplacements normaux. Une représentation en niveaux de couleurs de cette matrice est donnée à la *Figure 2-25.a*. Un exemple d'un signal temporel enregistré à une position, ici $x = 20$ mm, est donné à la *Figure 2-24.b*.

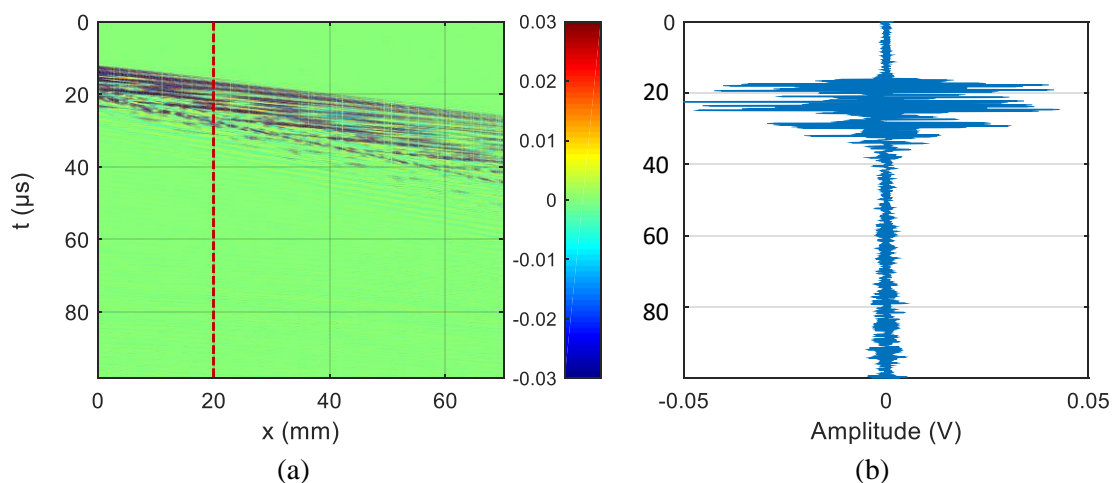


Figure 2-25 : (a)Matrice temps-position et (b) exemple d'un signal temporel enregistré en $x=20$ mm.

4.2.2 Acquisition et traitements de signal

Pour identifier et étudier les différents modes générés, nous calculons une double transformée de Fourier du signal expérimental $M(x,t)$. L'objectif de ce traitement est d'obtenir les courbes de dispersion expérimentales dans le plan nombre d'onde-fréquence (k, f) et de les comparer à celles du modèle prédictif. Le résultat obtenu est alors noté $\psi(f,k)$. Le module $|\psi(f,k)|$ est alors représenté en niveaux de couleurs en fonction de f et k . La FFT

temporelle est calculée sur 2^{18} points avec un pas fréquentiel $\Delta f = 381.5$ Hz. La FFT spatiale est calculée sur sur 2^{15} points avec un pas en nombre d'onde $\Delta k = 1.92$ m⁻¹. L'objectif est de respecter le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, ce qui est largement le cas ici. Le résultat de la FFT-2D ainsi obtenu correspond aux courbes de dispersion expérimentales dans l'espace fréquence-nombre d'onde (voir par exemple la *Figure 2-*). Les courbes de dispersion numériques seront ensuite superposées aux courbes expérimentales afin d'identifier les différents modes excités et d'évaluer le niveau d'adhésion.

4.2.3 Confrontation des résultats expérimentaux aux résultats de simulations

L'ensemble des échantillons décrits dans le paragraphe 4.1.3 ont été traités dans les mêmes conditions expérimentales c'est-à-dire même signal d'excitation, même angle du sabot, même transducteur et mêmes conditions d'acquisition et de traitement de signal. L'objectif de cette partie est de comparer les courbes de dispersion expérimentales à celles issues de la simulation (modèle aux interphases), et de pouvoir ainsi attribuer à chaque échantillon un couple de valeur (α , β) qui traduit son niveau d'adhésion. Sur les *Figure 2-26(a)* et *(b)* sont présentés respectivement les courbes de dispersion expérimentales pour les échantillons Al_{DSi}E₁₀₀C_N et Al_DE₈₀C_N.

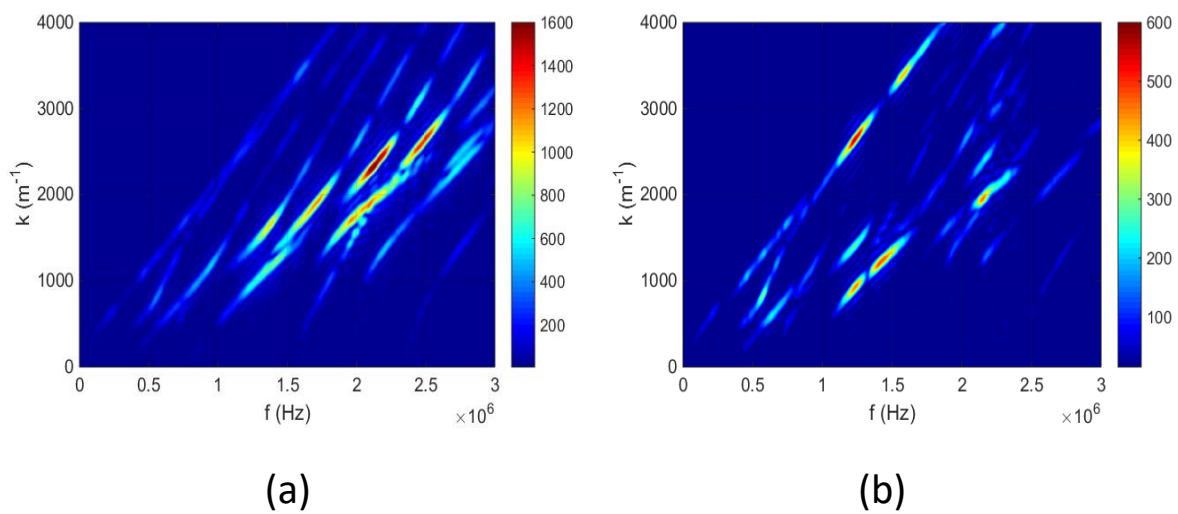


Figure 2-26 : Courbes de dispersion expérimentales pour l'échantillon a) $Al_{DSi}E_{100}C_N$ et b) $Al_DE_{80}C_N$.

Pour l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_N$, les courbes de dispersion expérimentales se superposent avec les courbes de dispersion numériques issues du modèle aux interphases pour $\alpha=\beta=1$ comme le montre la Figure 2-27. Ceci est cohérent avec nos prédictions : en effet, cet échantillon correspond à un très bon niveau d'adhésion côté métal et côté composite.

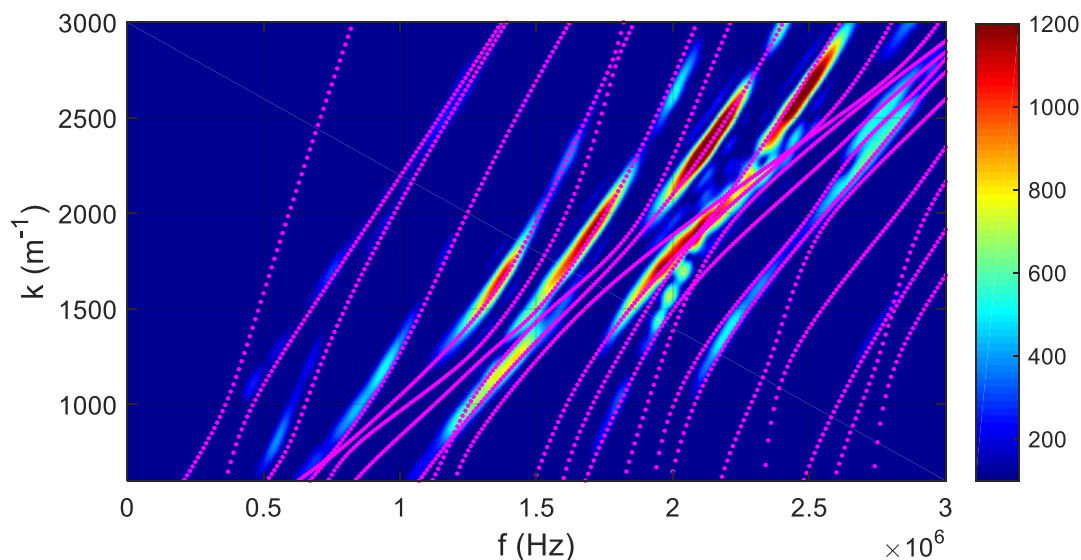


Figure 2-27 : Superposition des courbes de dispersion expérimentales de l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_N$ aux courbes de dispersion numériques des ondes de Lamb (•) pour $\alpha=\beta=1$.

Pour ce qui est de l'échantillon $Al_D E_{80} C_N$, la *Figure 2-28* montre que les courbes de dispersion expérimentales se superposent avec les courbes de dispersion numériques pour $\alpha=0.001$ et $\beta=1$. Ceci est cohérent avec le fait que le collage côté aluminium n'a pas bénéficié d'un traitement par promoteur d'adhésion et que la colle n'est réticulée qu'à 80%. Ce résultat confirme l'efficacité du silane pour améliorer la qualité du collage.

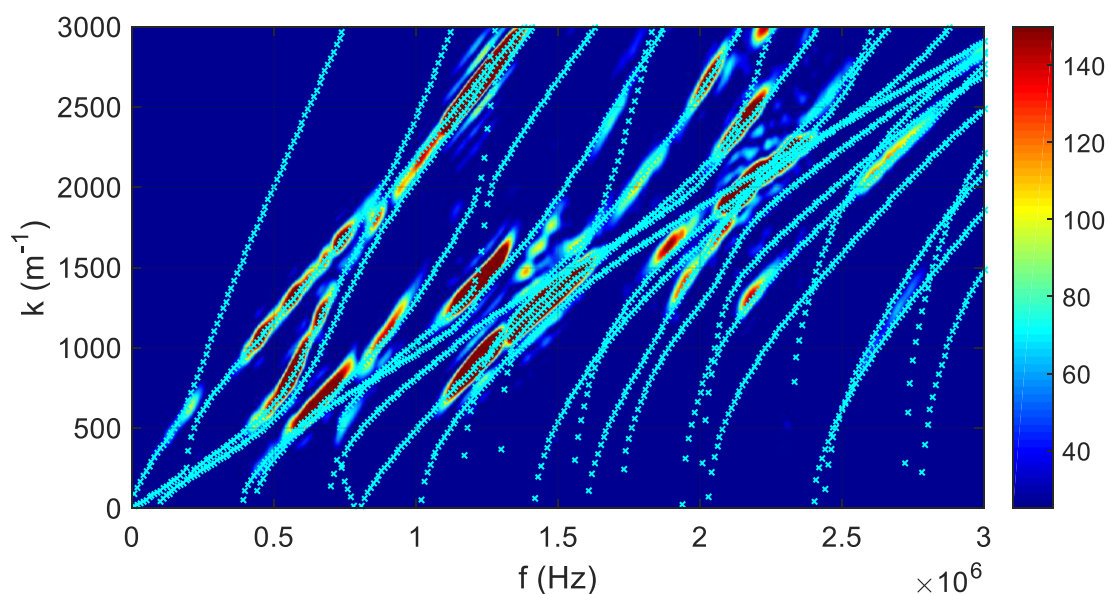


Figure 2-28 : Superposition des courbes de dispersion expérimentales de l'échantillon $Al_D E_{80} C_N$ aux courbes de dispersion numériques des ondes de Lamb () pour $\alpha=0.001$ et $\beta=1$.*

Considérons à présent les deux échantillons $Al_{DSi} E_{100} C_{RA}$ et $Al_{DRA} E_{100} C_N$ qui représentent des niveaux d'adhésion très contrastés côté métal et côté composite. Il a été montré numériquement au paragraphe 3.5 que le comportement des courbes de dispersion est très différent lorsqu'on dégrade le niveau d'adhésion côté aluminium ou côté composite, tout en gardant la deuxième interface en niveau d'adhésion élevé. L'objectif est donc maintenant de voir si expérimentalement on peut aussi mettre en évidence cette différence et détecter ainsi l'interface qui a été dégradée (aluminium/époxy ou composite/époxy) à partir du comportement d'un mode de Lamb de toute la structure tricoche.

Le résultat expérimental pour l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_{RA}$ (c'est-à-dire avec une bonne adhésion au niveau de l'interface aluminium/adhésif et une mauvaise adhésion sur l'interface composite/adhésif) est présenté à la *Figure 2-29*. Nous avons ensuite superposé les deux jeux de courbes de dispersion numériques pour $\alpha=1$ et $\beta=10^{-3}$ en rose et pour $\alpha=10^{-5}$ et $\beta=1$ en blanc. Nous pouvons constater une très bonne concordance entre le réseau de courbes de dispersion numériques de Lamb pour $\alpha=1$ et $\beta=10^{-3}$ et les courbes expérimentales. Cela traduit parfaitement le niveau d'adhésion de cet échantillon.

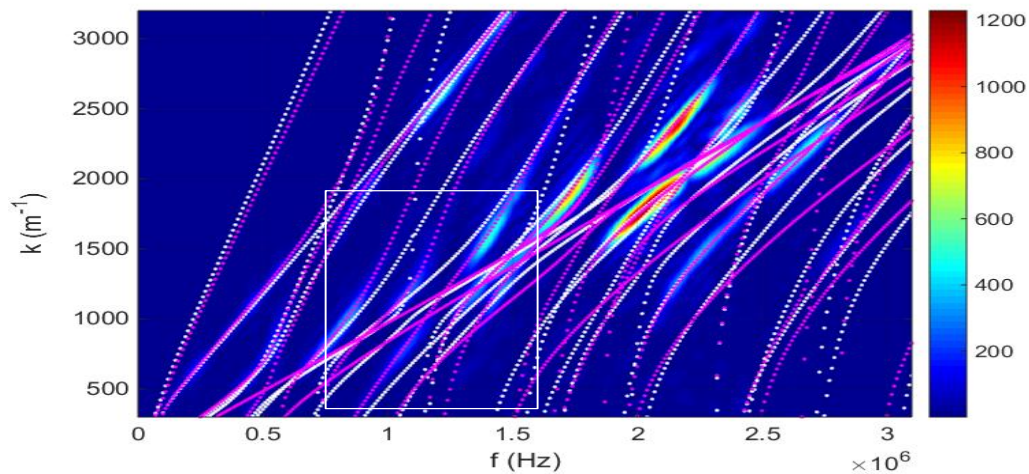


Figure 2-29 : Superposition des courbes de dispersion expérimentales obtenues avec l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_{RA}$ avec les courbes de dispersion numériques dans le cas où ($\alpha=1$ et $\beta=10^{-3}$) (en rose) et dans le cas où ($\alpha=10^{-5}$ et $\beta=1$) (en blanc)

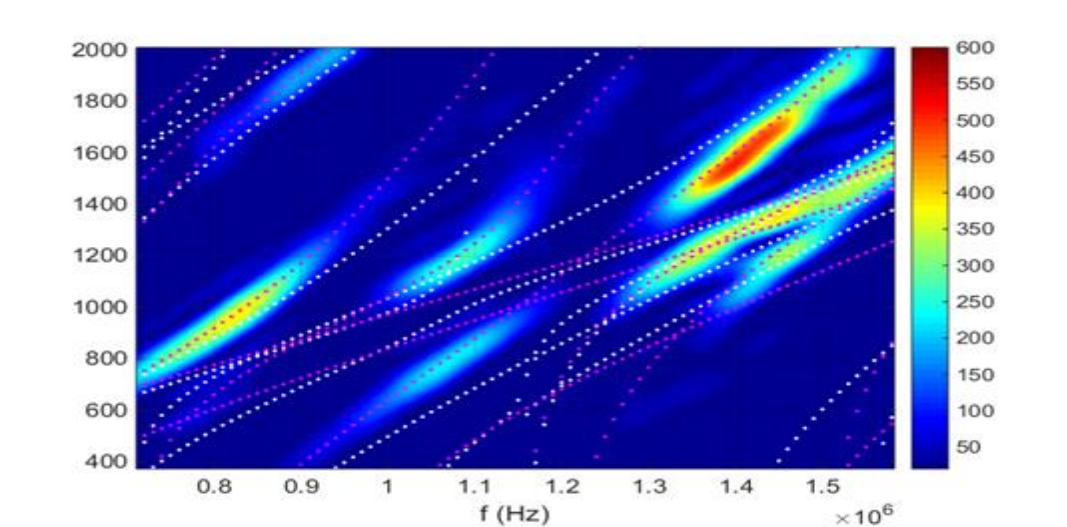


Figure 2-30 : Zoom sur la zone sélectionnée de la figure 2-29.

La présence du démoulant au niveau de l'interface composite/adhésif doit entraîner une forte dégradation de la qualité du collage entre l'adhésif et le composite. Cela a été validé par les valeurs de $\alpha=1$ et $\beta=10^{-3}$ fournies par le modèle aux interphases comme le montre la *Figure 2-29*. Pour confirmer cette hypothèse, nous représentons sur la *Figure 2-31* les courbes de dispersion de la bicouche aluminium/adhésif en adhésion parfaite (en jaune) sur le résultat expérimental et nous constatons un excellent accord entre les deux courbes. On rappelle que l'excitation et la détection des ondes de Lamb sont effectuées sur la surface libre d'aluminium. On a ainsi mis en évidence d'une part le bon couplage existant entre la plaque d'aluminium et l'adhésif et d'autre part le délaminage entre l'adhésif et le composite.

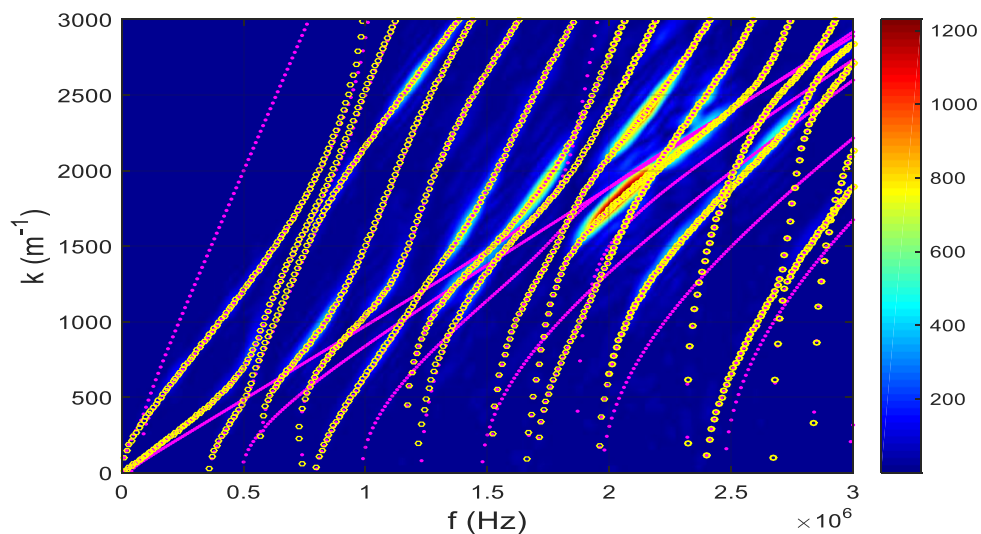


Figure 2-31 : Courbes de dispersion expérimentales pour l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_{RA}$ comparées aux courbes de dispersion numériques du modèle aux interphases pour $\alpha=1$ et $\beta=0,001$ (courbes roses) et celle de la bicouche aluminium/époxy (courbes jaunes).

Considérons maintenant l'échantillon $Al_{RA}E_{100}C_N$, pour lequel l'interface aluminium/époxy doit avoir des propriétés fortement dégradées contrairement à l'interface composite/époxy qui possède des propriétés nominales. Les courbes de dispersion numériques pour $\alpha=10^{-5}$ et $\beta=1$, tracées en blanc, sont bien superposées au résultat expérimental comme le montre la *Figure 2-32*. Par analogie au cas précédent, le démoulant entraîne une très forte dégradation de la qualité de collage entre la couche d'aluminium et l'époxy et par conséquent du reste de la structure collée. Pour vérifier ceci, nous avons superposé aux courbes de dispersion expérimentales les courbes de dispersion théoriques d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 4 mm en rouge à la *Figure 2-34*. La superposition est très bonne ce qui indique que les ondes de Lamb ne se propagent que dans la couche d'aluminium qui est découplée du reste de la structure à cause de la présence du démoulant.

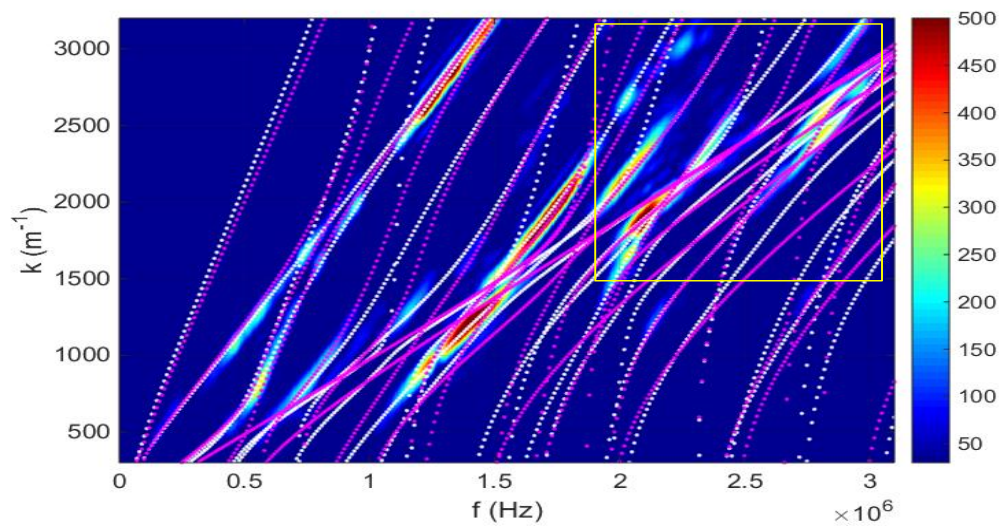


Figure 2-32 : Superposition des courbes de dispersion expérimentales obtenues avec l'échantillon $Al_{DRA}E_{100}C_N$ avec les courbes de dispersion numériques dans le cas où $\alpha=1$ et $\beta=10^{-3}$ (en rose) et dans le cas où $\alpha=10^{-5}$ et $\beta=1$ (en blanc).

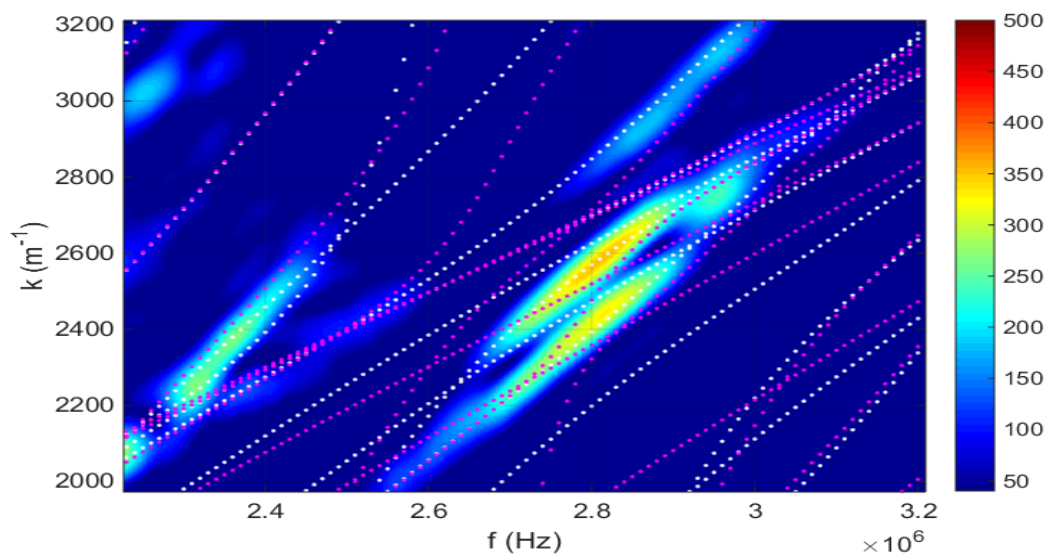


Figure 2-33 : Zoom sur la zone sélectionnée de la figure 2-32.

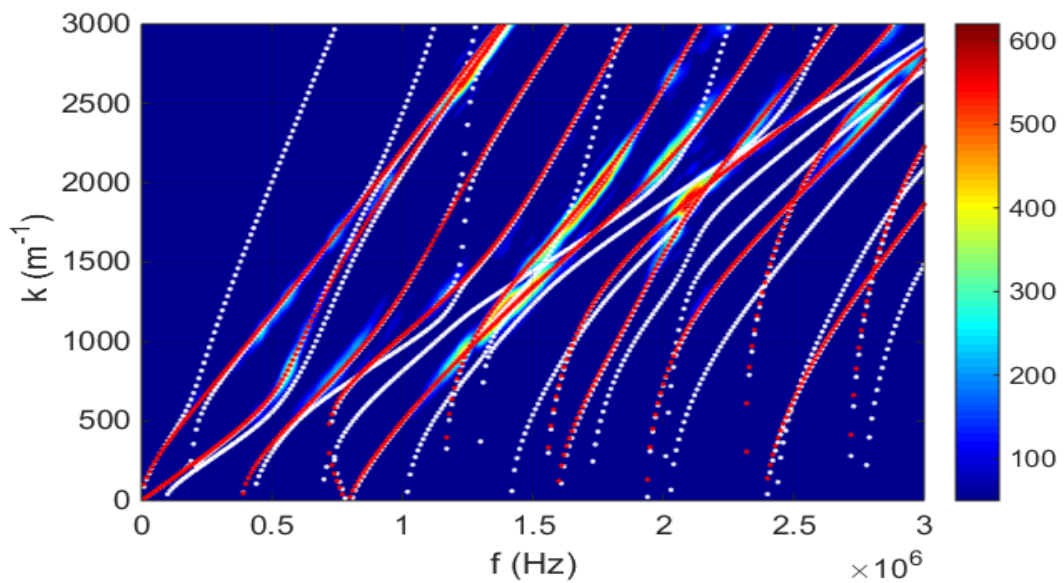


Figure 2-34 : Courbes de dispersion expérimentales pour l'échantillon $Al_{DRA}E_{100}C_N$ comparées aux courbes de dispersion numériques du modèle aux interphases pour $\alpha=0.001$ et $\beta=1$ (courbes blanches) et celle d'une monocouche d'aluminium de 4 mm d'épaisseur (courbes rouges).

Dans ce paragraphe, on a pu évaluer les différents niveaux d'adhésion des échantillons expérimentaux et, en particulier, on a pu déterminer l'interface dégradée lorsqu'un fort contraste existe entre les deux interfaces substrat/adhésif dans une même structure [93].

Le tableau suivant récapitule les niveaux d'adhésion obtenus pour les différents échantillons.

Nomenclature	α	β	Niveau d'adhésion
Al_DE₈₀C_N	0.001	1	Bon côté aluminium et très bon côté composite
Al_{DSi}E₁₀₀C_N	1	1	Très bon
Al_{DRA}E₁₀₀C_N	0.001	1	Mauvais côté aluminium et très bon côté composite
Al_{DSi}E₁₀₀C_{RA}	1	0.00001	Très bon côté aluminium et mauvais côté composite

Tableau 2-8 : Synthèse des résultats d'identification des niveaux d'adhésion exprimés par α et β pour chaque échantillon de l'étude.

5 Conclusion

Dans cette partie, la première étape a été de rappeler les bases théoriques nécessaires à l'étude des ondes guidées de Lamb. Ensuite, nous avons développé un nouveau modèle numérique aux interphases, dont le but est de pouvoir évaluer et quantifier le niveau d'adhésion dans des structures collées métal/adhésif/composite, et en particulier d'obtenir les courbes de dispersion des ondes de Lamb susceptibles de se propager dans ces structures, en fonction des paramètres des interphases α et β .

Grâce à ce modèle numérique, une étude de sensibilité des modes de Lamb aux variations des propriétés géométriques et mécaniques constatées a été effectuée. L'objectif est de choisir des modes de Lamb peu sensibles aux variations inhérentes aux matériaux et à la fabrication des collages : ces modes seront de potentiels indicateurs à la qualité de l'adhésion. Suite à cette étude de sensibilité, il a été choisi un large domaine de fréquence de travail car la sensibilité des modes de Lamb est plus ou moins marquée, et dépend du mode et de la fréquence.

Des expériences ont ensuite été menées pour plusieurs échantillons tricouche aluminium/époxy/composite carbone-époxy ayant des niveaux d'adhésion différents. Afin de faire varier la qualité d'adhésion différents traitements de surfaces des substrats ont été réalisés : présence ou pas de silane, dépôt de démoulant sur l'une des interfaces métal/adhésif

ou adhésif/composite pour dégrader fortement sa qualité. Les résultats expérimentaux montrent qu'en générant des modes de Lamb, qui sont des modes de vibration de toute la structure, et en excitant et détectant d'un seul côté on peut identifier l'interface dégradée. On peut donc conclure sur l'efficacité des ondes de Lamb à évaluer la qualité de l'adhésion de joints collés, y compris dans le cas d'une forte dissymétrie entre les deux interfaces dans une même structure tricouche. Pour fournir un indicateur supplémentaire à la qualité de l'adhésion, on peut aussi s'intéresser aux atténuations des modes de Lamb mais la technique utilisée pour générer ces ondes dans ce chapitre ne nous permet de réaliser cette étude, les mesures n'étant pas reproductibles en amplitude. En effet, des problèmes inhérents aux expériences par contact (quantité de gel entre le transducteur et le sabot, et entre le sabot et le substrat, pression exercée pour maintenir le transducteur sur la surface...) influencent les amplitudes des ondes mesurées d'une expérience à l'autre. C'est pourquoi on utilise dans la suite un autre dispositif expérimental à base de transducteurs EMAT qui permet des expériences reproductibles en amplitude et favorise la génération d'un mode unique bien choisi. Cette étude s'intéressera à une autre famille d'ondes guidées, les ondes transversales horizontales ou ondes SH (Shear Horizontal) facilement excitables avec ce type de dispositif.

Chapitre 3

Chapitre 3 : évaluation de niveaux d'adhésion par ondes guidées de type SH. Modélisation et détection de défauts de type kissing bond

1. Introduction

Toujours dans le but de pouvoir évaluer de façon non destructive la qualité de collage des structures collées, on envisage dans ce chapitre, d'utiliser un deuxième type d'ondes guidées comme moyen de prospection : les ondes transversales à polarisation horizontales, plus souvent appelées ondes SH (Shear Horizontal waves). Cette étude est motivée par le fait que ces ondes sollicitent les collages dans la direction de leur faiblesse à savoir les efforts de cisaillement [50] et aussi grâce au banc EMAT qui nous permet de générer plus facilement un seul mode sur une bande de fréquence limitée et à un nombre d'onde donné [50]. La reproductibilité des mesures via ce dispositif sans contact nous permet également d'étudier l'amplitude des ondes générées, et qui pourrait être un critère supplémentaire pouvant différencier les échantillons selon leur niveau d'adhésion.

On procède de la même manière que dans le chapitre précédent. Nous donnons dans un premier temps quelques rappels théoriques concernant ces ondes [8], [94], [95]. Ensuite, une description du modèle rhéologique aux interphases pour les ondes SH sera donnée. Le modèle numérique permet l'obtention des courbes de dispersion des ondes SH susceptibles de se propager dans la structure d'étude (métal/adhésif/composite). Une étude de sensibilité des courbes de dispersion nous aidera à sélectionner les modes qui sont sensibles aux paramètres α et β des interphases substrat/colle et peu sensibles aux propriétés géométriques et élastiques des matériaux constituant la structure collée. Le paragraphe suivant, quant à lui, sera consacré à l'étude expérimentale, permettant d'étudier l'interaction d'une onde SH avec des structures tricouches de niveaux d'adhésion différents. La génération et la réception de l'onde SH est assurée par des transducteurs EMAT (Electro Magnetic Acoustic Transducer) [96]–[99] capables de générer des ondes guidées sans contact aussi bien en émission qu'en réception. Cette étude expérimentale sera précédée par une étude numérique du modèle 2D pour prédire le comportement d'une onde SH face à la présence d'un défaut d'adhésion de type « kissing bond » qu'on nommera KB dans la suite.

2. Rappels théoriques sur les ondes SH

2.1 Cas d'une plaque élastique, homogène et isotrope placée dans le vide

On étudie dans ce paragraphe la propagation d'une onde guidée transverse SH dans une plaque élastique, homogène et isotrope placée dans le vide. La plaque est caractérisée par son épaisseur $2h$, sa masse volumique ρ et la vitesse de phase des ondes transversales C_T . La direction de propagation est prise selon l'axe (Ox) et l'épaisseur selon (Oz). Par conséquent, étant donnée la nature des ondes SH, son champ de déplacement est porté par l'axe (Oy) et est en fonction de z . la *Figure 3-1* présente la géométrie d'une plaque plane et met en évidence le système d'axe utilisé.

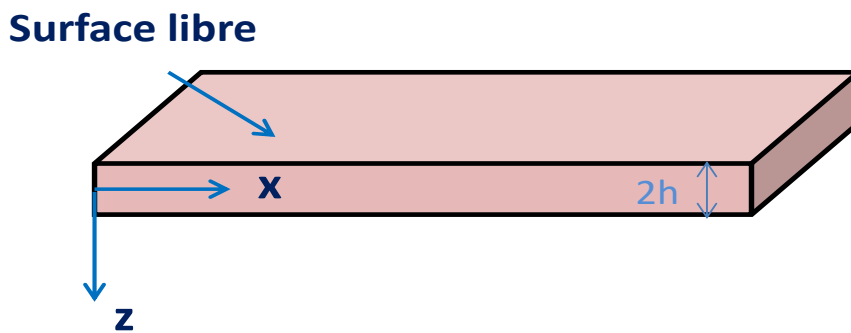


Figure 3-1 : Géométrie de la plaque.

Le champ de déplacement de l'onde guidée SH peut s'écrire sous la forme suivante [100]:

$$\begin{cases} U_x = 0 \\ U_y = F(z)e^{i(k_x x - \omega t)} \\ U_z = 0 \end{cases} \quad 3-1$$

Où k_x est le nombre d'onde. Il correspond à la projection dans la direction de propagation (prise selon l'axe des x) du vecteur d'onde \vec{k}_T des ondes de volume SH se propageant dans la

plaque. D'après le principe fondamental de la dynamique, l'équation du mouvement est donnée par:

$$\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial z^2} = \frac{1}{C_T^2} \frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2} \quad 3-2$$

On remplace (3-1) dans (3-2) et on obtient :

$$\left(\frac{\omega^2}{C_T^2} - k_x^2 \right) \cdot F(z) = \frac{\partial^2 F(z)}{\partial z^2} \quad 3-3$$

On pose :

$$q^2 = \frac{\omega^2}{C_T^2} - k_x^2 \quad 3-4$$

D'où l'équation devient :

$$\frac{\partial^2 F(z)}{\partial z^2} + q^2 F(z) = 0 \quad 3-5$$

Les solutions bien connues de cette équation différentielle sont de la forme :

$$F(z) = U_0 \cos(q \cdot z + \varphi) \quad 3-6$$

dont les inconnues sont q et φ . Pour les déterminer, nous écrivons les conditions de continuité à l'interface $z = \pm h$: la plaque est libre de toute contrainte.

$$\sigma_{yz} = 2\mu \frac{\partial U_y}{\partial z} = 0 \quad 3-7$$

Après quelques lignes de calcul, on obtient :

$$\sin(\varphi) \cos(qh) = 0 \quad 3-8$$

On a deux solutions possibles pour cette équation :

$$\begin{cases} \sin \varphi = 0 \\ \cos(qh) = 0 \end{cases} \quad 3-9$$

$$\varphi = n\pi \Rightarrow q = \frac{n\pi}{h} \quad 3-10$$

On remplace l'expression de q dans l'équation (3-4) et l'équation de dispersion devient [68] :

$$k_{x_n}^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 \text{ avec } n \in \mathbb{N} \quad 3-11$$

$\omega = 2\pi f$ est la pulsation et C_T correspond à la célérité transversale des ondes de volume.

La résolution de cette équation permet d'obtenir les courbes de dispersion des ondes SH dans une plaque élastique, isotrope et homogène. Des exemples de courbes de dispersion en nombre d'onde des premiers modes SH pour une plaque d'aluminium sont donnés sur la *Figure 3-2*.

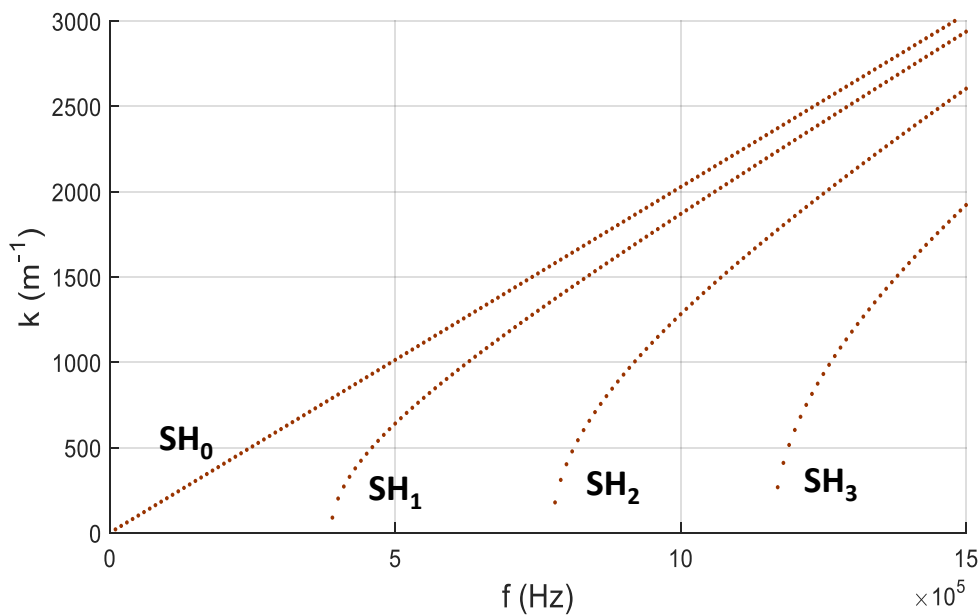


Figure 3-2 : Courbes de dispersion des ondes SH dans une plaque d'aluminium d'épaisseur 4mm.

Il est possible de remonter à la vitesse de phase C_{ph} depuis la relation suivante :

$$k_x = \frac{\omega}{C_{ph}}$$

Il est également possible d'en déduire la vitesse de groupe V_g , qui est définie de la manière suivante :

$$V_g = \frac{\partial \omega}{\partial k_x}$$

La vitesse de groupe correspond comme son nom l'indique, à la vitesse de propagation d'un paquet d'onde, elle permet d'observer si le mode est dispersif. En l'absence d'atténuation, la vitesse de groupe correspond à la vitesse de transport de l'énergie de l'onde [68], [101]. Lorsque le nombre d'onde est complexe, cette relation n'est plus valable, il faudra raisonner en terme de vitesse d'énergie [68].

3. Simulation 1D de l'adhésion aux interfaces collées substrat/colle par éléments finis

3.1 Modèle rhéologique aux interphases pour les ondes SH

3.1.1 Présentation du modèle.

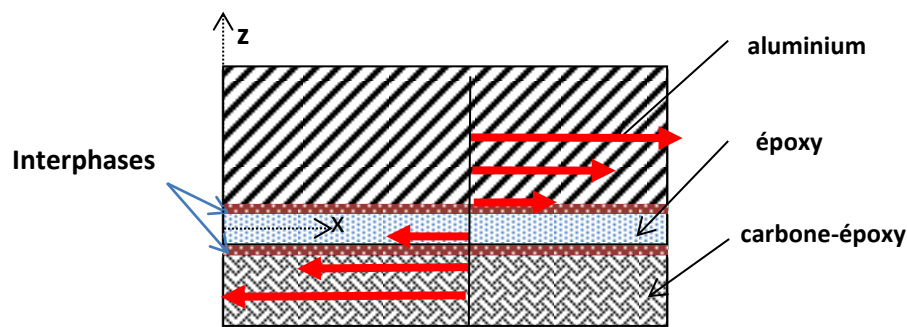


Figure 3-3 : Déplacements des ondes SH dans la structure.

La polarisation des ondes SH se fait suivant la direction perpendiculaire au plan de propagation (Oxz dans notre cas), les déplacements sont portés par l'axe Oy (voir *Figure 3-3*).

La mise en équation des ondes SH est plus simple que celles des ondes de Lamb étant donné qu'on ne s'intéresse qu'à la composante selon y. Par conséquent, le temps de calcul est diminué.

Les caractéristiques des interphases vont seulement dépendre de la composante transversale, leurs propriétés sont données par les modules d'élasticités $C_{44}=C_{55}$ pour l'interphase aluminium/époxy et $C'_{44} = C'_{55}$ pour l'interphase époxy/carbone-époxy telles que :

$$\begin{cases} C_{44} = C_{55} = \alpha \frac{(C_{55}^{\text{époxy}} + C_{55}^{\text{aluminium}})}{2} \\ C'_{44} = C'_{55} = \beta \frac{(C_{55}^{\text{époxy}} + C_{55}^{\text{composite}})}{2} \end{cases}$$

3.2 Implémentation sous Comsol

L'équation aux dérivées partielles dont on cherche les valeurs propres λ , est donnée sous Comsol par la forme générale suivante :

$$\nabla \cdot (-c \nabla U) + aU = -e_a \lambda^2 U \quad (1)$$

où U, c, a et e_a représentent respectivement le déplacement, le coefficient de diffusion, le coefficient d'absorption et le coefficient de masse.

Cette équation est considérée comme équation de dispersion des ondes SH avec :

$$c = -C_{44} \quad e_a = -C_{55} \quad a = \rho \omega^2 \quad (2)$$

Pour les matériaux isotropes, on a :

$$C_{44} = C_{55} = \mu = \rho c_T^2$$

Avec μ module de cisaillement (second coefficient de Lamé).

Par conséquent, l'équation (1) devient :

$$\nabla \cdot (\mu \nabla U) + \rho \omega^2 U = \mu k_x^2 U \quad (3)$$

Cette équation est valable pour chaque couche et correspond à l'équation de propagation des ondes SH.

3.3 Courbes de dispersion numériques

Les courbes de dispersion des ondes SH sont obtenues en résolvant le problème aux valeurs propres associées à l'équation (3), avec les mêmes conditions aux limites que pour les ondes de Lamb (continuité des déplacements et des contraintes au niveau des interphases et contraintes nulles à la surface libre). La méthode de résolution (méthode SAFE) est la même que celle utilisée pour trouver les modes de Lamb [9].

Les paramètres utilisés dans cette résolution numérique sont présentés dans le *Tableau 3-1* ci-dessous :

Matériau	ρ (Kg/m ³)	C_{44} (GPa)	C_{55} (GPa)	Epaisseur (mm)
aluminium	2800	26.91	26.91	3.999
époxy	1160	1.46	1.46	0.5
carbone-époxy	1700	4.87	4.87	1.705
Interphase aluminium/époxy	--	14.18	14.18	10^{-3}
Interphase époxy/carbone-époxy	--	3.16	3.16	$15 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3-1: Caractéristiques des matériaux utilisées pour tracer les courbes de dispersion des modes SH.

Sur la *Figure 3-4* sont tracées les courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy en rose obtenues par le modèle aux interphases pour $\alpha=\beta=1$. Ces courbes de dispersion ont été comparées à celles obtenues par le modèle à ressort pour $R_T=10^{15}$ N/m³ [48], [50], [56], [102]. D'après cette comparaison, on constate un excellent accord entre les deux modèles.

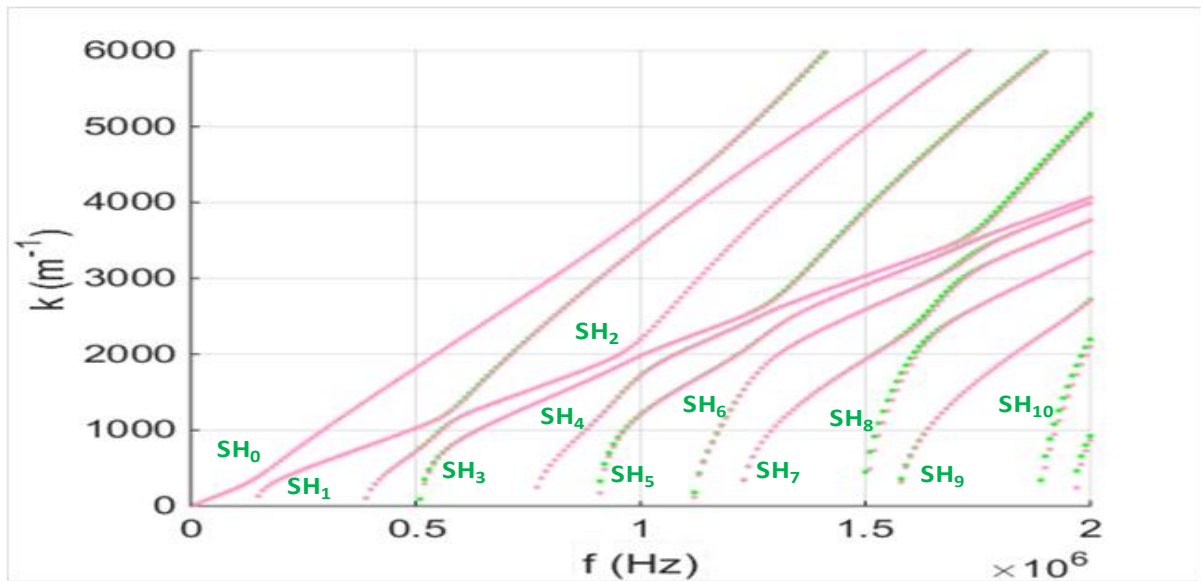


Figure 3-4 : Courbes de dispersion des ondes SH dans la structure aluminium(4mm)/époxy(0.5mm)/carbone-époxy (1.8mm) obtenues par le modèle aux interphases en vert pour $\alpha=\beta=1$ et celles obtenues par le modèle de Jones pour $R_T=10^{15} \text{ N/m}^3$ en rose.

Le cas du délaminage total est obtenu pour des valeurs de coefficients d'adhésion inférieures à 10^{-5} . En effet, on a superposé sur la *Figure 3-5* aux courbes de dispersion numériques obtenues pour $\alpha=\beta=10^{-5}$, les courbes théoriques d'une plaque d'aluminium (courbes vertes), les courbes théoriques de l'adhésif (courbes bleus) et celles d'une plaque de composite seule (courbes noires). Nous observons une très bonne superposition, ce qui prouve que pour ces valeurs de α et β , on arrive à un découplage des deux substrats donc le délaminage est total. Ceci permet de valider notre modèle aux interphases pour les ondes SH.

Ces courbes présentées sur ces figures, correspondant à l'adhésion parfaite et à la délamination totale, feront l'objet de comparaison avec d'autres résultats numériques pour des niveaux d'adhésion intermédiaires.

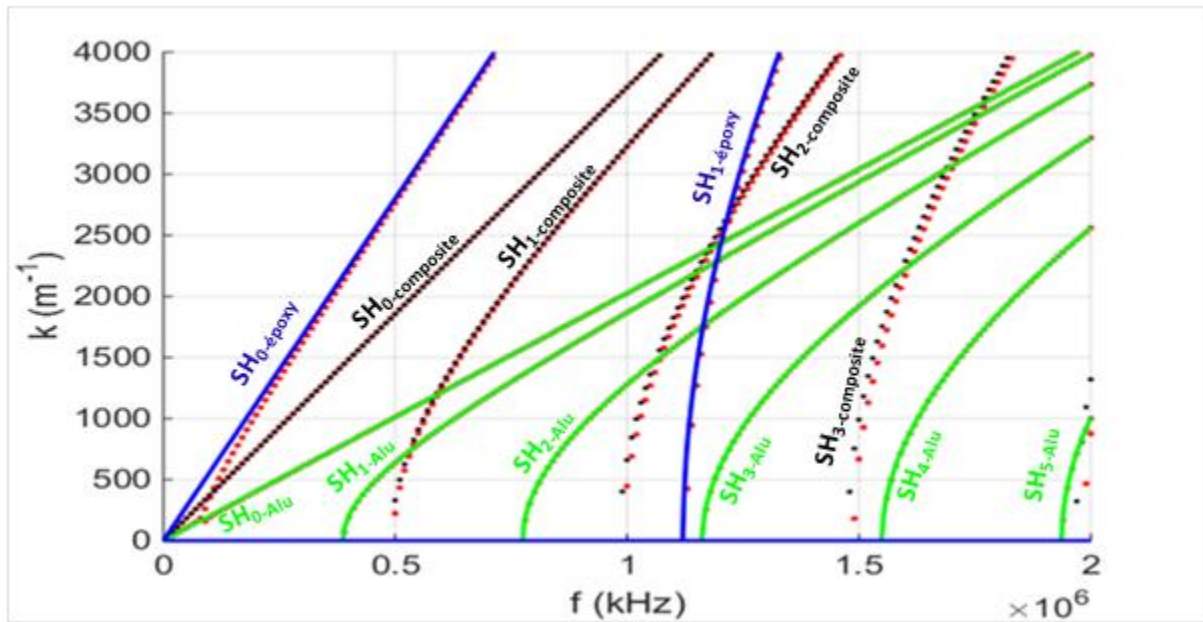


Figure 3-5 : Courbes de dispersion des ondes SH de la structure aluminium/époxy/carbone-époxy pour $\alpha=\beta=10^{-5}$ (•), courbes de dispersion théoriques d'une plaque d'aluminium de 4mm d'épaisseur (—), les courbes de dispersion d'une couche d'époxy d'épaisseur 0.5mm (—) et les courbes de dispersion d'une plaque de composite d'épaisseur 1.8mm (•).

3.4 Sensibilité aux coefficients d'adhésion α et β

Sur la *Figure 3-6* est présentée l'évolution des courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouche aluminium (4mm)/époxy (0.5mm)/carbone-époxy (1.8mm). Ces courbes sont tracées pour différentes valeurs de coefficient d'adhésion (cas où $\alpha=\beta$) variant de 0.01 à 1.

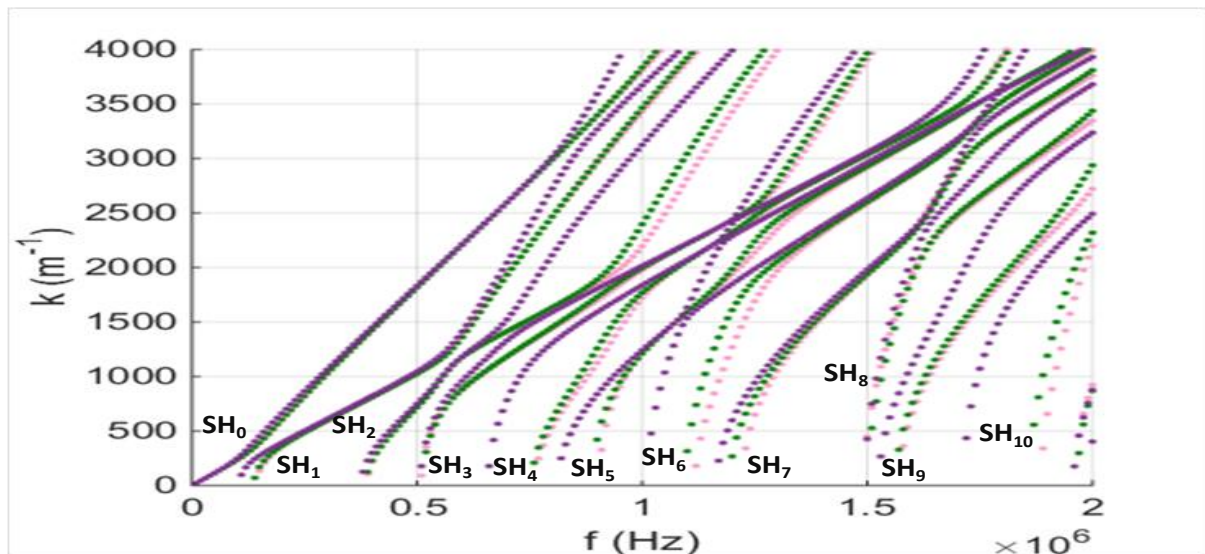


Figure 3-6 : Courbes de dispersion numériques des ondes SH issues du modèle aux interphases pour $\alpha=\beta=1$ en rose, $\alpha=\beta=0.1$ en vert, $\alpha=\beta=0.01$ en violet.

Entre 0.1 et 1, la variation des courbes de dispersion est très faible pour la plupart des modes. Pour les modes légèrement sensibles à cette variation de coefficients d'adhésion, notamment le mode SH₂ entre 990 kHz et 1270 kHz, la variation moyenne en nombre d'onde est de 9.47%. Pour le mode SH₆ qui est aussi sensible autour de sa fréquence de coupure et jusqu'à 1260 kHz, sa sensibilité moyenne en nombre d'onde est de 27.6 %.

A partir de la valeur $\alpha=\beta=0.01$, le décalage des courbes par rapport au cas du couplage parfait devient très important pour certains modes et dans des gammes de fréquence particulières. Par exemple, le mode SH₂ devient très sensible à partir de 750 kHz, et sa sensibilité moyenne en k est de 34.7%. Comme le mode SH₂, la sensibilité du mode SH₄ augmente au fur et à mesure que le coefficient d'adhésion diminue. La sensibilité moyenne en

k enregistrée pour le mode SH_4 autour de sa fréquence de coupure et jusqu'à 1260 kHz est de 76%. Les modes SH_2 et SH_4 sont donc de bons candidats capables de nous renseigner sur la qualité du collage dans la structure.

On s'intéresse maintenant à l'influence de la dégradation des propriétés élastiques d'une seule interface sur les courbes de dispersion comme on l'a fait pour les ondes de Lamb. Pour simuler une adhésion parfaite sur une des deux interfaces substrat/colle, on met la valeur de son coefficient d'adhésion à 1 et on fait varier le coefficient de l'autre interface entre 10^{-4} et 0.1. Puis on compare les résultats obtenus au cas du couplage parfait c'est-à-dire $\alpha=\beta=1$.

3.4.1. Cas où $\alpha=1$ et $\beta<1$

On considère dans un premier temps une dégradation du niveau d'adhésion sur l'interface époxy/carbone-époxy ($\beta<1$) tandis que sur l'interface aluminium/époxy, l'adhésion est parfaite ($\alpha=1$). Les résultats concernant l'influence de la dégradation de l'interface époxy/carbone-époxy sur les courbes de dispersion sont regroupés sur la *Figure 3-7*.

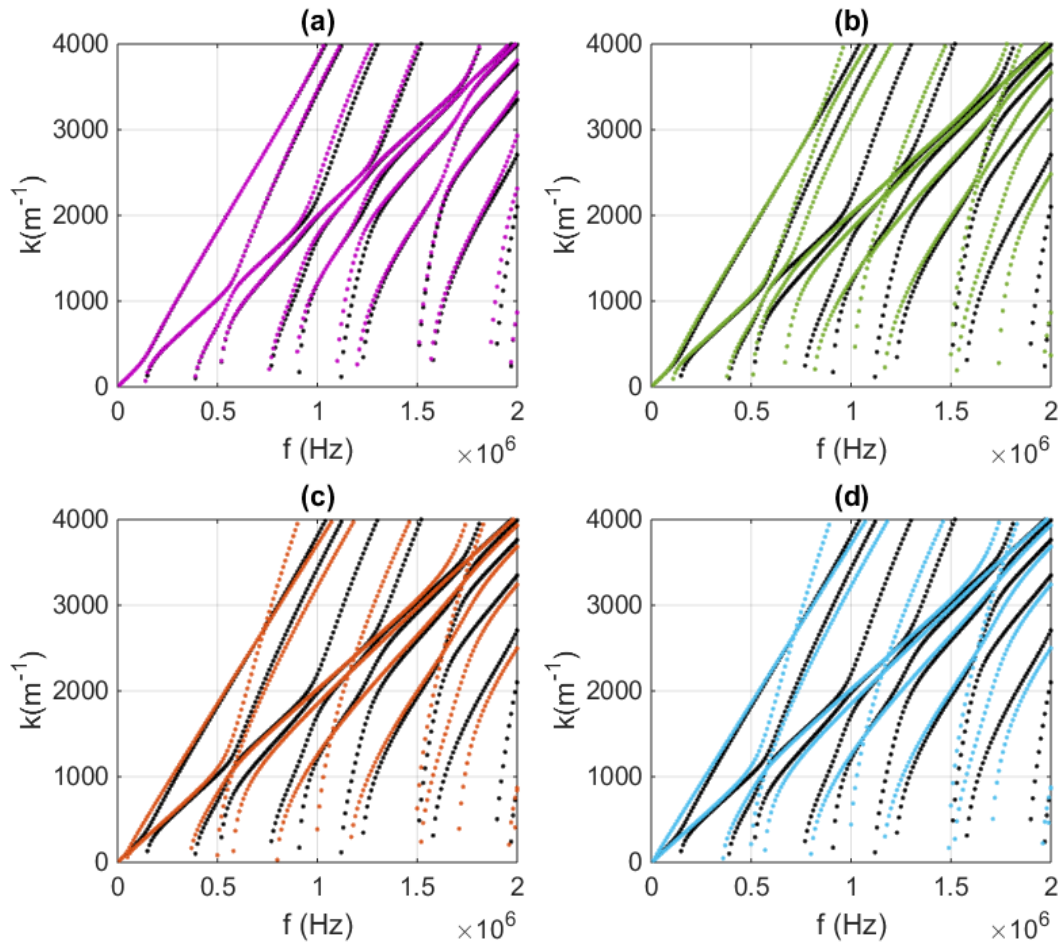


Figure 3-7 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouche, à $\beta=0.1$ (en rose) (a), à $\beta=0.01$ (en vert) (b), à $\beta=0.001$ (en orange) et à $\beta=0.0001$ (en bleu) par rapport à l'adhésion parfaite obtenue pour $\alpha=\beta=1$ (en noir).

Sur la Figure 3-7(a), on constate que dès qu'on a une petite variation des propriétés élastiques de l'interphase époxy/carbone-époxy ($\beta=0.1$), certains modes présentent une faible sensibilité traduite par un décalage de leur courbe dispersion par rapport au cas de l'adhésion parfaite, comme par exemple le mode SH₂ au-delà de 900 kHz et le mode SH₆ autour de sa fréquence de coupure. Cette sensibilité en k devient très importante (supérieure à 44%) pour $\beta=0.01$ pour ces mêmes modes (cf Figure 3-7.(b)), c'est-à-dire pour un niveau d'adhésion plus faible.

Pour les *Figure 3- (c) et 3-7 (d)* dont le résultat est quasiment le même, le niveau d'adhésion a été fortement dégradé en mettant des valeurs pour β égales à 0.001 et 0.0001 respectivement. Le réseau de courbes ne correspond plus à celui de la tricouche. On retrouve bien les courbes de la bicouche aluminium/époxy d'une part, et aussi les courbes d'une monocouche de composite de 1.8 mm d'épaisseur d'autre part. Autrement dit, la couche de composite a été complètement découplée du reste de la structure pour cette valeur de β . Cette interprétation a été validée comme la montre la *Figure 3-8* ci-dessous :

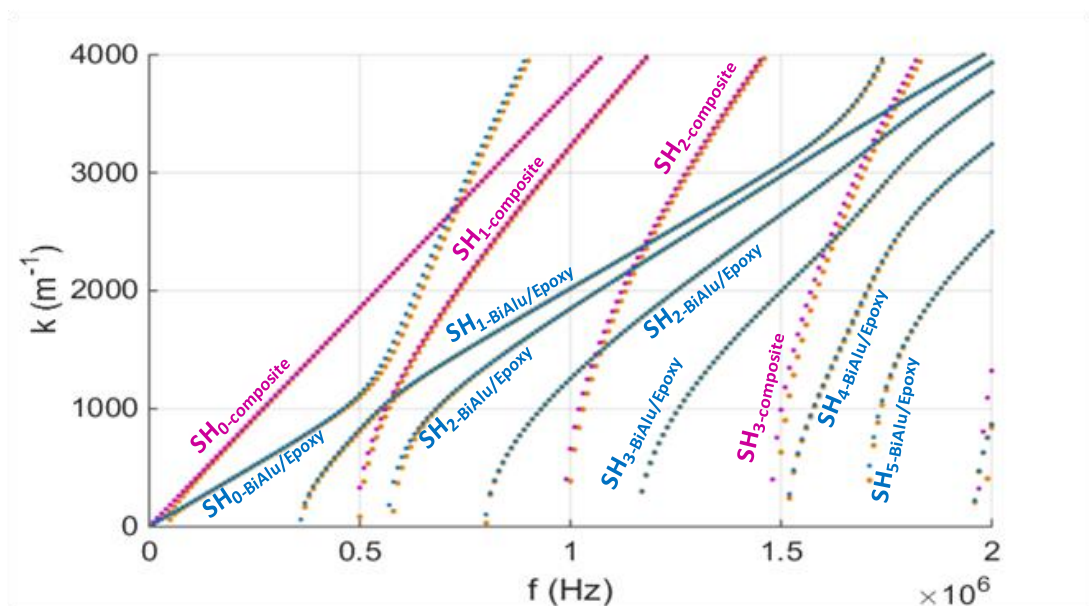


Figure 3-8 : Courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouche aluminium (4mm)/époxy(0.5 mm)/carbone-époxy (1.8 mm) pour ($\alpha=1$ et $\beta=0.001$) (•) superposées aux courbes de dispersion d'une bicouche aluminium (4mm)/époxy (0.5 mm) (•) et à celles d'une plaque de composite carbone époxy (1.8 mm) (•).

3.4.2. Cas où $\alpha < 1$ et $\beta=1$

Maintenant, on s'intéresse à l'influence de la dégradation de l'interphase aluminium/époxy, on procédera de la même manière que le paragraphe précédent. Cette-fois ci, l'interphase époxy/composite reste nominale ($\beta=1$) et le paramètre α prendra des valeurs comprises entre 10^{-4} et 0.1.

Comme le montrent les *Figures 3-9. (a) et 3-9. (b)*, pour des valeurs de $\alpha=0.1$ et $\alpha=0.01$ respectivement, les modes SH ne présentent aucune sensibilité et se superposent au cas des modes en adhésion parfaite. A partir de $\alpha=0.001$ (cf *Figure 3-9 (c)*), le comportement des courbes de dispersion change, en effet les modes SH₂, SH₄, SH₅, SH₆ et SH₈ se décalent nettement du cas de l'adhésion parfaite pour des zones fréquentielles particulières ce qui les rend adaptés pour évaluer la qualité du collage. Pour $\alpha=10^{-4}$ (cf *Figure 3-9. (d)*), le décalage des courbes devient très important et on identifie bien les courbes de dispersion d'une monocouche d'aluminium.

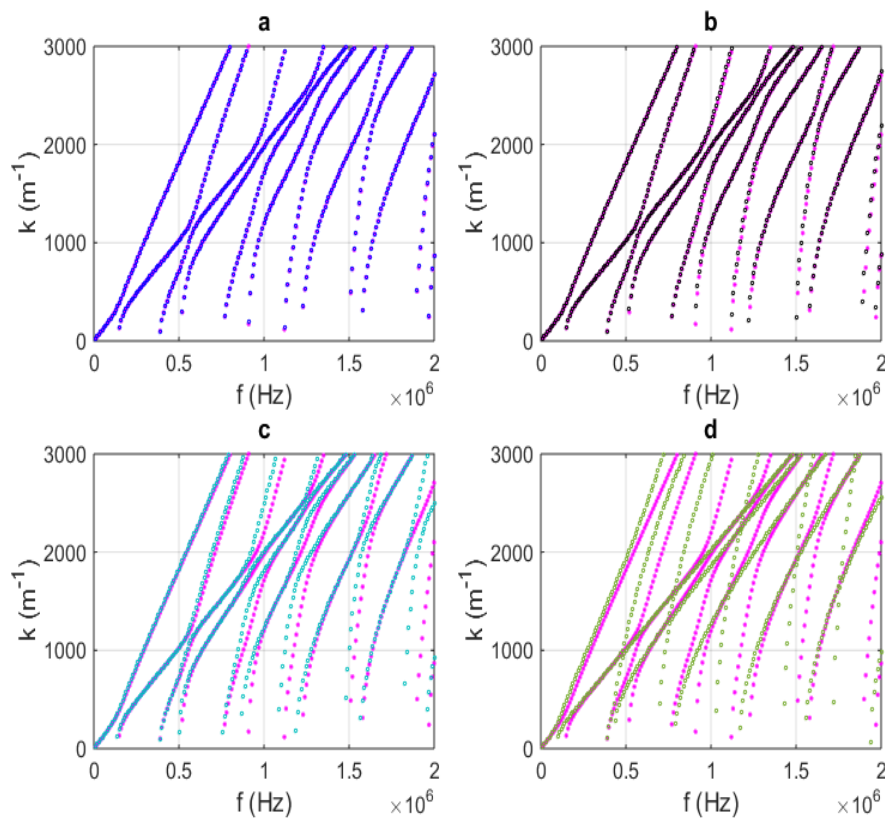


Figure 3-9 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouche, à $\alpha=0.1$ (en bleu) (a), à $\alpha=0.01$ (en noir) (b), à $\alpha=0.001$ (en bleu clair) (c) et à $\alpha=0.0001$ (en vert) (d) par rapport à l'adhésion parfaite obtenue pour $\alpha=\beta=1$ (en rose).

Le réseau de courbes pour ce couple de valeurs $\alpha = 10^{-4}$ et $\beta = 1$ ne correspond plus à celui d'une tricouche et montre un délaminage de la couche d'aluminium par rapport au reste de la structure tricouche. Pour le couple de valeur $\alpha = 10^{-5}$ et $\beta = 1$, non seulement on identifie les modes SH d'une monocouche d'aluminium mais bien aussi les modes de la bicouche époxy/composite. La *Figure 3-10* met en évidence cette remarque.

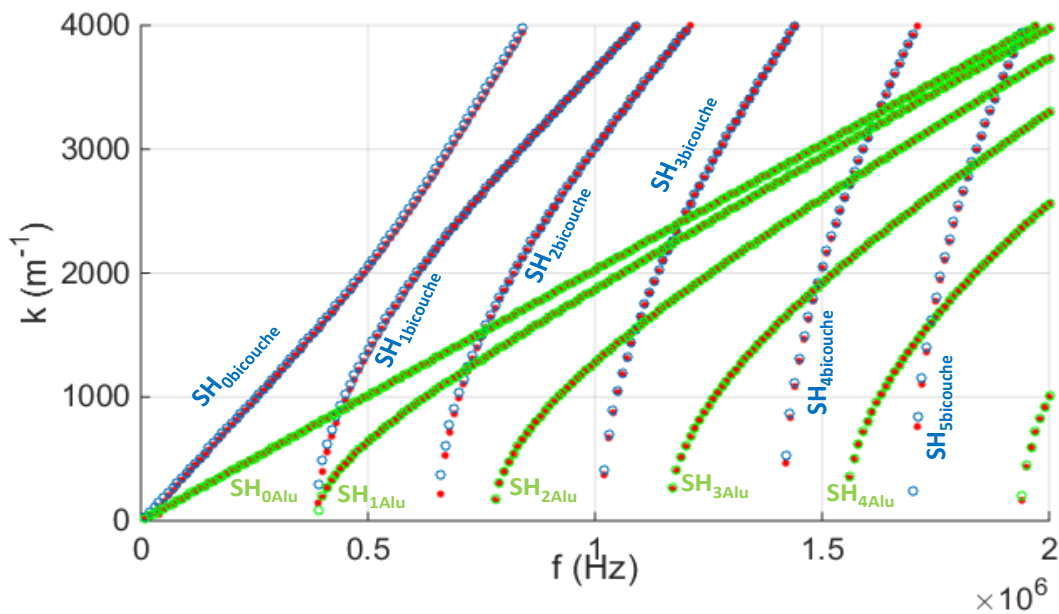


Figure 3-10 : Courbes de dispersion des ondes SH de la structure tricouche aluminium (4mm)/époxy (0.5 mm)/carbone-époxy (1.8) pour $\alpha = 10^{-5}$ et $\beta = 1$ (\bullet) superposées aux courbes de dispersion d'une bicouche composite (1.8 mm) / époxy (0.5 mm) (\circ) et à celles d'une plaque d'aluminium (4 mm) (\circ).

3.5 Sensibilité aux épaisseurs des matériaux de la structure

3.5.1 Sensibilité à l'épaisseur de la couche d'aluminium

Les courbes de dispersion présentées sur la *Figure 3-11* permettent de vérifier que la variation d'épaisseur constatée de la couche d'aluminium n'engendre pas de changements notables sur le comportement des ondes SH. L'ensemble des modes sont insensibles à cette

variation d'épaisseur quoique les modes SH₄ et SH₆ semblent très peu sensibles autour de leur fréquence de coupure, une sensibilité en k nettement inférieure à 2%.

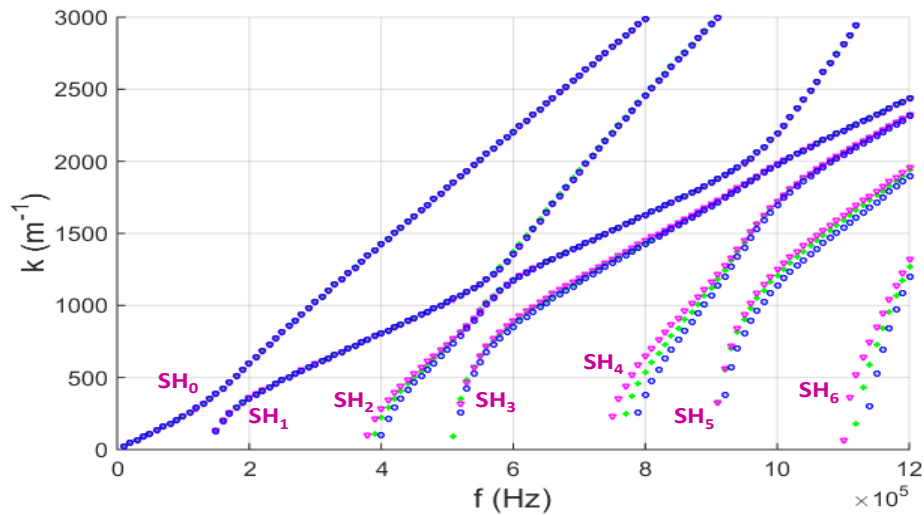


Figure 3-11 : Sensibilité des modes SH se propageant le long de l'assemblage collé aluminium/époxy/carbone-époxy à la variation d'épaisseur d'aluminium de +3% en rose et de -3% en bleu par rapport à une épaisseur de référence de 4mm (en vert).

3.5.2 Sensibilité à l'épaisseur de la couche de composite

L'influence de la variation de $\pm 5\%$ de l'épaisseur du composite sur les courbes de dispersion en ondes SH a été évaluée numériquement, comme le montre la *Figure 3-12*. Une telle variation d'épaisseur n'engendre pas de changements notables. L'écart observé pour certains modes dans certaines gammes de fréquence reste faible (inférieur à 3%).

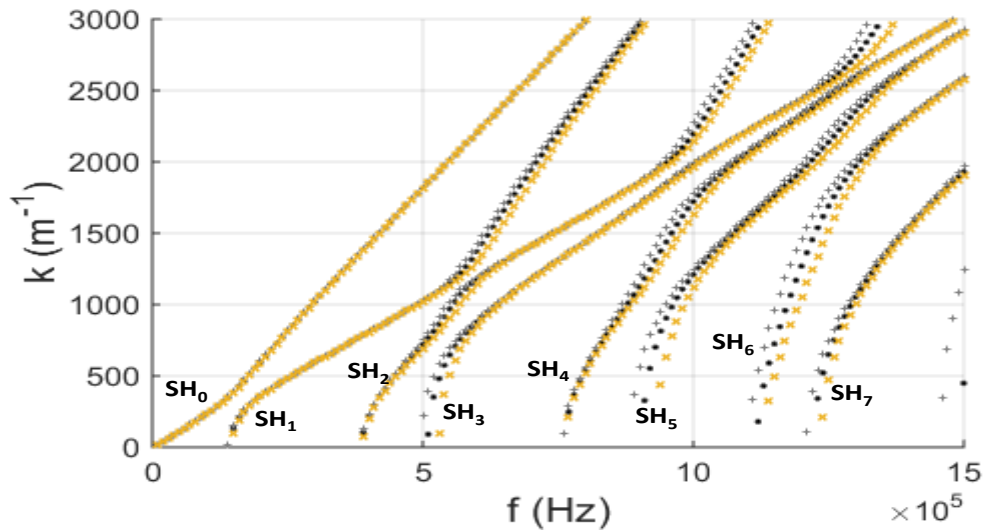


Figure 3-12 : Sensibilité des modes SH se propageant le long de l'assemblage collé aluminium/époxy/carbone-époxy à la variation d'épaisseur de la plaque de composite de +5% en gris et de -5% en jaune par rapport à une épaisseur de référence de 1.8mm (en noir).

3.5.3 Sensibilité à l'épaisseur de la couche de colle

La Figure 3-13 représente l'évolution des courbes de dispersion des ondes SH se propageant le long du guide aluminium/époxy/carbone-époxy, en tenant compte d'une variation de $\pm 10\%$ de l'épaisseur de la couche de colle. Globalement, l'influence d'une telle variation n'est pas très remarquable. En revanche, le mode SH₆ présente une certaine sensibilité mesurable autour de sa fréquence de coupure et cela jusqu'à 1.2 MHz, sa sensibilité en k peut atteindre les 9%. Les modes SH₀ et SH₁ semblent être insensibles à cette variation d'épaisseur de la couche de colle sur toute la gamme de fréquence considérée.

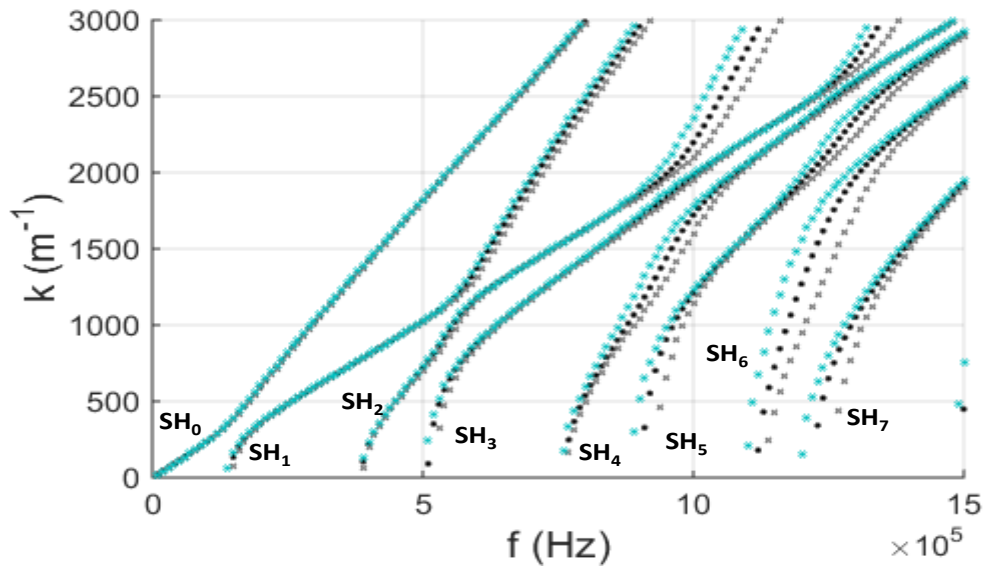


Figure 3-13 : Sensibilité des modes SH se propageant le long de l'assemblage collé aluminium/époxy/carbone-époxy à la variation de +10% de l'épaisseur de la colle (en bleu), de -10% (en gris) et pour une épaisseur de référence de 0.5mm (en noir).

En conclusion, d'après cette étude numérique sur la prédiction du comportement des ondes SH par rapport à la variation constatée des épaisseurs des substrats et de la couche de colle, l'influence de la variation d'épaisseur de la couche de colle est plus importante devant la variation de celle des substrats, les modes qui présentent une forte sensibilité à ces paramètres n'ont pas le potentiel pour évaluer la qualité du collage. Ceci nous impose de connaître au mieux les épaisseurs des couches constituant l'assemblage pour minimiser ce risque et pouvoir ainsi confronter les résultats entre eux. Ou encore, ceci nous impose d'étudier ces modes dans des zones fréquentielles où ils sont insensibles à l'épaisseur des matériaux mais très sensibles aux coefficients de collage α et β . L'excitation expérimentale d'un mode SH donné va dépendre de ce critère.

3.5.4 Sensibilité aux modules de cisaillement C_{ij} du matériau composite

Comme déjà signalé dans le chapitre précédent (paragraphe 3.1.1), la variation des valeurs des C_{ij} du composite a été évaluée à $\pm 20\%$.

En onde SH, la seule composante qui nous intéresse afin de modéliser notre composite est $C_{44}=C_{55}$. La sensibilité des courbes de dispersion en ondes SH de la tricouche à cette variation du C_{44} du composite est importante pour certains modes comme le montre la *Figure 3-14*. En effet, on peut constater par exemple un écart maximal en k de 578 m^{-1} pour le mode SH_5 à sa fréquence de coupure.

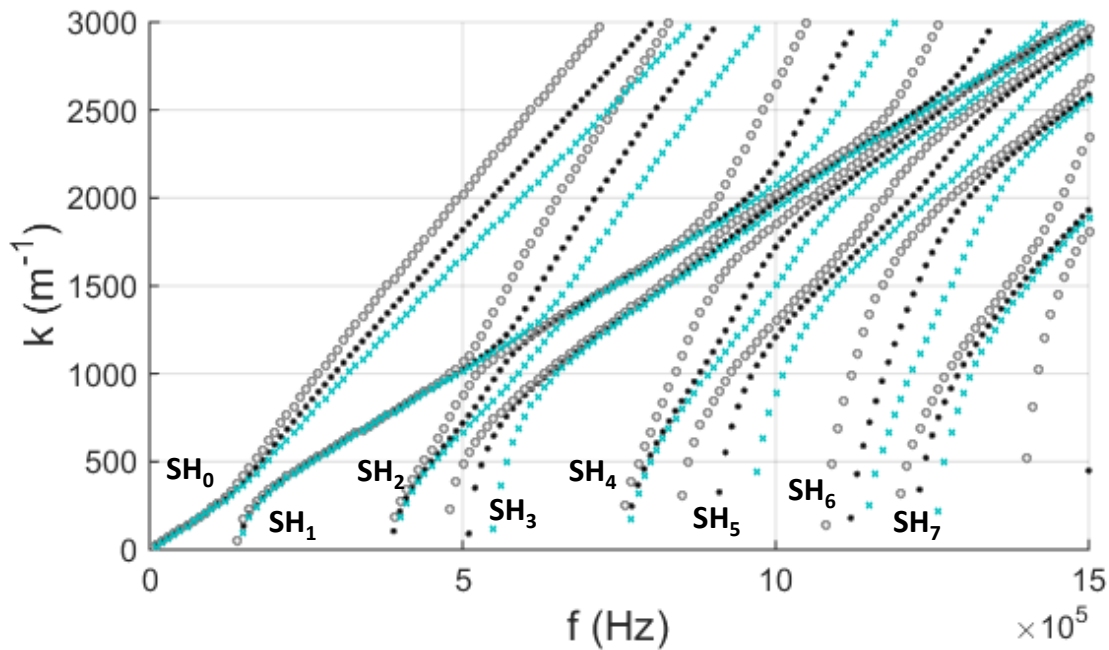


Figure 3-14 : Sensibilité des courbes de dispersion des ondes SH pour la tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy au paramètre C_{44} du composite à -20% (en gris) et à +20% (en bleu).

4. Simulation 2D de la propagation d'une onde SH

L'objectif de cette partie est de développer un modèle 2D plus en rapport avec l'étude expérimentale. Ce modèle devra également servir à prédire le comportement d'un mode SH lors de son interaction avec un défaut de type kissing bond, comme nous le verrons par la suite.

4.1 Description du modèle

Un modèle 2D en régime transitoire (temporel) pour simuler la propagation d'un mode SH donné, à l'image de l'étude expérimentale, a été élaboré sous Comsol Multiphysics. Ce modèle nous permet des comparaisons directes avec les mesures expérimentales et des interprétations similaires à celles faites sur les résultats expérimentaux. Il s'agit de modéliser la tricouche dans le plan de sa section (voir *Figure 3-15*). L'assemblage est composé d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, collée à une plaque de carbone-époxy de 1.8 mm d'épaisseur, par une fine couche de colle époxy de 0.5 mm d'épaisseur.

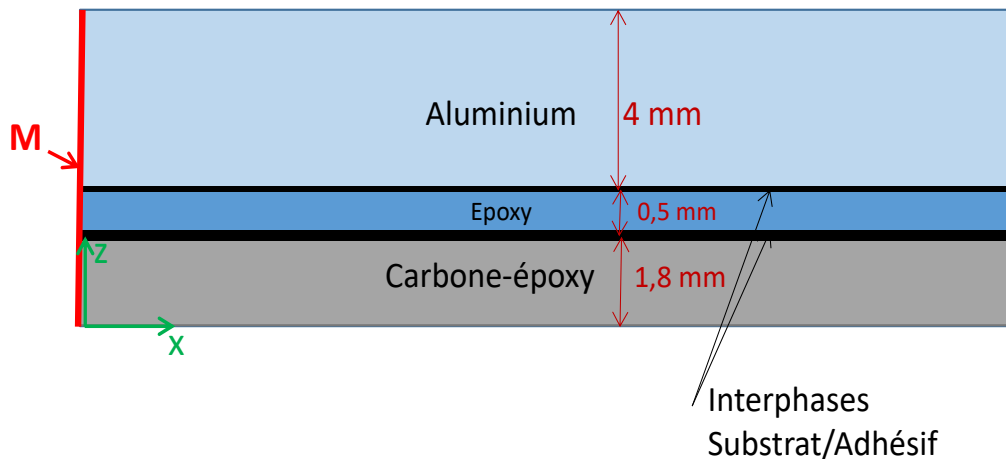


Figure 3-15 : Géométrie de la structure tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy et repère utilisé dans le modèle 2D.

4.2 Implémentation sous Comsol

Pour modéliser le déplacement des ondes SH dans la structure étudiée, on utilise sous Comsol Multiphysics [103] l'équation différentielle suivante :

$$e_a \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla w - \alpha w + \gamma) + \beta \cdot \nabla w + a w = f$$

Où

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

Et où les coefficients e_a , d_a , c , α , β , γ , a et f sont définis de la manière suivante :

$$c = \begin{bmatrix} C_{55} & 0 \\ 0 & C_{44} \end{bmatrix}$$

$$e_a = \rho$$

$$d_a = \alpha = \beta = \gamma = a = f = 0$$

w correspond au déplacement suivant l'axe z.

Comme pour le cas de la simulation 1D, l'équation est écrite pour chaque couche de l'assemblage y compris les interphases substrat/adhésif. Les contraintes aux surfaces libres du guide sont nulles et la continuité des déplacements et des contraintes est assurée.

Une étape primordiale en simulation est le maillage. Le choix de la taille de l'élément dépend directement de la plus petite longueur d'onde étudiée de manière à ce que cet élément soit au moins de taille cinq fois inférieure à cette longueur d'onde [83], [84]. De façon à éviter des phénomènes de diffraction numériques et de décrire avec précision les phénomènes de propagation d'onde le long de notre assemblage, la taille de l'élément ne doit pas changer brusquement d'un domaine à l'autre [104], il faut également assurer un maillage suffisamment fin. De façon générale, on considère 10 mailles par longueur d'onde [105].

Dans le cas de notre guide, il a été choisi de travailler avec des éléments de Lagrange rectangulaires, de taille maximale $\lambda_{\min}/10$ dans l'aluminium, la colle et le composite et de $0.5\mu\text{m}$ dans les interphases substrat/adhésif.

Pour simuler la propagation d'un mode donné, on récupère son déplacement du modèle 1D, ce déplacement sera ensuite multiplié par une fonction harmonique du temps sous la forme suivante :

$$f(t) = A \sin[2\pi f(t - t_0)] \exp\left[-\left(\frac{t - t_c - t_0}{\alpha}\right)^2\right] \quad \text{pour } (t_0 < t < nT + t_0)$$

tels que A est l'amplitude, t_0 est le temps de silence avant l'excitation (ce temps permet d'assurer la stabilité de la solution numérique en ayant moins d'oscillations rémanentes en bout de structure), t_c est l'instant correspondant au maximum du signal et nT correspond à la durée de l'excitation.

Dans notre cas, on définit les valeurs des paramètres suivants :

f : fréquence à définir selon le mode qu'on souhaite générer

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{f} \\ t_0 &= 0.1 * T \\ n &= 4 \text{ cycles} \\ t_c &= nT/2 \end{aligned}$$

Le produit du champ de déplacement 1D et la fonction $f(t)$ noté M sur la *Figure 3-15*, sera appliqué sur la section de la partie gauche du guide. Ce mode se propage dans la direction de propagation (suivant x) sur toute la longueur de la structure, soit 10 cm.

4.3 Validation du modèle de simulation 2D

On s'intéresse au mode SH_4 à la fréquence 900 kHz. Rappelons que l'étude de sensibilité des ondes SH aux paramètres de collage α et β a montré que ce mode est assez sensible à la variation de la qualité de collage à cette fréquence. On étudiera deux cas différents : tout d'abord, le cas où les propriétés de la structure tricouche sont nominales c'est-à-dire ($\alpha=\beta=1$), puis ensuite le cas où l'interphase adhésif/composite est parfaite ($\beta=1$) et l'interphase aluminium/adhésif est dégradée ($\alpha=0.001$).

On applique alors sur la section gauche du modèle le produit du champ de déplacement du mode SH_4 à la fréquence 900 kHz par la fonction $f(t)$ déjà définie au paragraphe précédent. Sur la

Figure 3-16 est présenté le champ de déplacement du mode SH₄ à la fréquence 900 kHz obtenu grâce au modèle 1D pour le cas d'adhésion parfaite (Figure 3-16.(a)) et pour le cas où seule l'interphase aluminium/adhésif a été dégradée ($\alpha = 0.001$ et $\beta = 1$, Figure 3-16.(b)).

L'étude temporelle est réalisée sur un intervalle de [0 – 65 μ s] par pas de 0.1 μ s, la durée de cette étude est calculée en fonction de la longueur maximale de propagation (ici 10cm) et la vitesse transversale des ondes dans l'aluminium. Lors de la simulation, les déplacements de toute la structure sont calculés à la surface d'aluminium sur une distance de propagation de 10 cm. Comme pour les résultats expérimentaux, les déplacements sont regroupés dans une matrice temps-position. Afin d'analyser les résultats dans le plan (k,f) [106], on calcule une double transformée de Fourier.

La Figure 3-17 b correspond au résultat de la FFT-2D appliquée sur la matrice temps-position en Figure 3-17. a. Après superposition des courbes numériques du modèle 1D sur le résultat de la FFT-2D, on constate que le mode SH₄ a été bien généré à la fréquence 900 kHz et correspond au mode SH₄ de la tricouche en adhésion parfaite. De plus, on constate que le mode voisin SH₅ est aussi excité.

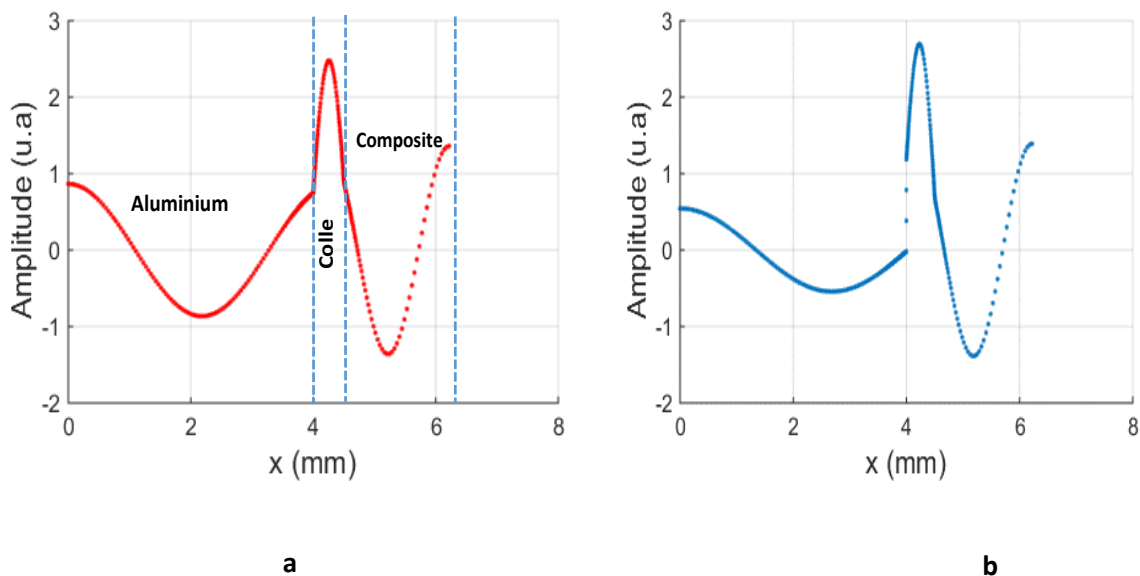


Figure 3-16 : Champ de déplacement du mode SH₄ de la tricouche aluminium/époxy/carbone-époxy à la fréquence 900 kHz, a) pour $\alpha=\beta=1$ et b) pour $\alpha=0.001$ et $\beta=1$.

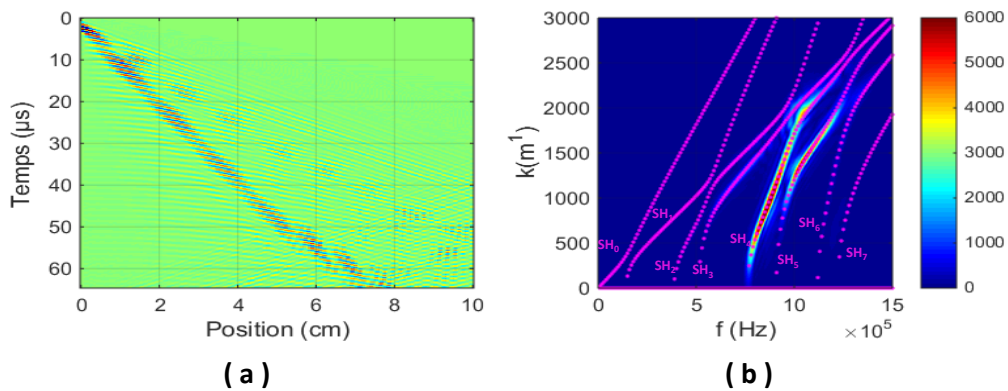


Figure 3-17 : a) Matrice temps-position b) superposition des courbes de dispersion pour $\alpha=\beta=1$ avec les résultats de simulation 2D.

Dans le deuxième cas, nous souhaitons exciter le mode SH_4 d'une tricouche où les propriétés élastiques de l'interface aluminium/adhésif ont été dégradée ($\alpha = 0.001$) à la fréquence 900 kHz. Le mode SH_4 est très sensible à cette fréquence, son nombre d'onde est supérieur de 280 m^{-1} par rapport au nombre d'onde du même mode au cas de l'adhésion parfaite. On effectue le même post-traitement que dans le premier cas et on superpose sur le résultat de la FFT-2D (cf Figure 3-18b), les courbes numériques du modèle 1D. Le résultat de cette superposition fournit le couple de valeur $\alpha=0.001$ et $\beta=1$.

Ces résultats permettent de valider notre modèle 2D et notre capacité à simuler la propagation des modes SH sensibles et insensibles aux propriétés des interphases et donc à la qualité de collage.

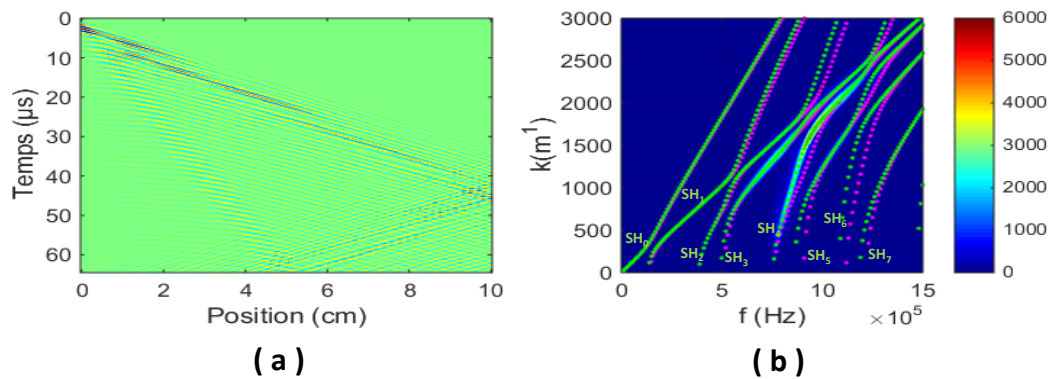


Figure 3-18 : a) Matrice temps-position b) superposition des courbes de dispersion pour $\alpha=1$ et $\beta=0.001$ (en vert) et $\alpha=\beta=1$ (en rose) avec les résultats de simulation 2D.

4.4 Modélisation d'un défaut de type kissing bond (KB)

Dans cette partie, on va s'intéresser aussi bien à l'évaluation de niveaux d'adhésion qu'à simuler et détecter la présence d'un défaut de type KB. Dans un premier temps, nous allons faire des études prédictives, en excitant aussi bien des modes sensibles que des modes insensibles, afin de dégager leur interaction avec la présence d'un KB dont on fera varier la dimension dans le sens de propagation pour atteindre une dimension locale paramétrée en fonction de la longueur d'onde. Ainsi, le modèle 2D conçu a une longueur dans la direction de propagation de 10 cm. Une première étude sera réalisée en considérant la moitié de la structure saine, et l'autre moitié dégradée par simulation d'un kissing bond, ceci dans le but de dégager une signature propre à ce kissing bond par analyse sur une zone de propagation importante devant la longueur d'onde. Par la suite, la dimension du défaut sera réduite et ramenée à la longueur d'onde pour simuler un défaut localisé et essayer ainsi de caractériser sa signature. Ce défaut sera toujours pris selon l'interphase aluminium/époxy. Un kissing bond étant considéré comme un contact sans adhésion, on le modélisera comme une couche d'air, sans masse, caractérisé par sa constante élastique $C_{KB} = 10^5$ Pa. Son épaisseur correspond à celle de l'interphase aluminium/époxy, soit 1 μm . Une comparaison avec l'étude expérimentale sera faite au paragraphe 5.

4.4.1 Interaction d'un mode SH sensible à la qualité du collage avec un défaut de type kissing bond de grande dimension

Jusqu'ici nous avons testé le modèle 2D pour une structure saine et une avec une faible adhésion sur toute la surface côté aluminium. Pour étudier l'influence d'un défaut de type KB dans la structure, toujours du côté aluminium, on va s'intéresser au comportement du mode SH₄, sensible aux niveaux d'adhésion comme montré au paragraphe précédent.

Nous simulons dans un premier temps un défaut de type KB sur toute la moitié de la structure tricouche au niveau de l'interphase aluminium/époxy comme indiqué sur la *Figure 3-19*.

La structure est excitée par un signal harmonique de fréquence 852 kHz sur sa partie gauche (indiqué par M sur la *Figure 3-19*), le mode visé est le mode SH₄. Après sa propagation tout le long de la structure, les déplacements sont récupérés côté aluminium. Chaque zone a été traitée séparément pour évaluer les changements en termes de nombre d'onde et d'amplitude dus à la présence de ce défaut.

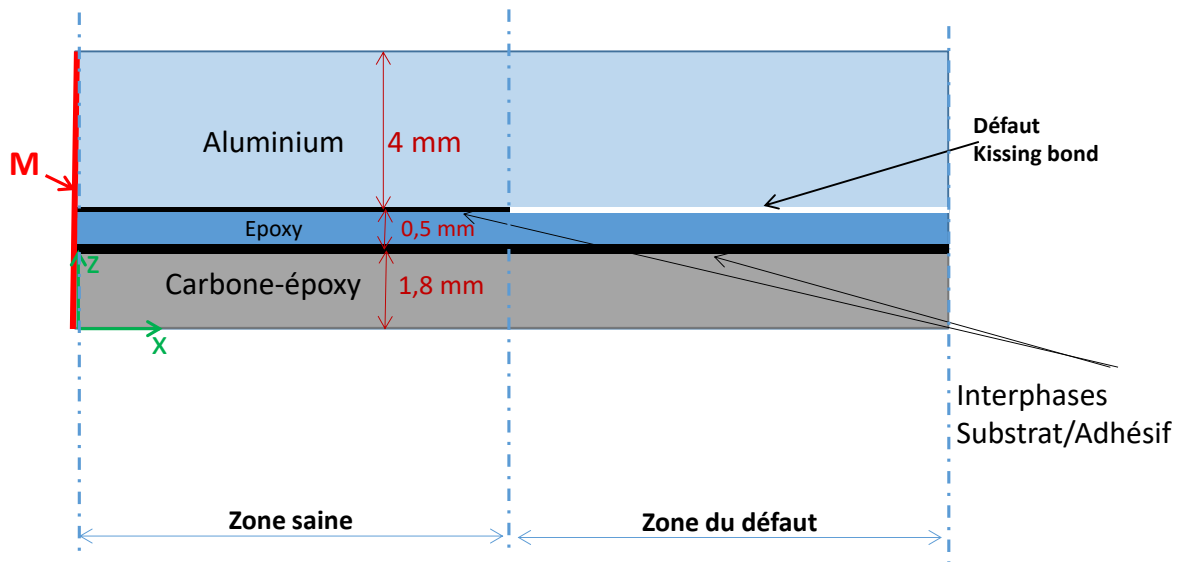


Figure 3-19 : Géométrie de la tricouche avec défaut KB

4.4.1.1 Analyse par identification de modes dans le plan (k,f)

A la *Figure 3-20* sont tracés les résultats de la double FFT de la simulation numérique sur la moitié saine de l'assemblage collé (colonne de gauche). Sur ce résultat, on identifie bien la propagation du mode SH₄ dans cette gamme de fréquence. Après le passage de cette onde SH sur la deuxième moitié avec défaut (colonne de droite), on constate que le mode SH₄ a disparu en donnant lieu à un mode qui n'est pas un mode de la tricouche, et qu'on identifie bien au mode SH₂ de la monocouche d'aluminium d'épaisseur 4mm, en superposant la courbe (en jaune) de ce mode sur le résultat expérimental. Un filtrage en fréquence est également constaté, particulièrement la bande de fréquence en dessous de 800 kHz. La couche d'aluminium se trouverait donc découplée du reste de la structure. Pour confirmer cette hypothèse, on réalise une double FFT sur les déplacements prélevés sur la surface du composite. Le résultat est présenté à la *Figure 3-21*. Sur cette dernière, on constate après superposition des courbes de dispersion de la tricouche aluminium/époxy/composite en rose et de la bicouche composite/époxy en vert qu'il s'agit bien du mode SH₂ de la bicouche, complètement dissociée de la plaque d'aluminium.

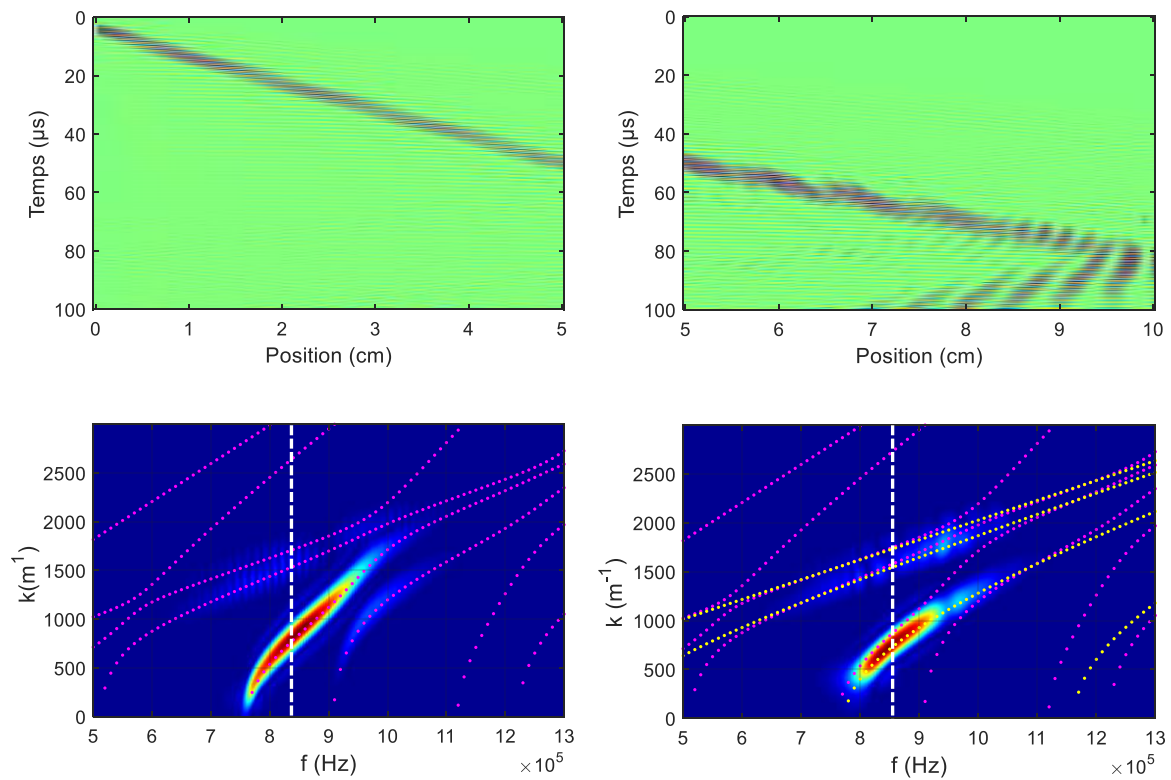


Figure 3-20 : FFT-2D dans la partie saine (colonne de gauche) et dans la partie du défaut (colonne de droite), superposition des courbes de dispersion dans la tricouche (en rose) et celles d'une monocouche d'aluminium d'épaisseur 4mm (en jaune).

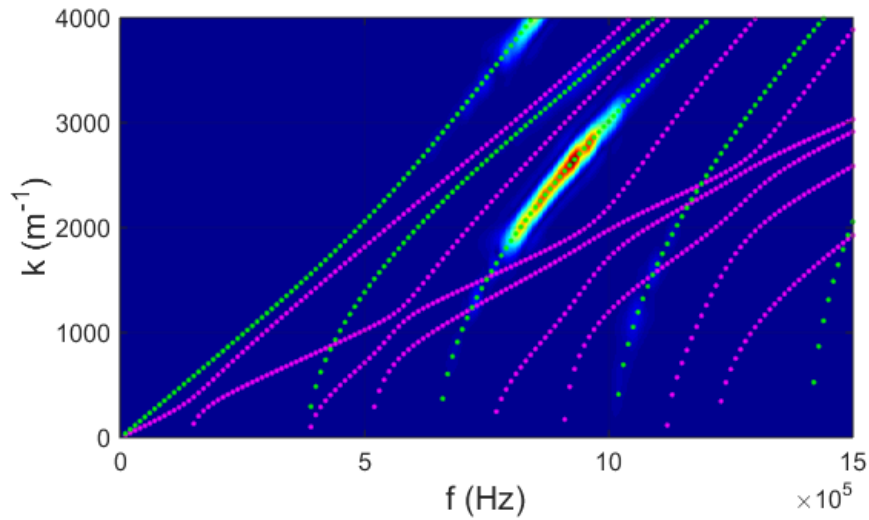


Figure 3-21 : FFT-2D sur les déplacements relevés sur l'interface du composite, superposition des courbes de dispersion dans la tricouche (en rose) et celles d'une bicouche composite(1.8mm)/époxy(0.5mm) (en vert).

Pour étudier la variation du nombre d'onde entre les deux zones saine et dégradée, on réalise une coupe à la fréquence centrale de 852 kHz sur le résultat de la FFT-2D (trait blanc sur la *Figure 3-20*), on obtient ainsi l'amplitude en fonction du nombre d'onde comme le montre la *Figure 3-22* dans la moitié saine en gris puis dans la moitié dégradée en bleu. Comme on peut le constater un décalage net en nombre d'onde est observé ($\Delta k=145 \text{ m}^{-1}$).

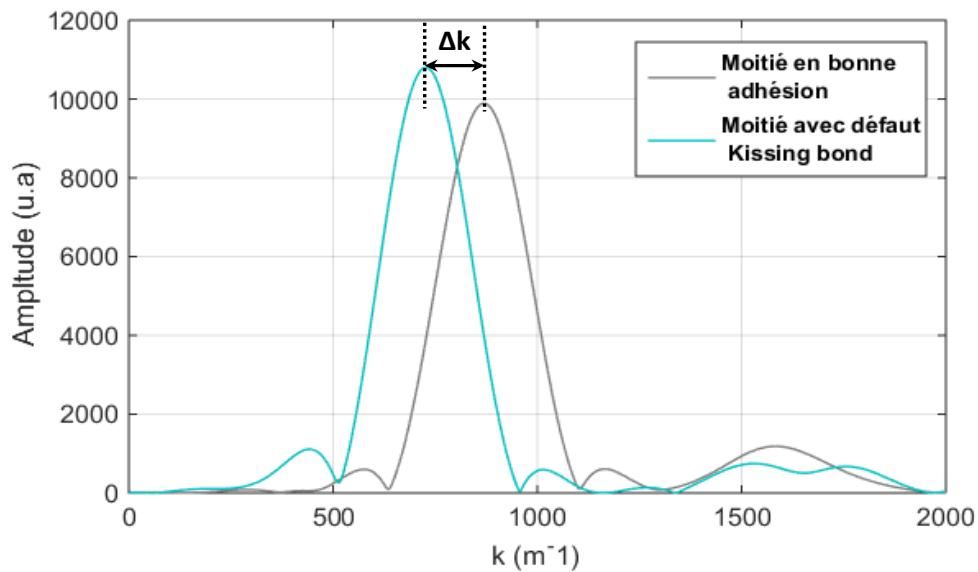


Figure 3-22 : Comparaison de l'amplitude des modes générés à la fréquence 852kHz en amont du défaut (en gris) et dans le défaut (en bleu).

4.4.1.2. Analyse de l'amplitude du mode par FFT spatiale à fenêtre glissante

Une autre manière de détecter la modification des conditions d'interphase serait d'étudier l'évolution de l'amplitude du mode SH₄ en fonction de la position. En effet, on ne devrait pas observer d'atténuation de ce mode lors de sa propagation dans chacune des zones (saine ou dégradée) puisqu'aucune viscosité n'a été introduite dans le modèle, mais une variation de cette amplitude lors de la transition d'une zone à une autre devrait être indicatrice de changement de conditions d'interphase. Dans cet objectif, on réalise un traitement à base de FFT spatiale à fenêtre glissante. On applique une fenêtre rectangulaire de taille 50 points, soit environ 4 longueurs d'onde. Le choix de la taille de la fenêtre reste un compromis entre la précision et la résolution. La fenêtre est ensuite complétée par « zéro-padding » jusqu'à obtenir 2¹⁴ points sur lesquels la FFT spatiale est appliquée, d'un pas $dk = 0.8 \text{ m}^{-1}$. L'amplitude est déduite du tracé du module de la FFT spatiale en fonction des différentes positions parcourues comme la montre la figure ci-dessous.

A la Figure 3-23 est présentée en niveaux de couleurs l'amplitude du mode SH₄ (correspondant au module de la FFT spatiale à fenêtre glissante) en fonction de la position en ordonnées et du nombre d'onde en abscisse. Cette représentation permet ainsi de suivre la propagation du mode dans la structure, qui se fait ici du haut vers le bas de la figure. Dans la zone saine entre 0 et 5cm, on trouve bien la propagation du mode SH₄ sans atténuation et à un nombre d'onde de 870 m⁻¹ comme observé sur l'analyse dans le plan (k,f) du paragraphe précédent. Dans la zone dégradée en présence du KB entre 5 et 10cm, deux comportements sont remarqués : une variation de son nombre d'onde qui atteint la valeur 725 m⁻¹ correspondant à celle du mode SH₁ de la monocouche d'aluminium (comme observé dans l'analyse dans le plan (k,f)), et aussi une forte augmentation de son amplitude, de l'ordre de 20%, lors de sa propagation dans la zone dégradée correspondant à la couche d'aluminium totalement découplée de la bicouche adhésif/composite. Une grande partie de l'énergie du mode SH₄ de la tricouche se trouve donc transmise dans la couche d'aluminium sous forme du mode converti SH₂.

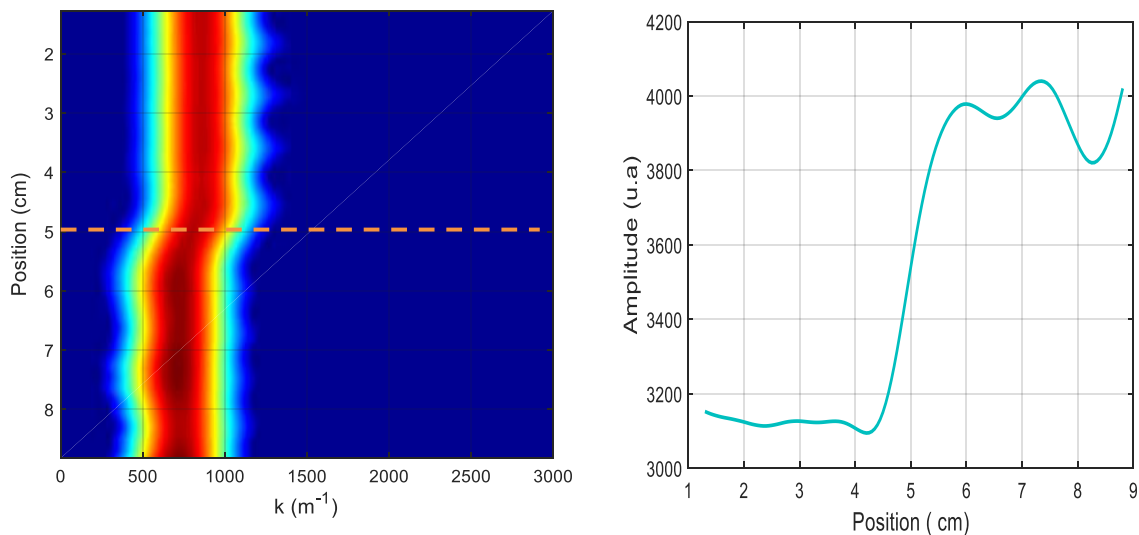


Figure 3-23 : Evolution de l'amplitude du mode SH₄ dans la structure tricouche en présence d'un défaut « kissing bond » sur toute la moitié de la surface côté aluminium.

Les oscillations apparaissant dans la zone dégradée peuvent être expliquées par la conversion du mode SH_4 de la tricouche en mode SH_2 de la monocouche, et dont la formation nécessiterait un régime transitoire spatial.

4.4.2 Interaction d'un mode SH insensible à la qualité du collage avec un défaut de type kissing bond de grande dimension

Pour cette partie, on choisit d'étudier l'interaction du mode SH_3 avec un défaut de type kissing bond à la fréquence 630 kHz. Cette étude est motivée par le fait qu'il est possible d'exciter ce mode expérimentalement, ce qui permet de confronter les résultats de simulation avec ceux de l'expérience.

On procède de la même manière que le paragraphe précédent et on s'intéressera plus particulièrement au profil de l'atténuation du mode SH_3 vu que son nombre d'onde est insensible à la qualité de collage comme le montre la *Figure 3-24*. A la *Figure 3-24* sont tracés les résultats de la double FFT de la simulation numérique sur la moitié saine de l'assemblage collé (colonne de gauche). Sur ce résultat, on identifie bien le mode SH_3 dans cette gamme de fréquence. Après le passage de cette onde SH sur la deuxième moitié avec défaut (colonne de droite), on constate que le mode généré se superpose à la fois à celui du SH_3 d'une tricouche aluminium/époxy/composite-époxy et à celui du mode SH_1 d'une monocouche d'aluminium d'épaisseur 4 mm, ceci confirme que son nombre d'onde n'est pas un facteur discriminant pour distinguer les niveaux d'adhésion dans ce cas.

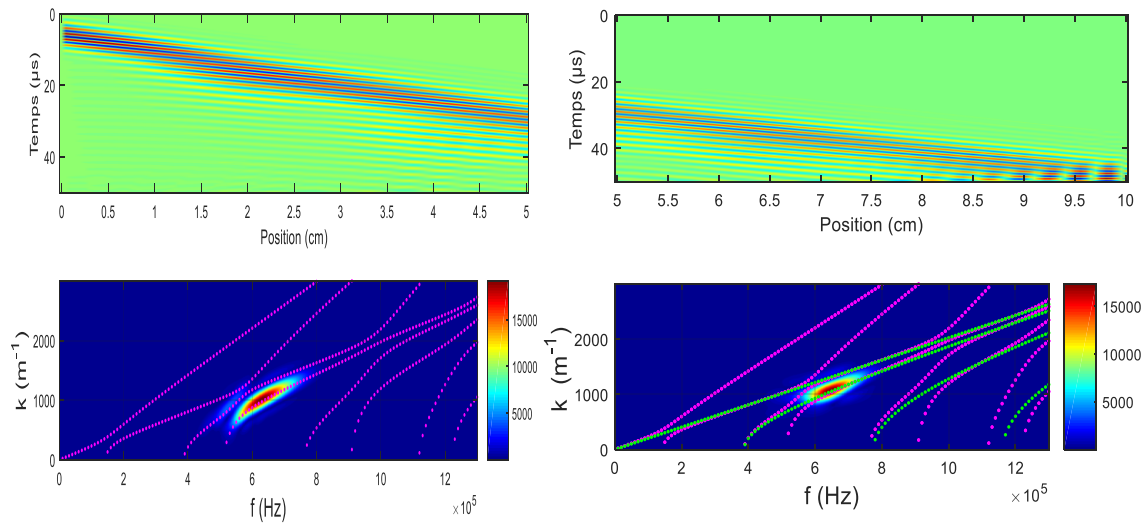


Figure 3-24 : FFT-2D dans la partie saine (colonne de gauche) et dans la partie du défaut (colonne de droite), superposition des courbes de dispersion dans la tricouche (en rose) et celles d'une monocouche d'aluminium d'épaisseur 4mm (en vert).

A la Figure 3-25 est présentée l'évolution de l'amplitude obtenue par fenêtre spatiale glissante du mode SH₃ à 630 kHz dans cette structure. Cette évolution indique une atténuation quasi-nulle (puisque le modèle est sans dissipation) sur la moitié saine (entre 0 et 5 cm). Au niveau de la frontière avec la zone du défaut, une augmentation brutale de l'amplitude est constatée suivie par un comportement oscillatoire de l'amplitude sur la zone du défaut.

Il est possible d'interpréter l'amplitude importante de l'onde SH dans la zone du défaut par une concentration de l'énergie acoustique sur un petit volume, celui de la couche d'aluminium, comme il n'y a plus de couplage entre cette dernière et le reste de la structure. Le relevé des déplacements du mode SH₃ sur la surface du composite cette fois-ci et leur traitement pour tracer l'amplitude du mode SH₃ en fonction de la distance confirme cette hypothèse. Comme on peut le voir sur la Figure 3-26, l'amplitude du mode SH₃ devient quasi-nulle sur la moitié avec défaut, ce qui signifie une très faible transmission d'énergie dans la bicouche composite/époxy et que la plus grande partie de l'énergie a été transmise dans la monocouche d'aluminium. Nous avons réalisé une double FFT spatiale et temporelle sur la moitié avec défaut selon que les données sont récupérées sur la surface d'aluminium (cf

Figure 3-27 : colonne de gauche) ou sur la surface de composite (cf Figure 3-27 : colonne de droite).

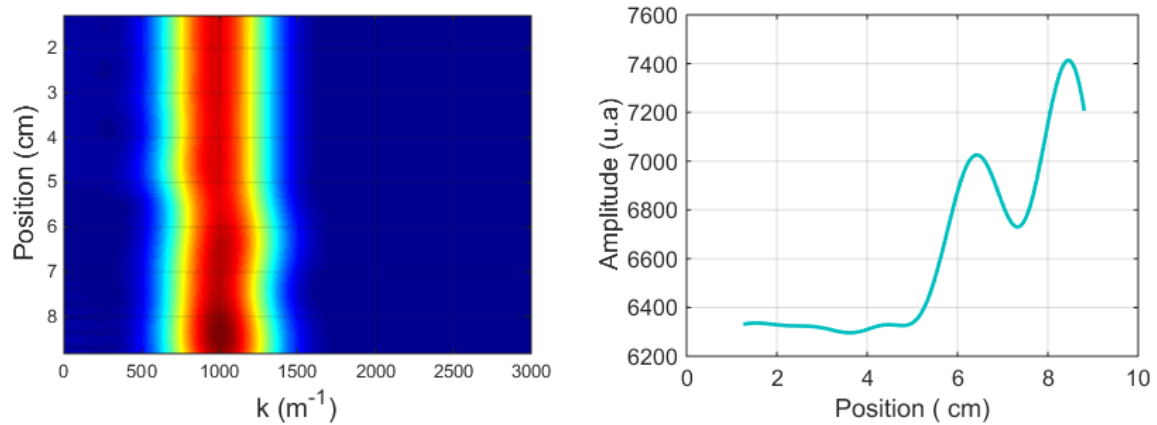


Figure 3-25 : Evolution de l'amplitude du mode SH₃ dans la structure tricouche en présence d'un défaut KB sur toute la moitié de la surface côté aluminium (déplacements récupérés sur la surface d'aluminium).

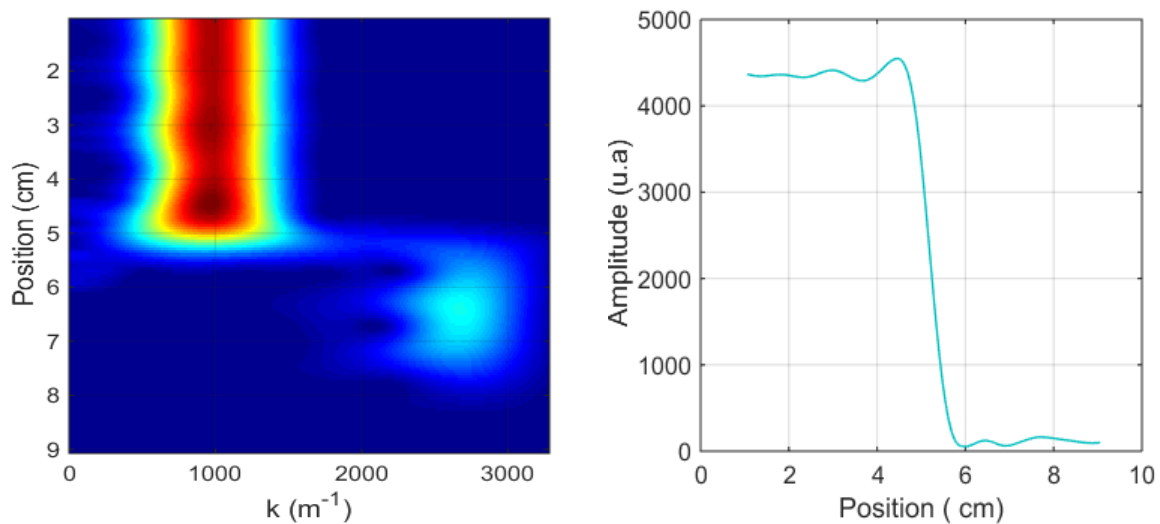


Figure 3-26 : Evolution de l'amplitude du mode SH₃ dans la structure tricouche en présence d'un défaut KB sur toute la moitié de la surface côté aluminium (déplacements récupérés sur la surface du composite).

D'après la Figure 3-27(colonne de gauche), lorsqu'on traite les déplacements récupérés sur la surface d'aluminium sur la moitié dégradée, on ne peut pas affirmer que le

mode généré est un mode de la tricouche ou un mode de la monocouche. En revanche, quand on récupère les déplacements sur la surface du composite sur la moitié dégradée, on constate clairement une conversion du mode SH₃ de la tricouche en mode SH₀ de la bicouche composite/époxy, indiquant le délaminage total entre cette dernière et la couche d'aluminium.

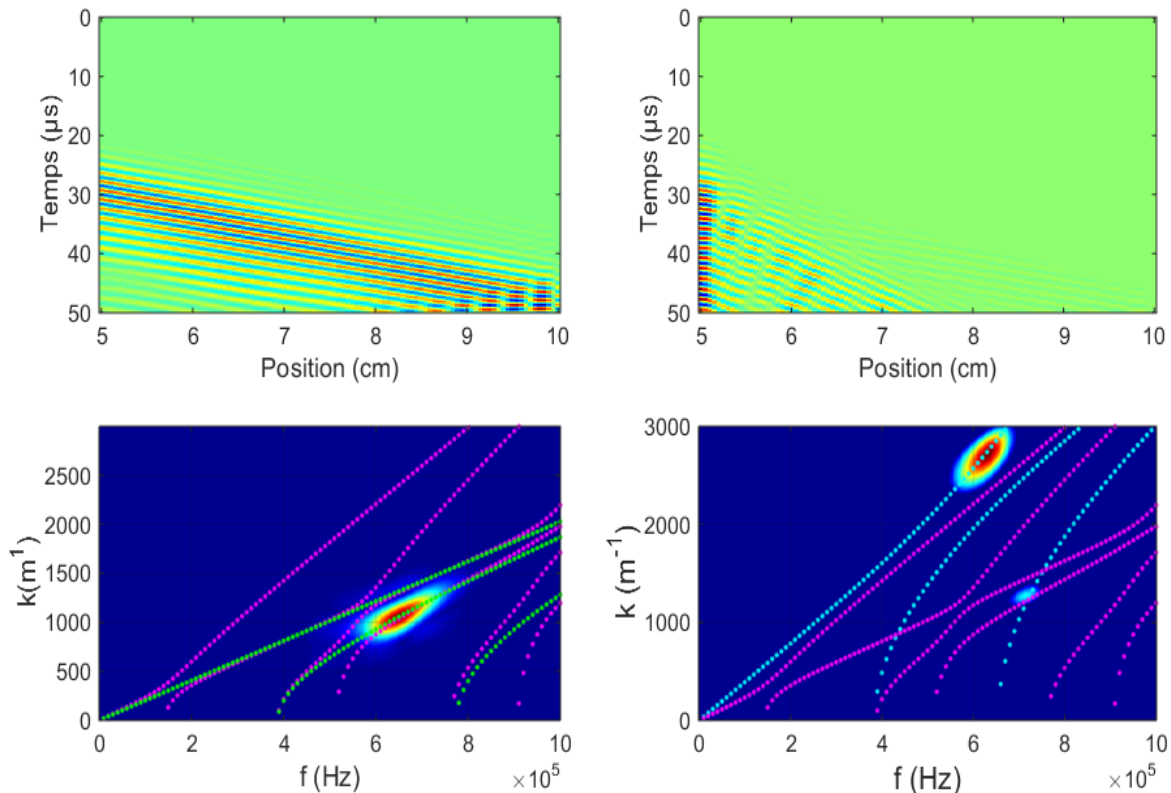


Figure 3-27: Résultat de la FFT-2D sur la moitié du défaut KB sur les déplacements récupérés à la surface d'aluminium (colonne de gauche), à la surface du composite (colonne de droite), superposition des courbes de dispersion de la tricouche en adhésion parfaite en rose, de la monocouche d'aluminium en vert et de la bicouche composite/époxy en bleu.

4.4.3 Etude paramétrique selon la taille du kissing bond

Dans cette partie, on va réaliser une étude paramétrique en réduisant la taille du kissing bond jusqu'à la longueur d'onde dans le but de simuler un défaut localisé. Ce défaut local sera placé au milieu de la structure au niveau de l'interface aluminium/époxy, et de taille $\lambda=6\text{mm}$, 3λ et 5λ , où λ est la longueur d'onde d'un mode SH de nombre d'onde d'environ 1000 m^{-1} .

La structure utilisée dans cette étude paramétrique est identique à celle utilisée précédemment sur la *Figure 3-19*. On rappelle que les propriétés de ce défaut sont celles de l'air et son épaisseur correspond à celle de l'interphase aluminium/époxy, en dehors de ce défaut les paramètres de collage vaut 1 (adhésion parfaite).

4.4.3.1. Cas du mode SH₄, sensible à la qualité du collage

En utilisant le modèle 2D, nous réalisons les simulations de la propagation du mode SH₄ au sein de la structure tricouche (cf *Figure 3-28*) pour une taille de défaut de $\lambda=6\text{mm}$, 3λ et 5λ .

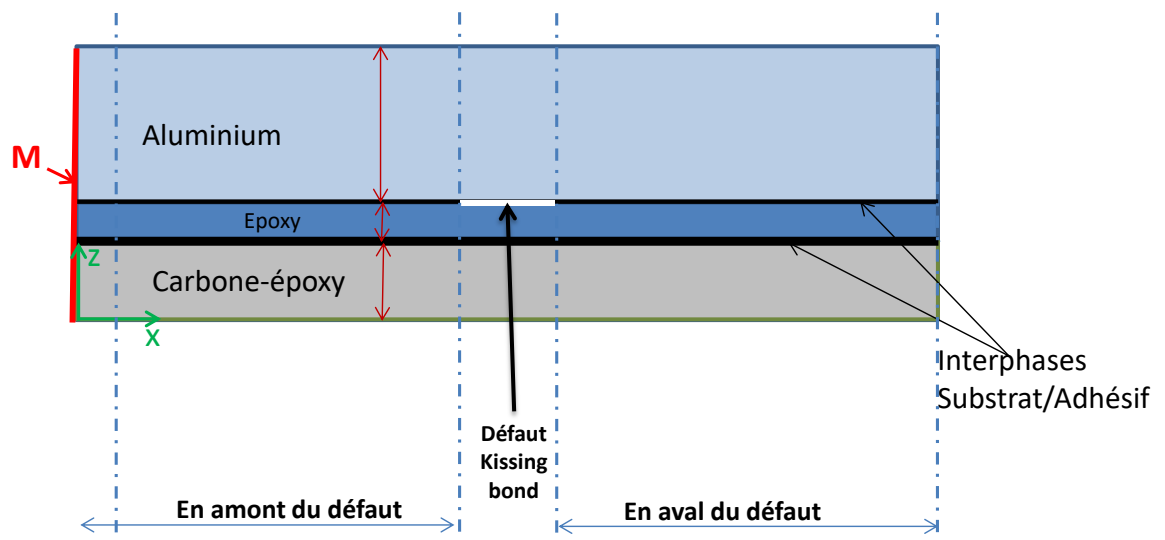


Figure 3-28 : Modélisation d'un défaut KB local.

Les résultats du post-traitement des simulations par fenêtre glissante sont présentés à la *Figure 3-29*. On constate une forte variation du nombre d'onde dans le défaut ainsi que de l'amplitude du mode, et ce quelle que soit la taille du défaut. En sortie du défaut, on retrouve le mode SH₄ de la tricouche, avec une amplitude plus faible et oscillatoire. Comme on l'a vu précédemment, le mode SH₄ de la tricouche se convertit en deux modes lors de son interaction avec le KB. Les oscillations observées après le défaut peuvent être dues à la recombinaison de ces modes convertis en un mode de la tricouche, le mode SH₄.

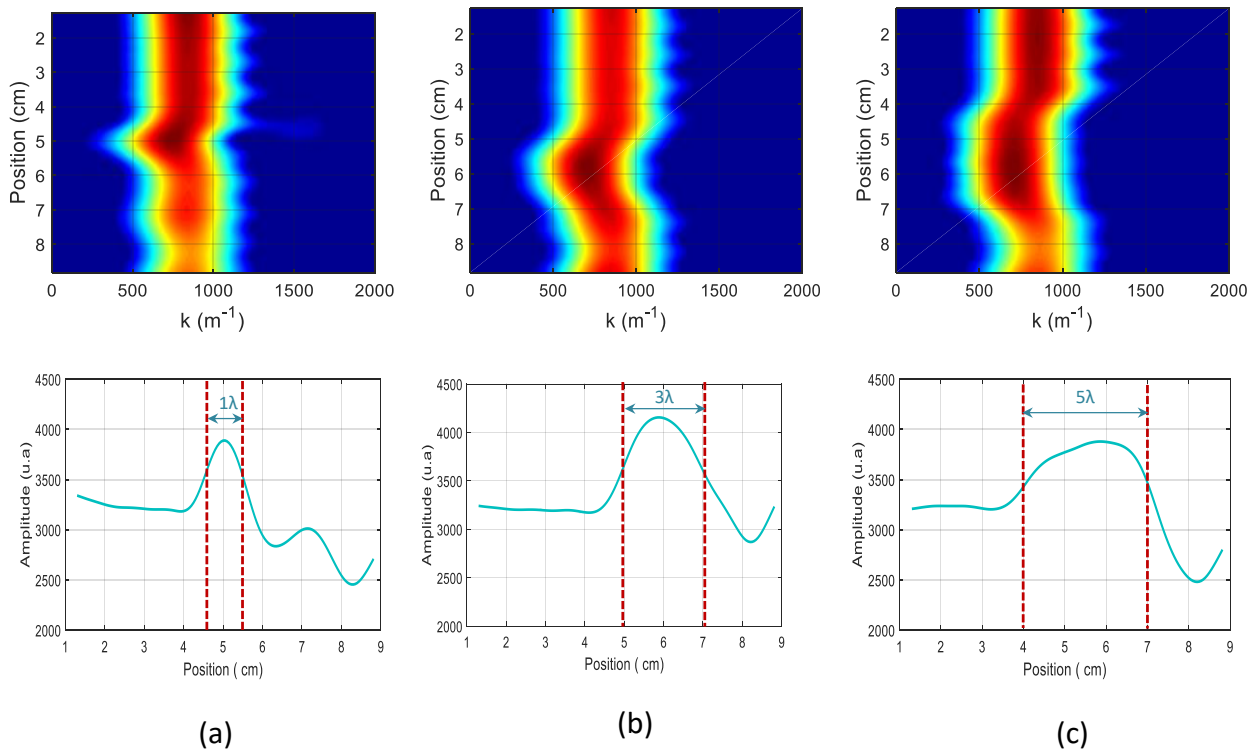


Figure 3-29 : Evolution de l'amplitude du mode SH_4 dans la structure tricouche en présence d'un défaut KB de taille a) 1λ , b) 3λ et c) 5λ .

Par ailleurs, nous avons relevé les amplitudes du mode SH_4 avant et après le défaut, dans le but d'évaluer un coefficient de transmission en fonction de la taille du défaut. Les résultats sont regroupés dans le *Tableau 3-2*. Les mesures montrent que le coefficient de transmission croît avec la taille du défaut.

Taille du défaut	λ	3λ	5λ
Coefficient de transmission	0.95	0.98	0.99

Tableau 3-2: Coefficient de transmission du mode SH_4 à la fréquence 852 kHz.

L'ensemble de ces résultats montre que le mode SH_4 est impacté par la présence d'un défaut de type kissing bond, même si ce dernier est de l'ordre de la longueur d'onde.

4.4.3.2. Cas du mode SH₃, insensible à la qualité du collage

De la même manière qu'on a étudié le mode SH₄, on s'intéresse dans cette partie à l'interaction du mode SH₃ à la fréquence 630 kHz (mode insensible en nombre d'onde) avec la présence d'un défaut localisé. A la *Figure 3-30* est présentée l'évolution de l'amplitude du mode SH₃ dans la structure tricouche par analyse par fenêtre glissante. Le caractère insensible en nombre d'onde du mode SH₃ est confirmé, mais des variations de son amplitude dans la zone du défaut sont observées, d'autant plus forte que la taille du défaut est grande. La transmission au-delà du défaut est très oscillatoire. De la même manière, nous avons évalué un coefficient de transmission de ce mode en fonction de la longueur d'onde. Les résultats sont résumés dans le *Tableau 3-3*. Les mesures montrent un coefficient de transmission qui croît avec la taille du défaut, comme dans le cas du mode SH₄.

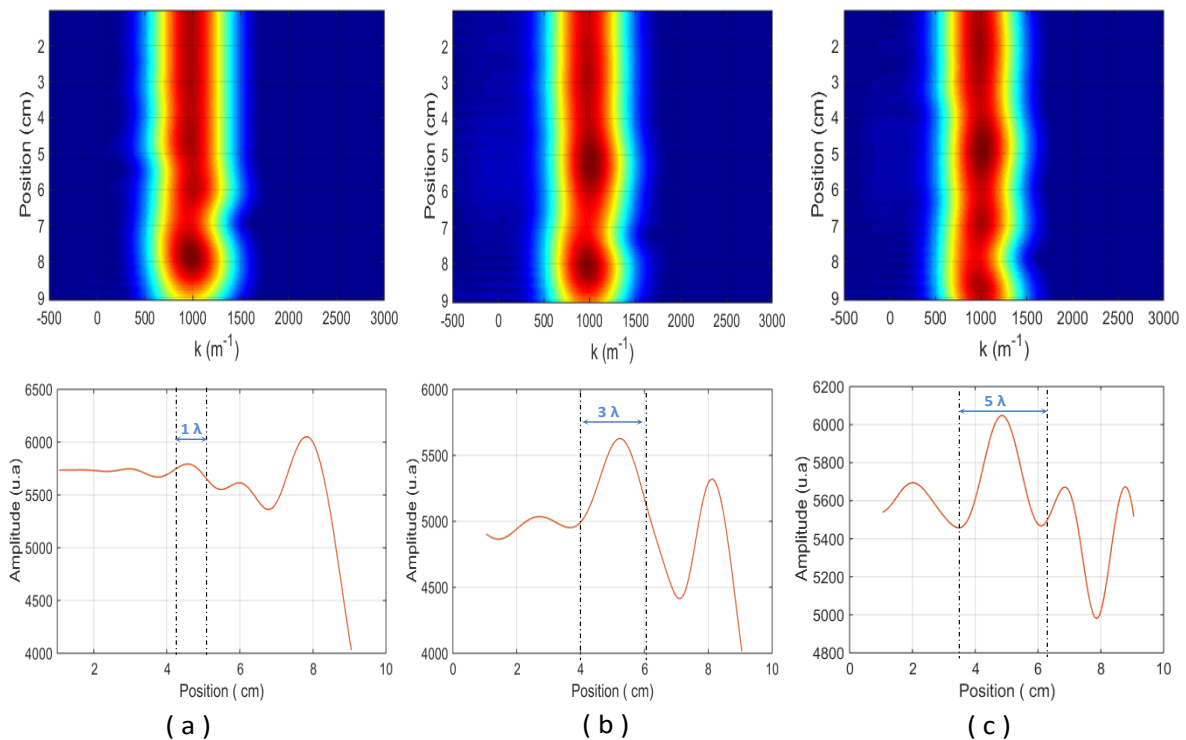


Figure 3-30 : Evolution de l'amplitude du mode SH₃ dans la structure tricouche en présence d'un défaut KB de taille a) 1λ, b) 3λ et c) 5λ.

Taille du défaut	λ	3λ	5λ
Coefficient de transmission	0.8	0.86	0.88

Tableau 3-3: Coefficient de transmission du mode SH_3 à la fréquence 630 kHz.

Ces résultats prédictifs montrent qu'un défaut local modifie le comportement d'un mode SH donné à travers son amplitude, que le mode soit sensible ou insensible et à travers son nombre d'onde si le mode est sensible.

5 Résultats expérimentaux

Cette partie de travail est dédiée aux études expérimentales menées sur un ensemble d'échantillons qui possèdent des niveaux d'adhésion différents. Malheureusement, l'excitation expérimentale des modes SH sensibles à la qualité du collage est très difficile et n'a pu être réalisée, comme cela a été constaté dans d'autres travaux [10], [42]. Une tentative d'explication basée sur des considérations énergétiques sera donnée dans le paragraphe suivant. Par conséquent, nous allons orienter l'analyse des mesures expérimentales sur l'évaluation de l'amplitude des modes SH insensibles générés, afin de dégager la signature des défauts de type kissing bond, et ce grâce à la reproductibilité des mesures permise par le banc expérimental à base de transducteurs EMAT.

5.1 Etude énergétique sur la non excitabilité des modes SH sensibles à la qualité de l'adhésion

Une explication à la non excitabilité des modes SH sensibles peut être donnée par une étude sur la répartition de l'énergie d'un mode donné dans la section de la tricouche, sous Comsol. Cette étude consiste à évaluer le pourcentage d'énergie dans chacune des couches par rapport à l'énergie total du mode, et comparer cette répartition pour plusieurs modes

sensibles et insensibles à la même fréquence, et aussi pour un mode donné en fonction de la fréquence, étant donnée que la sensibilité d'un mode est fonction de la fréquence. La *Figure 3.31* donne cette comparaison à la fréquence 900 kHz pour les modes SH₂ et SH₃, insensibles, et le mode SH₄, sensible. On remarque que le pourcentage d'énergie dans la couche de colle est 3 fois supérieur pour le mode sensible SH₄ que pour les 2 autres modes insensibles, ainsi qu'une proportion beaucoup plus faible dans la couche d'aluminium. Ceci peut expliquer la difficulté à exciter expérimentalement les modes sensibles, surtout quand on insonne la structure du côté aluminium, ce qui est notre cas avec les transducteurs EMAT.

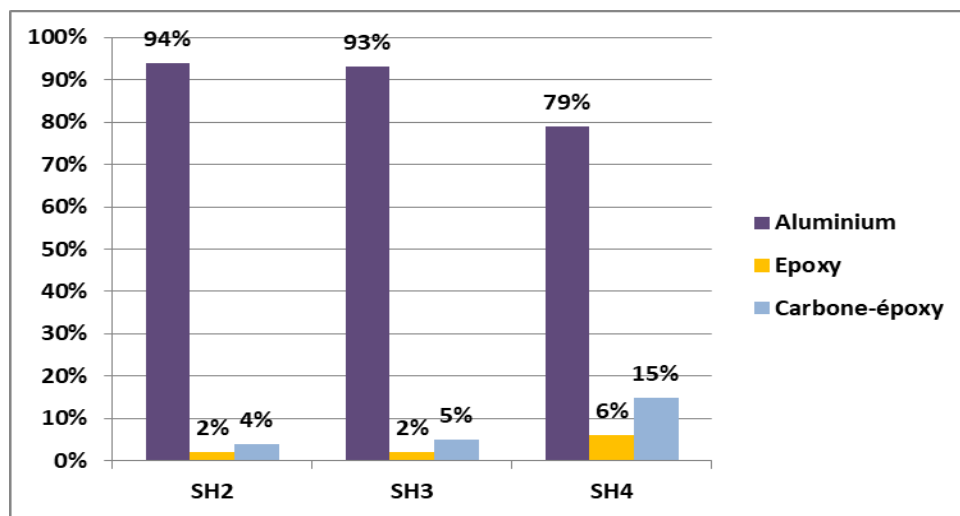


Figure 3-31 : Répartition d'énergie des modes SH₂, SH₃ et SH₄ dans la tricoque aluminium/époxy/carbone-époxy à la fréquence 900 kHz.

Pour confirmer ce constat, il est nécessaire de le vérifier également pour un mode donnée, en fonction de la fréquence. A la *Figure 3-32* est représentée la répartition de l'énergie au sein de chacune des couches pour le mode SH₄ à différentes fréquences auxquelles il est soit sensible soit insensible. D'après l'étude de sensibilité des modes SH, le mode SH₄ est très sensible à la qualité du collage à la fréquence 900 kHz et 1890 kHz et insensible à la fréquence 1110 kHz. On constate d'après la *Figure 3-32* que le pourcentage d'énergie dans la couche d'époxy est beaucoup plus élevé quand il s'agit d'une fréquence à

laquelle le mode est sensible ce qui corrobore l'étude précédente en comparant plusieurs modes.

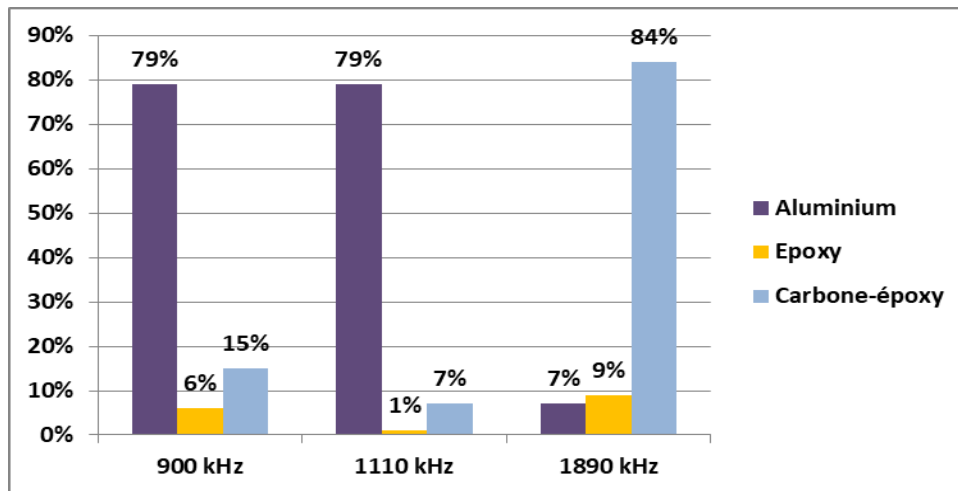


Figure 3-32 : Répartition d'énergie du mode SH_4 dans la tricoque aluminium/époxy/carbone-époxy à différentes fréquences.

5.2 Présentation du banc expérimental EMAT

Dans le cadre de cette thèse, le laboratoire a acquis un banc de mesure EMAT (Electro Magnetic Acoustic Transducers) à base de transducteurs électro-magnéto-acoustique. L'un des avantages de ce dispositif est d'insonner les échantillons sans contact : ce type de mesures permet de s'affranchir des problèmes liés au couplage et donc assure des mesures répétitives des amplitudes des déplacements. Toutefois, les EMAT ont comme principal handicap d'être très peu sensibles à la détection pour des fréquences supérieures au mégahertz [107]. Un EMAT se compose d'un circuit magnétique de type bobine et de plusieurs aimants permanents espacés périodiquement. La bobine permet de produire des courants de Foucault à la surface de la pièce à contrôler. La force de Lorentz en résultant génère des ondes acoustiques dont la polarisation de l'onde est maîtrisée [98].

Chaque transducteur est caractérisé par sa longueur d'onde définie par la périodicité des aimants. Sur la Figure 3-33 est présenté le banc expérimental à transducteurs EMAT.

L'émetteur est alimenté par un signal quasi-harmonique de fréquence centrale du mode SH qu'on souhaite générer. Il est important d'utiliser une amplification (jusqu'à 60 dB) pour pouvoir alimenter l'émetteur avec des tensions élevées (jusqu'à 1200Vpp) tout en essayant de minimiser l'impédance par ajout d'un condensateur en série pour augmenter, à tension donnée, les intensités des courants. Pour la même raison, on place au niveau du récepteur un condensateur en série avec le transducteur. Le récepteur se déplace suivant la direction de propagation, par pas de 0.061 mm, sur une distance de 60 mm. Pour chaque position, l'acquisition du signal est effectuée sur une durée de 160 μ s correspondant à 8000 échantillons temporels, soit une fréquence d'échantillonnage de 50 MHz. La taille de la matrice temps-position est donc de 8000 lignes et 983 colonnes. La *Figure 3-34.a* représente cette matrice avec le temps en ordonnées, les positions en abscisses et l'amplitude en niveaux de couleurs.

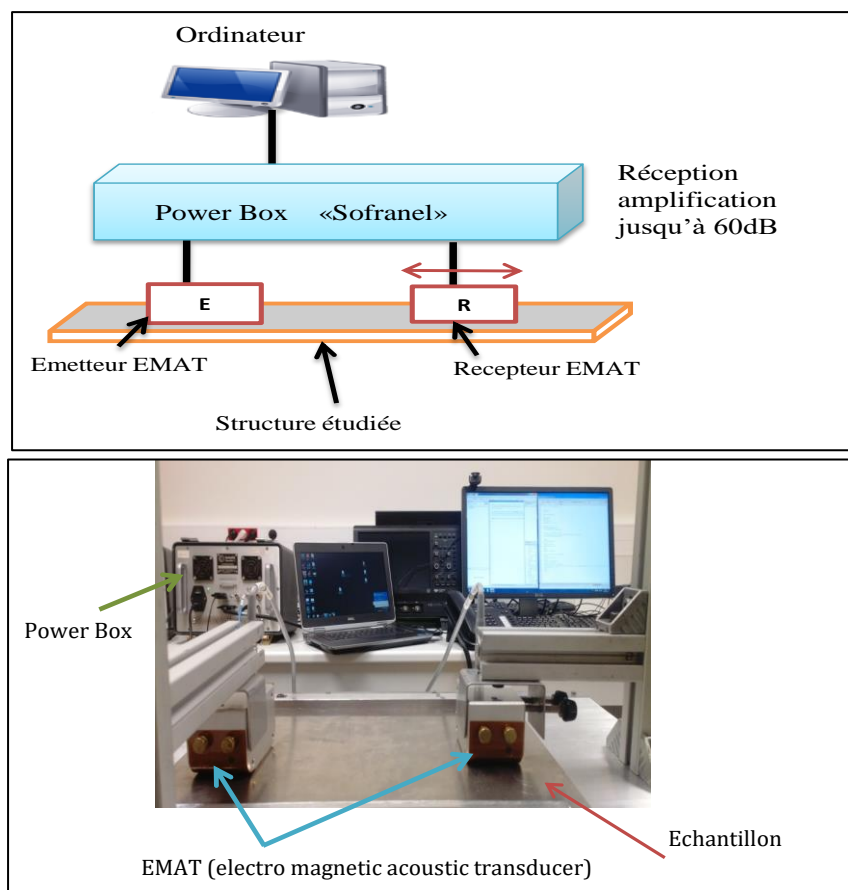


Figure 3-33 : Dispositif expérimental, génération et réception avec transducteur EMAT.

5.3 Reproductibilité des mesures

Avant de s'attaquer à l'étude d'atténuation des modes SH, on étudie la fiabilité de la reproductibilité des mesures d'amplitude par les EMAT. Pour réaliser cette étude, on s'intéresse à l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_N$ dont la description a déjà été faite au paragraphe 4.1.3 du chapitre précédent. Sur cet échantillon, trois expériences sont réalisées dans des conditions similaires. Pour générer le mode SH_3 à la fréquence 630 kHz, on utilise un transducteur en émission de longueur d'onde $\lambda=6.25$ mm et un autre en réception de même longueur d'onde. Le signal d'excitation est quasi-harmonique d'une fréquence centrale de 630 kHz de 10 cycles. Initialement, les deux transducteurs sont alignés, placés face à face et espacés de 1cm, ils sont simplement posés sur l'échantillon sur la surface d'aluminium, aucune pression n'est appliquée. Ensuite, au cours de l'expérience, le transducteur récepteur est translaté dans la direction de propagation par pas de 0.061 mm en s'éloignant de l'émetteur, et en balayant une distance de 6 cm. On calcule la FFT 2D de la matrice temps-position et sur la matrice (k,f) obtenue, on effectue des coupes à différentes fréquences.

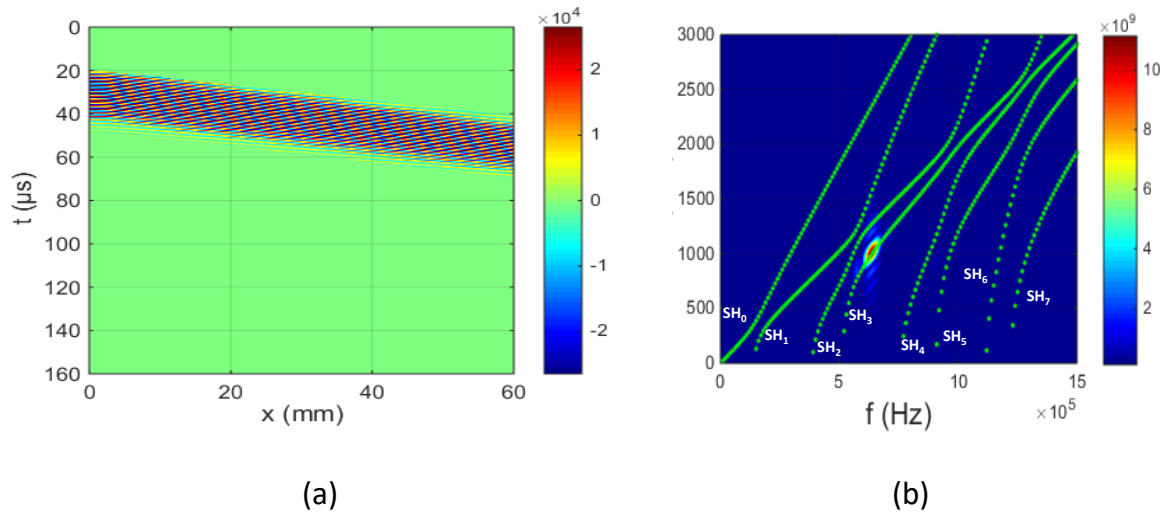


Figure 3-34 : a) Représentation spatio-temporelle des amplitudes des signaux mesurés par les EMAT pour l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_N$. b) Courbes de dispersion des ondes SH pour $\alpha=\beta=1$ superposées à la courbe expérimentale pour $Al_{DSi}E_{100}C_N$.

D'après la *Figure 3-34b*, nous identifions par superposition des courbes numériques au résultat expérimental, le mode SH_3 entre 600 et 670 kHz. On effectue donc des coupes dans cette bande de fréquence pour les 3 expériences (cf *Figure 3-35*).

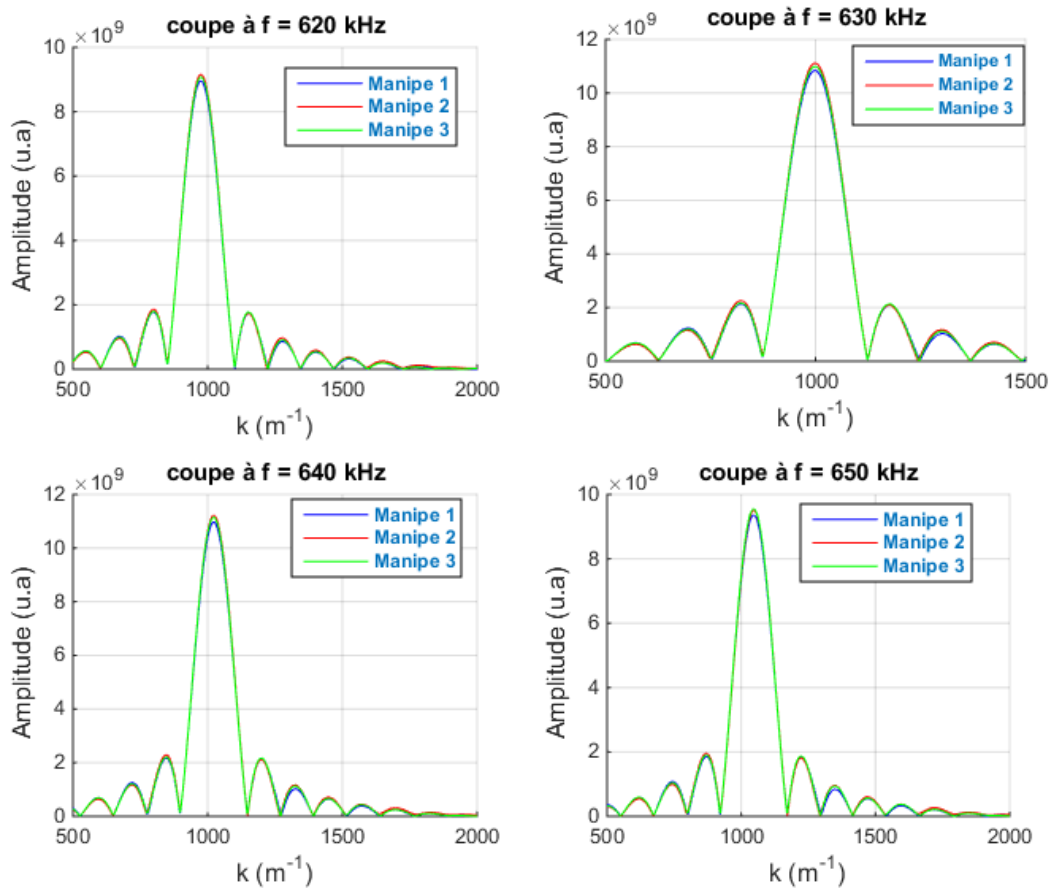


Figure 3-35 : Reproductibilité des mesures des amplitudes du mode SH_3 à différentes fréquences pour l'échantillon de référence $Al_{DSi}E_{100}C_N$.

Les mesures de reproductibilité d'amplitude obtenues avec le banc EMAT sur l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_N$ sont excellentes comme le montre la *Figure 3-35*. En effet, l'écart observé en amplitude est inférieur à 1% d'une expérience à l'autre et ce quelle que soit la fréquence considérée. Ces relevés d'amplitudes permettent donc de vérifier que le banc expérimental EMAT garantit des mesures reproductibles à plus de 99%.

5.4 Etude d'atténuation des modes SH

5.4.1 Echantillons de l'étude

Quatre échantillons ont été utilisés pour cette étude, deux déjà utilisés dans le chapitre précédent ($Al_{DSi}E_{100}C_N$ et $Al_DE_{80}C_N$) et deux nouveaux échantillons correspondant aux modèles simulés sous Comsol : un échantillon avec un kissing bond sur la moitié du tricouche (kissing bond de grande dimension), et un autre avec un kissing bond localisé. Pour le premier, l'interface aluminium/adhésif a été traitée chimiquement par silane sur une moitié, et par un dépôt d'une couche d'agent démoulant sur l'autre moitié, l'interface composite/colle n'ayant subi aucun traitement et l'adhésif a été réticulé à 100%. Pour le deuxième, l'interface aluminium/colle a été traitée par silane, sauf sur sa zone centrale sur une longueur de 30 mm (correspondant environ à 5λ d'un mode SH de nombre d'onde $k=1000\text{ m}^{-1}$), l'interface composite/colle n'ayant subi aucun traitement et l'adhésif a été réticulé à 80%. Cet échantillon sera appelé KB local. Les échantillons étudiés sont récapitulés dans le *Tableau 3-4*.

Echantillons	Traitement de l'aluminium	Traitement du composite	Taux de réticulation de l'époxy
$Al_{DSi}E_{100}C_N$	Dégraissage+silanisation	Aucun	100%
$Al_DE_{80}C_N$	Dégraissage	Aucun	80%
$Al_{\frac{1}{2}DSi-\frac{1}{2}DRA}E_{100}C_N$	Moitié :Dégraissage+silanisation Moitié :Dégraissage+couche de demoulant	Aucun	100%
KB local	En amont et en aval du défaut : Dégraissage Défaut :Dégraissage+couche de demoulant	Aucun	80%

Tableau 3-4: Assemblages tricouches réalisés et nomenclature associée.

Avant d'étudier ces échantillons par ondes SH, on a voulu nous assurer de la présence des défauts tels qu'on a souhaité qu'ils soient réalisés. Un C-scan a été effectué au sein de notre laboratoire sur 2 des 4 échantillons, comme décrit dans le paragraphe suivant.

5.4.2 C-scan pour valider la présence d'une dégradation du collage

Il est possible de contrôler l'adhésion entre deux plaques par la méthode dite « pulse-echo », plus précisément de vérifier l'existence ou non d'une continuité mécanique entre plusieurs couches d'un assemblage. Cette étude a été réalisée au sein de notre laboratoire par Jean Duclos, professeur des universités à l'université Le Havre Normandie, que je remercie beaucoup pour le temps qu'il m'a consacré et pour son aide précieuse dans la mise en place de ces expérimentations.

Un transducteur monoélément focalisant, de fréquence centrale 10 MHz, est disposé à environ 50 mm au-dessus de l'échantillon à tester, plongé dans un bain thermostaté. Ce transducteur insonne l'échantillon en incidence normale sur la surface du composite. La largeur du faisceau est de faible diamètre (inférieure à 3mm), ce qui permet d'explorer finement la plaque. Pour une position du transducteur, un signal réfléchi est recueilli, comprenant plusieurs composantes. La *Figure 3-36* donne un exemple du signal relevé pour l'échantillon $Al_D E_{80} C_N$. Dans ce cas, le signal comprend par ordre d'arrivée : le signal réfléchi en interface eau/composite (1), le signal réfléchi à l'interface plaque composite/colle (2), qui peut être distingué de l'écho réfléchi par l'interface colle/aluminium (3) et enfin l'écho de fond de la plaque d'aluminium (4), non observé dans ce cas. Des signaux complémentaires peuvent arriver ensuite qui sont associés à des réflexions multiples (principalement dans l'aluminium).

Un balayage de la plaque est réalisé automatiquement selon deux axes orthogonaux X et Y du plan, le pas spatial est de l'ordre du millimètre. Le signal réfléchi obtenu pour chaque position est stocké et utilisé pour réaliser un C-scan. Des fenêtres temporelles (ou portes logicielles) sont imposées à des instants où sont attendus les échos mentionnés précédemment. Le logiciel UTwin permet de gérer la position et la largeur de 4 fenêtres indépendantes

associées aux 4 signaux intéressants. A chaque position du transducteur (repérée par X et Y), le signal reçu est échantillonné et stocké. La valeur extrême du signal dans chaque fenêtre est détectée et stockée. L'ensemble des valeurs obtenues dans une fenêtre est disposé sous forme d'une image dans le plan (X, Y) en associant à une différence de potentiel(en volt) une couleur variant du bleu (niveau 0) au rouge (niveau 100). Le niveau 100 est la valeur maximum admise assurant la non-saturation électronique en réception. On obtient donc quatre images G1 (écho 1) à G4 (écho 4) des signaux dont l'analyse précise la qualité des contacts entre matériaux.

A la Figure 3-36, le signal traduit une bonne transmission entre les trois couches de notre guide. En effet, on observe les différents échos à l'interface eau/composite, à l'interface composite/colle et puis à l'interface colle/aluminium.

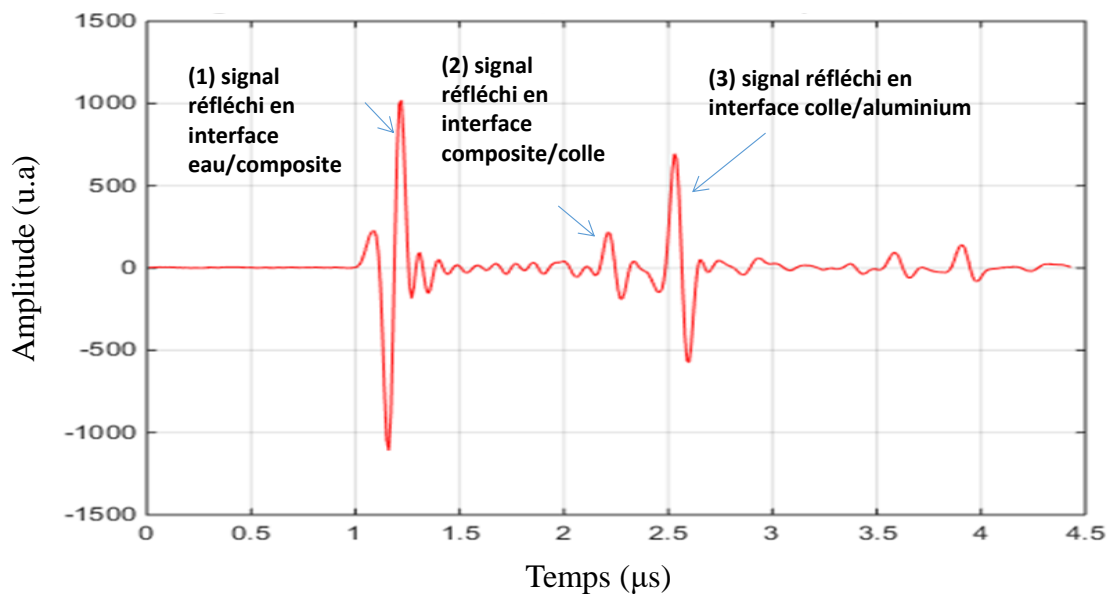


Figure 3-36: Signal temporel de l'échantillon $Al_D E_{80} C_N$.

Le résultat C-scan pour cet échantillon ($Al_D E_{80} C_N$) montre que les signaux 2 et 3 aux interfaces varient peu en amplitude. Il y a donc une bonne transmission entre les trois composants constituant notre assemblage tricouche (cf Figure 3-37).

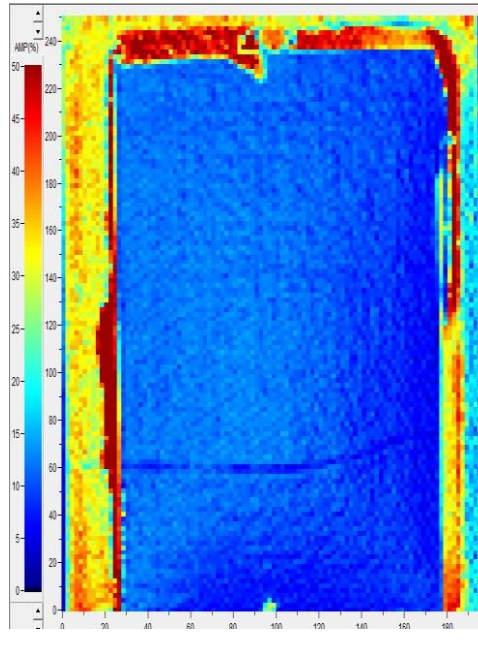


Figure 3-37 : Cartographie C-scan de la fenêtre G3 correspondant à l'écho de fond du composite pour l'échantillon $Al_D E_{80} C_N$.

Pour le cas de l'échantillon ($Al_{\frac{1}{2}DSi_{\frac{1}{2}DRA} E_{100} C_N$), où le collage n'est pas assuré sur la moitié de la surface côté aluminium, on observe l'image G3 (cf Figure 3-38) contenant l'évolution du signal réfléchi à la surface de l'aluminium. Dans la partie inférieure de l'image, le signal est faible signifiant une bonne transmission composite-colle-aluminium. Au contraire, dans la partie supérieure, le même signal est important par manque d'adhésion entre la colle et l'aluminium.

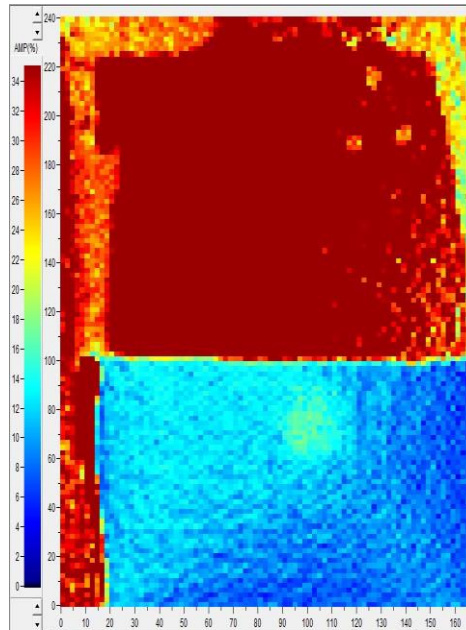


Figure 3-38 : Cartographie C-scan de la fenêtre G3 correspondant à l'interface colle/aluminium pour l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}}^{DSi} / E_{100} C_N$

A la Figure 3-39, les maxima du signal temporel, en rouge, relevés dans la partie supérieure de la Figure 3-38, correspondent aux multiples allers-retours dans le composite. On constate ainsi que la transmission n'est pas assurée entre les trois couches du guide, comparé au signal temporel en bleu relevé dans la partie inférieure de la Figure 3-38, correspondant aux différents échos à l'interface eau/composite, à l'interface composite/colle et puis à l'interface colle/aluminium, ce qui traduit une bonne transmission entre les trois couches. Ces C-scan montrent donc que les échantillons ont été bien réalisés.

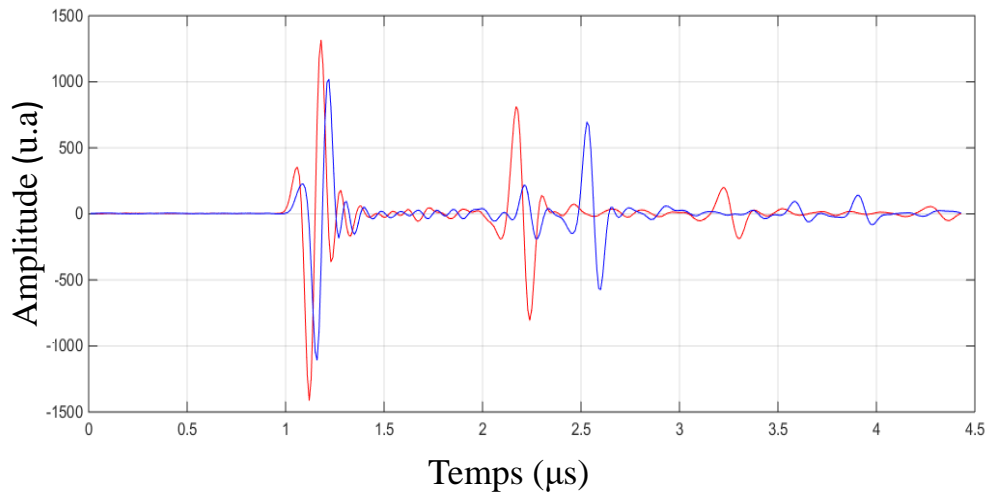


Figure 3-39 : Superposition d'un signal temporel pris dans la moitié dégradée (en rouge) avec un signal temporel pris dans la partie saine (en bleu).

5.4.3 Résultats expérimentaux de l'étude d'atténuation

5.4.3.1 Mode SH₃ à 630 kHz, cas des échantillons Al_DSiE₁₀₀C_N et Al_DE₈₀C_N

A partir des résultats expérimentaux obtenus au paragraphe 5.3, nous pouvons extraire l'information sur l'atténuation du mode généré (ici le mode SH₃) dans les différents échantillons. Le but est de discriminer les différents échantillons par propagation d'un mode SH insensible dans le plan fréquence-nombre d'onde, à travers la variation de son amplitude en fonction de la position, tout en ayant excité ce mode dans les mêmes conditions expérimentales et en appliquant un traitement de signal à l'identique pour tous les échantillons. L'atténuation du mode est déduite du tracé du module de la FFT de chaque signal temporel aux différentes positions. A la Figure 3-40 est présenté le profil d'atténuation du mode SH₃ dans les échantillons Al_DSiE₁₀₀C_N et Al_DE₈₀C_N en fonction de la distance de propagation. Le logarithme de l'amplitude est ensuite tracé et interpolé par un polynôme d'ordre 1 pour extraire l'atténuation k'' qui correspond à la pente de ce fit.

On rappelle que l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_N$ possède a priori un niveau d'adhésion nominal et que l'échantillon $Al_DE_{80}C_N$ un niveau d'adhésion moins bon que l'échantillon de référence. Grâce à la reproductibilité des expériences avec les transducteurs EMAT, on peut comparer l'amplitude à la position initiale de la mesure, qui peut constituer en soi un critère de différenciation. Sur la *Figure 3-40*, on note que l'amplitude associée à l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_N$ est nettement plus grande que l'amplitude de l'échantillon $Al_DE_{80}C_N$. Pour l'échantillon où le niveau d'adhésion est meilleur, l'amplitude à la position initiale est plus importante donc le mode est mieux généré que pour un moins bon niveau d'adhésion. On peut constater également, que l'atténuation du mode SH_3 est plus grande pour l'échantillon $Al_DE_{80}C_N$ que pour l'échantillon $Al_{DSi}E_{100}C_N$. Dans le *Tableau 3-5* sont reportées les atténuations calculées pour ces deux échantillons. Ce résultat met en évidence, encore une fois, l'efficacité du traitement chimique avec du silane pour favoriser une transmission optimale de l'énergie à travers les trois couches du guide et améliorer ainsi le couplage entre le substrat et l'adhésif.

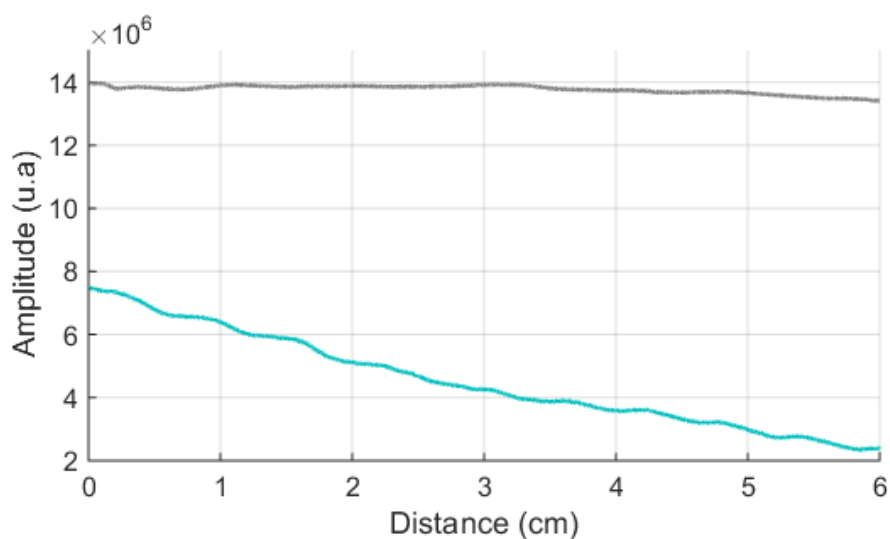


Figure 3-40 : Evolution de l'atténuation du mode SH_3 en fonction de la distance parcourue pour $Al_{DSi}E_{100}C_N$ en gris et pour $Al_DE_{80}C_N$ en bleu.

Echantillon	Coefficient d'atténuation du mode SH ₃	Amplitude à la position initiale
Al _{DSi} E ₁₀₀ C _N	$k'' = 0.45 \text{ m}^{-1}$	$14 \cdot 10^6 \text{ (u.a)}$
Al _D E ₈₀ C _N	$k'' = 17 \text{ m}^{-1}$	$7.14 \cdot 10^6 \text{ (u.a)}$

Tableau 3-5 : Coefficient d'atténuation pour les échantillons Al_{DSi}E₁₀₀C_N et Al_DE₈₀C_N.

Le mode SH₃ est un mode insensible en nombre d'onde aux paramètres de collage α et β aux fréquences étudiées, comme le montre la Figure 3-41, son nombre d'onde est quasiment le même pour les deux échantillons donc le nombre d'onde n'est pas un facteur discriminant pour distinguer les niveaux d'adhésion dans ce cas, comme prévu.

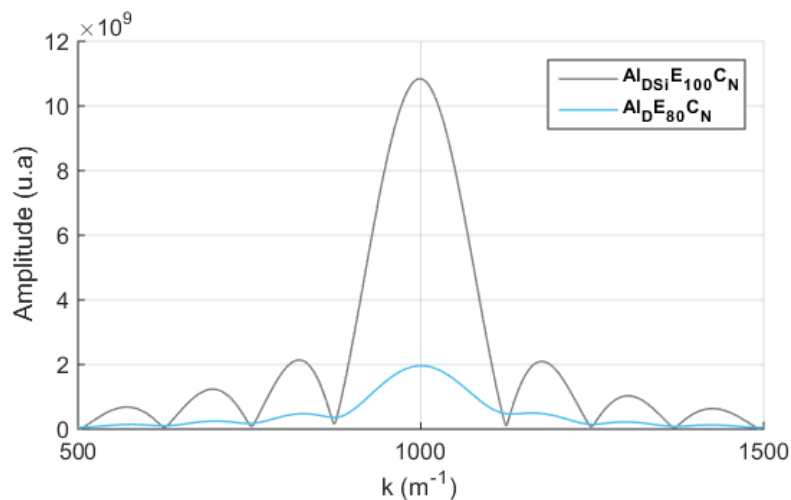


Figure 3-41 : Comparaison d'amplitude du mode SH₃ à la fréquence 630 kHz pour Al_{DSi}E₁₀₀C_N (en bleu) et pour Al_DE₈₀C_N Al (en gris).

Par contre, l'amplitude du mode (même si ici elle est déduite d'une coupe de la représentation tout-fréquence et donc constitue une valeur moyennée sur la distance analysée) est beaucoup plus importante pour l'échantillon de fort niveau d'adhésion, comme montré par les mesures sur la Figure 3-40. Par ailleurs, de nombreux travaux [108]–[110] ont montré qu'il existe une relation entre atténuation et largeur des résonances : plus une résonance est

large, plus l'atténuation est forte. Le *Tableau 3-6* montre que ce raisonnement est validé pour nos deux échantillons. Une autre manière de discriminer les niveaux d'adhésion serait de définir un coefficient χ faisant intervenir la largeur à mi-hauteur de la résonance et son amplitude.

On définit donc χ de la façon suivante:

$$\chi = \frac{\Delta k_{\frac{A_{Max}}{2}}}{A_{Max}}$$

Où $\Delta k_{\frac{A_{Max}}{2}}$ est la largeur à mi-hauteur en nombre d'onde et A_{Max} l'amplitude maximale. Ces deux grandeurs variant en sens inverse, plus χ est grand, plus forte serait l'atténuation. On calcule ce coefficient pour les deux échantillons et on le compare à l'atténuation k'' (cf *Tableau 3-*). On peut constater que l'évolution du k'' suit la même tendance que celle du χ pour les deux échantillons. On peut conclure d'après ce résultat que l'atténuation et le rapport χ est d'autant plus faible quand la qualité du collage est meilleure. Ce résultat peut donc permettre de caractériser l'atténuation à partir de mesures sur la double FFT spatio-temporelle et sans passer par un tracé de l'amplitude en fonction de la position, qui est un traitement de signal plus long.

Echantillons	$\Delta k_{A_{max}/2}$ en (m^{-1})	A_{max} (u.a)	χ ($10^{-8} m^{-1}$)	Coefficient d'atténuation (m^{-1})
$Al_{DSi}E_{100}C_N$	149	1.08E+10	1.38	0.45
$Al_D E_{80}C_N$	158	1.96E+09	8.06	17.00

Tableau 3-6 : Résultat de calcul du χ et k'' pour $Al_{DSi}E_{100}C_N$ et $Al_D E_{80}C_N$.

5.4.3.2 Mode SH₃ à 630 kHz, cas de l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi_{\frac{1}{2}}DRA} E_{100}C_N$

En ce qui concerne l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi_{\frac{1}{2}}DRA} E_{100}C_N$, nous avons tracé à la *Figure 3-*, par analogie à l'étude réalisée sur les deux échantillons précédents, l'évolution de l'atténuation du mode SH₃ en fonction de la distance parcourue en passant de la zone avec une bonne adhésion vers la zone de faible adhésion. D'après cette figure, on peut distinguer clairement ces deux zones grâce au changement brutal d'amplitude au passage d'une zone à l'autre. On observe une amplitude plus importante sur la zone dégradée que sur la zone avec une bonne adhésion ce qui est cohérent avec ce qui a été observé précédemment (cf *Figure 3-24*) : l'énergie transmise de la zone bien collée vers la zone dégradée sera concentrée que sur une seule couche, celle d'aluminium, alors qu'elle était diffusée sur les trois couches constituant l'assemblage dans la zone saine.

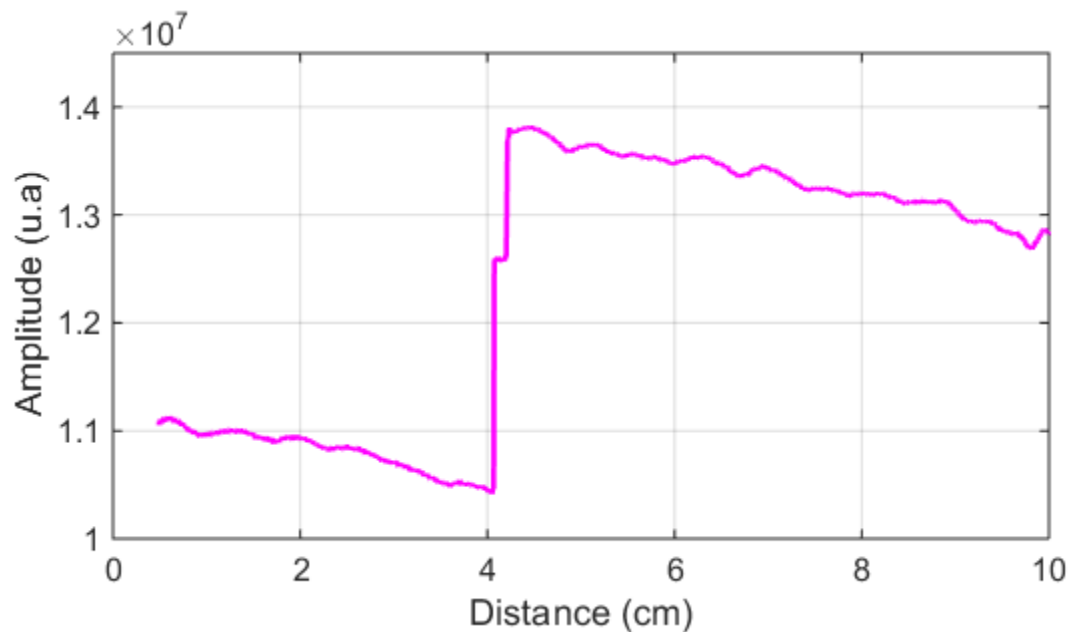


Figure 3-42 : Evolution de l'atténuation du mode SH₃ en fonction de la distance parcourue pour l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi_{\frac{1}{2}}DRA} E_{100}C_N$.

Ensuite, nous avons traité numériquement cette évolution d'amplitude en prenant chaque zone à part, pour extraire l'information sur l'atténuation dans chaque zone. Comme le

montre la Figure 3-43a et Figure 3-43b, le logarithme du module de l'amplitude est tracé en fonction de la distance et puis approché par un polynôme d'ordre 1.

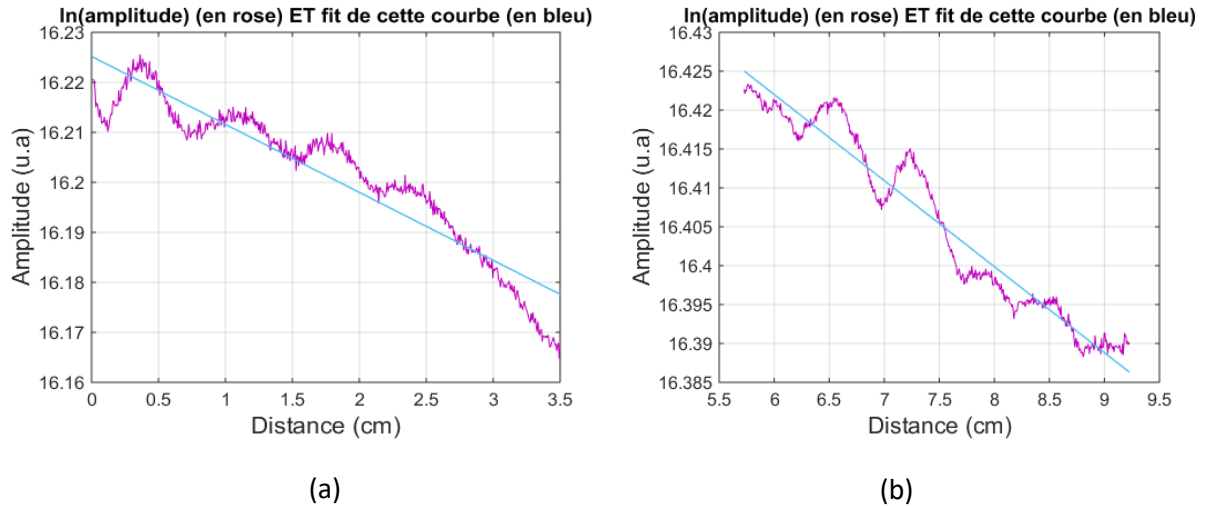


Figure 3-43 : Evolution de l'atténuation du mode SH₃ en fonction de la distance : a) sur la partie avec une bonne adhésion de l'échantillon. $Al_{\frac{1}{2}DSi\frac{1}{2}DRA} E_{100} C_N$ b) sur la partie avec l'adhésion dégradée du même échantillon.

Pour comparer aux résultats de la simulation, une coupe à la fréquence 630 kHz est effectuée sur le résultat de la FFT 2D de chaque zone pour les deux échantillons. La Figure 3-44 représente l'amplitude du mode SH₃ en fonction de k à la fréquence 630 kHz pour les deux zones. On constate encore une fois que le nombre d'onde est identique dans les 2 cas, ce qui confirme la non sensibilité de ce mode en nombre d'onde. Par contre, l'amplitude a nettement augmenté dans la zone du défaut comme cela a été prédit par le modèle numérique. On peut conclure d'après ces deux résultats, qu'une augmentation de l'amplitude est indicatrice de la présence d'un défaut d'adhésion côté aluminium.

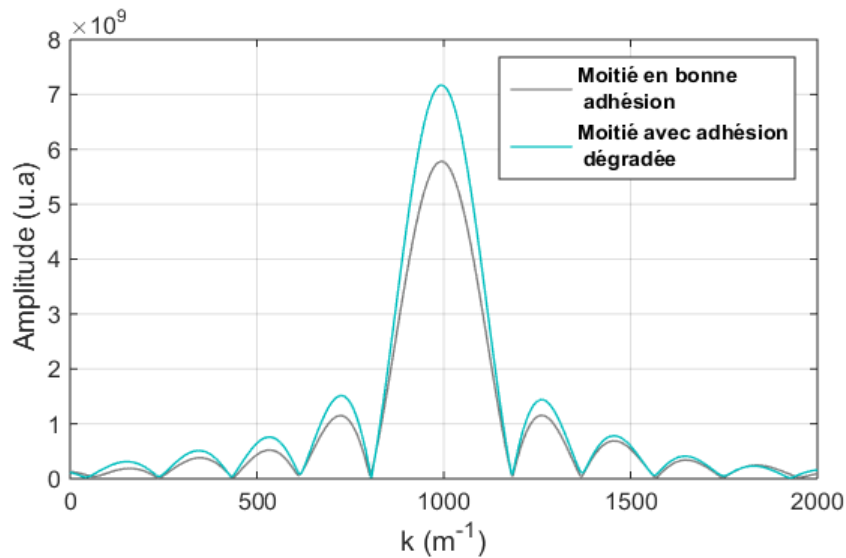


Figure 3-44 : Coupe à la fréquence 630 kHz du mode SH₃ pour l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi_{\frac{1}{2}DRA}}E_{100}C_N$

Ensuite, nous avons calculé de la même manière que pour les deux échantillons précédents, le rapport χ du mode SH₃ à la fréquence 630 kHz pour chacune des zones (saine et dégradée) de l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi_{\frac{1}{2}DRA}}E_{100}C_N$ et on l'a comparé à l'atténuation k'' mesurée pour les deux zones respectivement. Le tableau ci-dessous regroupe les résultats obtenus :

échantillon	Atténuation k'' (m^{-1})		Amplitude à f=630 kHz ($*10^9$ u.a)		χ ($*10^{-8} m^{-1}$)	
	Moitié saine	Moitié dégradée	Moitié saine	Moitié dégradée	Moitié saine	Moitié dégradée
$Al_{\frac{1}{2}DSi_{\frac{1}{2}DRA}}E_{100}C_N$	0.14	0.1	5.78	7.16	3.93	3.15

Tableau 3-7 : Résultat de calcul du χ et k'' pour l'échantillon $Al_{\frac{1}{2}DSi_{\frac{1}{2}DRA}}E_{100}C_N$.

On constate que ces deux critères évoluent de la même manière c'est-à-dire qu'ils décroissent tous les deux dans la zone dégradée.

5.4.3.3 Mode SH₃ à 630 kHz, cas de l'échantillon avec défaut local

Le cas expérimental pour l'échantillon KB local, caractérisé par le dépôt d'une couche de démoulant sur une partie locale de l'interface d'aluminium, est présenté à la *Figure 3-45* où nous avons tracé l'évolution de l'amplitude du mode SH₃ en fonction de la position. Nous avons appliqué la FFT spatiale à fenêtre glissante de taille trois longueurs d'onde. L'amplitude est déduite du tracé du module de la FFT spatiale en fonction des différentes positions parcourues comme la montre la figure ci-dessous. La représentation en niveaux de couleurs (correspondant au module de la FFT spatiale à fenêtre glissante) à la *Figure 3-45* permet de confirmer l'invariance du nombre d'onde sur toute la longueur d'étude, par contre sur la *Figure 3-45* à droite, on constate que le profil d'atténuation du mode SH₃ se trouve modifié entre 3.2cm et 6.2cm correspondant à peu près à la zone de présence du défaut de taille 5λ . En effet, une augmentation d'amplitude est observée dans cette zone indiquant la présence du défaut kissing bond à ce niveau-là. Ce résultat est en accord avec les résultats de simulation.

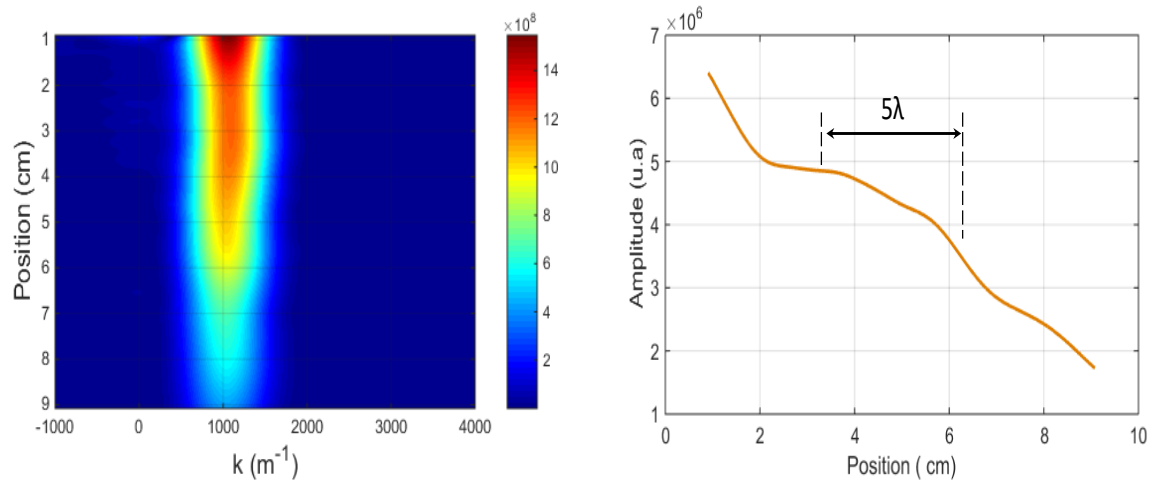


Figure 3-45: Evolution de l'atténuation du mode SH₃ en fonction de la distance parcourue pour l'échantillon KB local.

6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude d'évaluation non destructive par ondes SH d'un assemblage aluminium/époxy/carbone-époxy. Grâce au modèle aux interphases basé sur la méthode des éléments finis à 1D (SAFE), les courbes de dispersion dans le cas de l'adhésion parfaite de notre guide ont été tracées. Ensuite, une étude numérique de sensibilité des modes SH aux différentes propriétés des matériaux constituant l'assemblage a été faite dans l'optique de prédire et de quantifier leur effet sur les courbes de dispersion. En même temps, une prédiction numérique sur la sensibilité des modes SH aux propriétés des interphases, qui traduisent le niveau d'adhésion au sein de la structure, a été faite. La confrontation de ces deux études nous a permis de mettre en évidence les modes qui ont le potentiel de porter la signature du niveau de collage, c'est-à-dire les modes ayant une forte sensibilité aux coefficients α et β par rapport aux propriétés des matériaux. Comme nous n'avons pas pu générer expérimentalement de modes dits sensibles à la qualité de collage, un modèle numérique 2D a été développé pour étudier l'interaction de ce type de mode avec une zone où le niveau d'adhésion est dégradé. Dans un premier temps, ce modèle a été validé pour une bonne adhésion et puis sur une autre avec des propriétés d'interphases dégradées. Les modes détectés après leur propagation le long de l'assemblage se superposent parfaitement avec les courbes 1D dans les deux cas. Cela a permis de valider notre modèle et de pouvoir l'étendre à des cas semblables à nos échantillons ou encore de simuler un défaut local de type KB dans l'assemblage au niveau de l'interface substrat/colle.

L'analyse de l'interaction du mode sensible SH_4 à la fréquence 900 kHz où il présente une forte sensibilité à la qualité du collage avec un défaut local de type KB a permis de tirer deux informations : l'amplitude du mode devient très importante quand il rencontre le défaut et son nombre d'onde se trouve très décalé par rapport aux zones en amont et en aval du défaut. L'étude d'un autre mode (SH_3 à 630 kHz), cette fois-ci insensible à la qualité du collage a permis de retrouver le même comportement en terme d'amplitude, en effet le profil de son amplitude augmente brutalement dans la zone du défaut.

L'étude expérimentale a été menée sur un ensemble d'échantillons ayant des niveaux d'adhésion variés assurés par des traitements de surface différents, le cas du kissing bond local a été considéré également par le dépôt d'une couche de démoulant sur une partie de la surface d'aluminium. Le dispositif expérimental basé sur les EMAT a été employé pour les mesures d'amplitudes des ondes SH, cette étude nous a été possible grâce à la reproductibilité des EMAT que nous avons validée expérimentalement. Ensuite, l'évolution de l'amplitude du mode SH₃ a été tracée pour les différents échantillons de l'étude. Ces mesures ont montré que plus l'atténuation est faible, meilleur est le collage. Concernant le cas du KB, le profil d'atténuation du mode SH₃ à 630 kHz a subi une modification d'amplitude au niveau du défaut. En effet, nous avons constaté qu'au passage du mode SH₃ dans la zone dégradée, son amplitude augmente brutalement en distinguant ainsi la zone en bonne adhésion de celle en mauvaise adhésion. Ces résultats sont en accord avec les résultats de l'étude numérique trouvés précédemment.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions

Au cours de ces travaux de thèse, une démarche de modélisation et de caractérisation non destructive par ultrasons des assemblages collés de type métal/matériau composite a été proposée. Cette méthode a pour finalité l'identification des niveaux d'adhésion, la détermination de l'interface délaminée par ondes de Lamb et la caractérisation des défauts de type kissing bond par ondes SH grâce à la reproductibilité des mesures assurée par les EMAT. Cette méthode est concernée par deux familles d'ondes guidées comme moyen de prospection : les ondes de Lamb et les ondes SH.

Ainsi, le chapitre 2 a été consacré à l'évaluation et la caractérisation par ondes de Lamb du niveau d'adhésion de la structure tricouche composée d'un substrat métallique(plaque d'aluminium d'épaisseur 4mm) collé à une plaque de composite (carbone-époxy d'épaisseur 1.8mm) via une couche de couche d'adhésif (époxy de 0.5mm d'épaisseur). Il a permis de montrer le fort potentiel de ces ondes à évaluer le niveau d'adhésion au sein d'un tel assemblage. En effet, une première étude numérique en utilisant un modèle aux interphases, amélioré en tenant compte de la rugosité de surface de chaque substrat métal ou matériau composite, nous a permis de sélectionner les modes de Lamb qui présentent une forte sensibilité aux paramètres d'adhésion et une sensibilité faible aux propriétés des matériaux, notamment leurs épaisseurs. Ces ondes ont été choisies pour l'étude expérimentale basée sur l'utilisation d'un transducteur de contact en émission et d'un vibromètre laser en réception. Les résultats expérimentaux sur différents échantillons, obtenus par modifications de leurs propriétés adhésives (traitement chimique des surfaces des substrats) et cohésives (taux de réticulation de l'adhésif), ont confirmé la capacité des modes de Lamb à caractériser deux niveaux d'adhésion proches(bon et très bon) en associant des valeurs de α et β allant de 0.001 à 1 et aussi à déterminer de quel côté le collage a été dégradé notamment lorsque la dégradation du collage dans une structure n'est pas symétrique.

L'étude des ondes SH pour l'évaluation non destructive du même collage métal/adhésif/composite est abordée au chapitre 3. Tout d'abord, les courbes de dispersion des ondes SH se propageant tout le long de notre structure ont été tracées, par résolution de

l'équation de dispersion numériquement par la méthode des éléments finis. Le modèle aux interphases a permis également de prédire la sensibilité des ondes SH aux paramètres d'adhésion mais aussi aux propriétés des matériaux. A l'issue de cette étude de sensibilité, nous avons sélectionné les modes sensibles à la qualité de collage. Toutefois, compte tenu des difficultés expérimentales pour exciter ces modes, nous avons développé un modèle 2D qui simule la propagation d'une onde SH au sein de notre assemblage. Des prédictions liées aux comportements de ces ondes (sensible ou pas aux paramètres de collage) lors d'une interaction avec un défaut kissing bond ont été étudiées.

L'étude expérimentale s'appuie sur deux types de mesures : l'amplitude des modes SH insensibles aux coefficients de collage et le coefficient d'atténuation (k'') des modes SH sensibles aux coefficients de collage. Pour effectuer ces mesures expérimentales, nous avons employé des transducteurs EMAT aussi bien en émission qu'en réception. Ces transducteurs nous ont garanti des mesures reproductibles à plus de 99%. Les études expérimentales réalisées ont ainsi permis de différencier clairement deux échantillons différents de par leur conversion d'époxy et de la présence ou pas de silane. En effet, l'amplitude associée à l'échantillon avec traitement du silane et une conversion totale de l'époxy est beaucoup plus grande que l'amplitude de l'échantillon simplement dégraissé et son taux de conversion est partiel. En terme d'atténuation, celle-ci est beaucoup plus importante pour l'échantillon qui est simplement dégraissé que celui traité chimiquement avec du silane. Cela dit, la présence du silane joue un rôle très important pour assurer une bonne transmission acoustique entre les matériaux de l'assemblage. D'autres échantillons ont été traités où la qualité de collage a été volontairement dégradée sur la moitié de la surface côté aluminium. Des différences significatives sont observées pour le profil d'évolution de l'atténuation du mode SH_3 à 630 kHz permet ainsi de bien distinguer les échantillons entre eux et les classer selon leur niveau d'adhésion. Les études numériques ont montré la signature d'un kissing bond localisé, de dimension fonction de la longueur d'onde, soit 1,3 ou 5 longueurs d'onde, aussi bien pour un mode SH sensible qu'insensible. Cette signature a été vérifiée expérimentalement sur l'échantillon dont le kissing bond est de taille 5 longueurs d'onde.

Perspectives

De nombreux axes de travail pourraient constituer une poursuite intéressante des travaux de thèse présentés :

- Etendre le modèle 2D qui tiendrait compte de la viscosité des matériaux et simuler la propagation des ondes de Lamb.
- Développer une méthode de résolution de problème inverse pour récupérer des valeurs plus précises de α et β (paramètres de collage) à partir de données expérimentales. Cette piste a été entamée durant cette thèse sur la base de réseaux de neurones et des résultats préliminaires sur une structure bicouche aluminium/Colle s'avèrent très encourageants.
- D'un point de vue caractérisation acoustique, on pourrait envisager de tester beaucoup plus d'échantillons, industriels notamment, pour confirmer et généraliser les résultats trouvés dans ces travaux. Cela permettra de constituer une base de données capable d'apporter des éléments de réponse pour caractériser des assemblages similaires.
- Du point de vue modélisation numérique, le développement d'un modèle 3D peut être envisagé. En effet, la modélisation 3D permettra de tenir compte de l'ouverture angulaire du faisceau du transducteur. Elle sera ainsi mieux adaptée à reproduire plus précisément les conditions expérimentales. Des comparaisons plus justes peuvent être mises en place entre les mesures et la simulation.
- Des essais mécaniques destructifs pourraient être envisagés pour pouvoir estimer la tenue mécanique de ces assemblages et donner une corrélation avec ceux du CND par ultrasons.

Références

- [1] E. H. Schindel-Bidinelli et H. Jossi, *Pratique du collage industriel*. Tec & Doc-Lavoisier, 1992.
- [2] P. Cognard, « Collage des matériaux: Mécanismes. Classification des colles », *Tech. Ing. Entrep. Ind.*, vol. 4, n° BM7615, p. BM7615–1, 2002.
- [3] E. D. Ceretti et B. Monasse, « Assemblage des matériaux par collage », *Vol AM3758*, vol. 10, 2008.
- [4] C. Gauthier, « Analyse acoustique et physico-chimique du couplage de solides élastiques: étude de l'adhésion dans les collages structuraux », PhD Thesis, Le Havre, 2016.
- [5] E. Siryabe, « Evaluation non destructive par ultrasons de l'adhésion aux interfaces de joints collés », PhD Thesis, Université de Bordeaux, 2016.
- [6] N. Alaoui Ismaili, « Nouvelle méthode numérique de résolution d'un problème inverse: application à l'estimation des paramètres caractéristiques d'un adhésif dans une structure tri-couche », PhD Thesis, Le Havre, 2009.
- [7] E. B. Ndiaye, « Contrôle santé de structures sandwichs composites, caractérisation et évaluation non destructives de l'adhésion et du vieillissement - Simulations par éléments finis et expérimentation par mesure d'impédance et par ultrasons multiéléments », phdthesis, Université du Havre, 2014.
- [8] C. H. Yew and X. W. Weng, « Using ultrasonic SH waves to estimate the quality of adhesive bonds in plate structures », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 77, n° 5, p. 1813–1823, 1985.
- [9] M. V. Predoi, M. Ech Cherif El Kettani, D. Leduc, P. Pareige, and K. Coné, « Use of shear horizontal waves to distinguish adhesive thickness variation from reduction in bonding strength », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 138, n° 2, p. 1206–1213, 2015.
- [10] B. Le Crom, « Evaluation ultrasonore des réparations de structures métalliques par collage de patches composites », thesis, Bordeaux 1, 2010.
- [11] T. A. Barnes et I. R. Pashby, « Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part II—adhesive bonding and mechanical fasteners », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 99, n° 1-3, p. 72–79, 2000.
- [12] G. W. Critchlow and D. M. Brewis, « Review of surface pretreatments for aluminium alloys », *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 16, n° 4, p. 255–275, 1996.
- [13] J. J. Bikerman, *The Science of Adhesive Joints*. Elsevier, 2013.
- [14] C. C. H. Guyott, P. Cawley, and R. D. Adams, « The non-destructive testing of adhesively bonded structure: a review », *J. Adhes.*, vol. 20, n° 2, p. 129–159, 1986.
- [15] T. Kundu, A. Maji, T. Ghosh, and K. Maslov, « Detection of kissing bonds by Lamb waves », *Ultrasonics*, vol. 35, n° 8, p. 573–580, 1998.
- [16] D. Jiao and J. L. Rose, « An ultrasonic interface layer model for bond evaluation », *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 5, n° 8, p. 631–646, 1991.

- [17] C. J. Brotherhood, B. W. Drinkwater, and F. J. Guild, « The effect of compressive loading on the ultrasonic detectability of kissing bonds in adhesive joints », *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 21, n° 3, p. 95–104, 2002.
- [18] A. I. Lavrentyev and S. I. Rokhlin, « Ultrasonic spectroscopy of imperfect contact interfaces between a layer and two solids », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 103, n° 2, p. 657–664, 1998.
- [19] R. L. Vijaya Kumar, M. R. Bhat, and C. R. L. Murthy, « Evaluation of kissing bond in composite adhesive lap joints using digital image correlation: Preliminary studies », *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 42, p. 60-68, avr. 2013.
- [20] R. D. Adams, R. D. Adams, J. Comyn, W. C. Wake, and W. C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. Springer Science & Business Media, 1997.
- [21] P. B. Nagy, « Ultrasonic detection of kissing bonds at adhesive interfaces », *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 5, n° 8, p. 619–630, 1991.
- [22] C. Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace, and A. Vitiello, « Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography », *Eng. Fail. Anal.*, vol. 13, n° 3, p. 380–388, 2006.
- [23] P. N. Marty, N. Desai, and J. Andersson, « NDT of kissing bond in aeronautical structures », in *16th World Conference on NDT*, 2004.
- [24] M. F. Najib and A. S. Nobari, « Kissing bond detection in structural adhesive joints using nonlinear dynamic characteristics », *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 63, p. 46-56, déc. 2015.
- [25] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, and I. López, « Non-destructive inspection of drilled holes in reinforced honeycomb sandwich panels using active thermography », *Infrared Phys. Technol.*, vol. 55, n° 6, p. 491–498, 2012.
- [26] E. Östman and S. Persson, « Application of X-ray Tomography in non-destructive testing of fibre reinforced plastics », *Mater. Des.*, vol. 9, n° 3, p. 142–147, 1988.
- [27] D. J. Bull, L. Helfen, I. Sinclair, S. M. Spearing, and T. Baumbach, « A comparison of multi-scale 3D X-ray tomographic inspection techniques for assessing carbon fibre composite impact damage », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 75, p. 55–61, 2013.
- [28] I. Amenabar, A. Mendikute, A. López-Arraiza, M. Lizaranzu, and J. Aurrekoetxea, « Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades », *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, n° 5, p. 1298–1305, 2011.
- [29] P. Liu, R. M. Groves, and R. Benedictus, « 3D monitoring of delamination growth in a wind turbine blade composite using optical coherence tomography », *Ndt E Int.*, vol. 64, p. 52–58, 2014.
- [30] S. Fidan, T. Sınmazçelik, and E. Avcu, « Internal damage investigation of the impacted glass/glass+ aramid fiber reinforced composites by micro-computerized tomography », *NDT E Int.*, vol. 51, p. 1–7, 2012.
- [31] H. A. Jama, E. M. Hussein, and P. Lee-Sullivan, « Detection of debonding in composite-aluminum joints using gamma-ray Compton scattering », *NDT E Int.*, vol. 31, n° 2, p. 99–103, 1998.
- [32] S. M. Shepard, « Introduction to active thermography for non-destructive evaluation », *Anti-Corros. Methods Mater.*, vol. 44, n° 4, p. 236–239, 1997.

- [33] J. Tashan and R. Al-Mahaidi, « Investigation of the parameters that influence the accuracy of bond defect detection in CFRP bonded specimens using IR thermography », *Compos. Struct.*, vol. 94, n° 2, p. 519–531, 2012.
- [34] M. Omar, M. Hassan, K. Donohue, K. Saito, and R. Alloo, « Infrared thermography for inspecting the adhesion integrity of plastic welded joints », *NDT E Int.*, vol. 39, n° 1, p. 1–7, 2006.
- [35] H. Berglind and A. Dillenz, « Detecting glue deficiency in laminated wood—a thermography method comparison », *NDT E Int.*, vol. 36, n° 6, p. 395–399, 2003.
- [36] M. Genest, M. Martinez, N. Mrad, G. Renaud, and A. Fahr, « Pulsed thermography for non-destructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs », *Compos. Struct.*, vol. 88, n° 1, p. 112–120, 2009.
- [37] S. Johnson, « Thermoelastic stress analysis for detecting and characterizing static damage initiation in composite lap shear joints », *Compos. Part B Eng.*, vol. 56, p. 740–748, 2014.
- [38] D. Mercier, J. Lesage, X. Decoopman, and D. Chicot, « Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing », *NDT E Int.*, vol. 39, n° 8, p. 652–660, 2006.
- [39] B. Helifa, « Contribution à la Simulation du CND par Courants de Foucault en vue de la Caractérisation des Fissures Débouchantes », PhD Thesis, Nantes, 2012.
- [40] M. J. Santos, J. Perdigao, and P. Faia, « Ultrasonic guided waves scattering effects from defects in adhesively bonded lap joints using pitch and catch and pulse-echo techniques », *J. Adhes.*, vol. 84, n° 5, p. 421–438, 2008.
- [41] C. J. Brotherhood, B. W. Drinkwater, and S. Dixon, « The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques », *Ultrasonics*, vol. 41, n° 7, p. 521–529, 2003.
- [42] S. De Barros, A. L. Gama, M. Rousseau, and B. Collet, « Characterization of bonded plates with Lamb and SH waves using a quasi-static approximation », *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 1, n° 4, p. 379–399, 2004.
- [43] Z. Fan, M. Castaings, M. J. Lowe, C. Biateau, and P. Fromme, « Feature-guided waves for monitoring adhesive shear modulus in bonded stiffeners », *Ndt E Int.*, vol. 54, p. 96–102, 2013.
- [44] V. Pagneux and A. Maurel, « Lamb wave propagation in elastic waveguides with variable thickness », *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 462, n° 2068, p. 1315–1339, 2006.
- [45] B. Hosten, « Bulk heterogeneous plane waves propagation through viscoelastic plates and stratified media with large values of frequency domain », *Ultrasonics*, vol. 29, n° 6, p. 445–450, 1991.
- [46] M. J. S. Lowe, R. E. Challis, and C. W. Chan, « The transmission of Lamb waves across adhesively bonded lap joints », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, n° 3, p. 1333–1345, 2000.
- [47] H. Lourme, « Etude des assemblages collés par ondes guidées ultrasonores: étude expérimentale et modélisation par éléments finis », PhD Thesis, Bordeaux 1, 2009.
- [48] D. Leduc, M. E.-C. El-Kettani, L. Attar, M. V. Predoi, and P. Pareige, « Bonding Characterization of a Three-Layer Metal-Adhesive-Metal Using Shear Horizontal Modes

- of Close Dispersion Curves », *Acta Acust. United Acust.*, vol. 103, n° 6, p. 926–931, 2017.
- [49] C. Gauthier, M. E.-C. El-Kettani, J. Galy, M. Predoi, D. Leduc, and J.-L. Izbicki, « Lamb waves characterization of adhesion levels in aluminum/epoxy bi-layers with different cohesive and adhesive properties », *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 74, p. 15–20, 2017.
- [50] L. Attar, D. Leduc, M. Ech Cherif El Kettani, J. Galy, P. Mihai Valentin, et P. Pareige, « Caractérisation de collages structuraux par ondes SH », CFA 14, le Havre, France 195-201, 2018.
- [51] J. P. Jones and J. S. Whittier, « Waves at a flexibly bonded interface », *J. Appl. Mech.*, vol. 34, n° 4, p. 905–909, 1967.
- [52] S. Benyahia-Bentadjine, « Mécanismes de formation et propriétés physico-chimiques et mécaniques des interphases epoxy-diamine/métal », PhD Thesis, Lyon, INSA, 2000.
- [53] M. Coulaud, « Rôle des interfaces et interphases dans les assemblages collés », PhD Thesis, PhD thesis, INSA, Lyon, 2007.
- [54] A. A. Roche, J. Bouchet, and S. Bentadjine, « Formation of epoxy-diamine/metal interphases », *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 22, n° 6, p. 431–441, 2002.
- [55] S. Bentadjine, R. Petiaud, A. A. Roche, and V. Massardier, « Organo-metallic complex characterization formed when liquid epoxy-diamine mixtures are applied onto metallic substrates », *Polymer*, vol. 42, n° 14, p. 6271–6282, 2001.
- [56] B. Hosten and M. Castaings, « Finite elements methods for modeling the guided waves propagation in structures with weak interfaces », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, n° 3, p. 1108–1113, 2005.
- [57] S. I. Rokhlin and Y. J. Wang, « Analysis of boundary conditions for elastic wave interaction with an interface between two solids », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 89, n° 2, p. 503–515, 1991.
- [58] W. Possart, J.K Krüger, C. Wehlack, U. Müller, C. Petersen, R. Bactavatchalou and A. Meiser., « Formation and structure of epoxy network interphases at the contact to native metal surfaces », *Comptes Rendus Chim.*, vol. 9, n° 1, p. 60–79, 2006.
- [59] A. J. Kinloch, M. S. G. Little, and J. F. Watts, « The role of the interphase in the environmental failure of adhesive joints », *Acta Mater.*, vol. 48, n° 18-19, p. 4543–4553, 2000.
- [60] A. Baltazar, L. Wang, B. Xie, and S. I. Rokhlin, « Inverse ultrasonic determination of imperfect interfaces and bulk properties of a layer between two solids », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 114, n° 3, p. 1424–1434, 2003.
- [61] R. Marks, A. Clarke, C. Featherston, C. Paget, and R. Pullin, « Lamb Wave interaction with adhesively bonded stiffeners and disbonds using 3D vibrometry », *Appl. Sci.*, vol. 6, n° 1, p. 12, 2016.
- [62] E. Le Clézio, « Diffraction des ondes de Lamb par des fissures verticales », PhD Thesis, Bordeaux 1, 2001.
- [63] H. Lamb, « On waves in an elastic plate », *Proc R Soc Lond A*, vol. 93, n° 648, p. 114–128, 1917.
- [64] A. H. Nayfeh and D. E. Chimenti, « Free wave propagation in plates of general anisotropic media », *J. Appl. Mech.*, vol. 56, n° 4, p. 881–886, 1989.

- [65] B. W. Drinkwater, M. Castaings, and B. Hosten, « The measurement of A₀ and S₀ Lamb wave attenuation to determine the normal and shear stiffnesses of a compressively loaded interface », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, n° 6, p. 3161–3170, 2003.
- [66] S.-C. Her and Y.-C. Lin, « Assessment of adhesive bond strength using the ultrasonic technique », *J. Adhes.*, vol. 90, n° 5-6, p. 545–554, 2014.
- [67] H. Lamb, « On the flexure of an elastic plate », *Proc. Lond. Math. Soc.*, vol. 1, n° 1, p. 70–91, 1889.
- [68] B. A. Auld, *Acoustic fields and waves in solids*. Рипол Классик, 1973.
- [69] B. Hosten and M. Castaings, « Surface impedance matrices to model the propagation in multilayered media », *Ultrasonics*, vol. 41, n° 7, p. 501–507, 2003.
- [70] M. Bruneau and C. Potel, *Materials and Acoustics Handbook*. John Wiley & Sons, 2013.
- [71] W. T. Thomson, « Transmission of elastic waves through a stratified solid medium », *J. Appl. Phys.*, vol. 21, n° 2, p. 89–93, 1950.
- [72] N. A. Haskell, « The dispersion of surface waves on multilayered media », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 43, n° 1, p. 17–34, 1953.
- [73] I. Bartoli, A. Marzani, F. L. di Scalea, and E. Viola, « Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section », *J. Sound Vib.*, vol. 295, n° 3-5, p. 685–707, 2006.
- [74] D. R. Mahapatra and S. Gopalakrishnan, « A spectral finite element model for analysis of axial–flexural–shear coupled wave propagation in laminated composite beams », *Compos. Struct.*, vol. 59, n° 1, p. 67–88, 2003.
- [75] M. V. Predoi, M. Castaings, B. Hosten, and C. Bacon, « Wave propagation along transversely periodic structures », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, n° 4, p. 1935–1944, 2007.
- [76] B. R. Mace, D. Duhamel, M. J. Brennan, and L. Hinke, « Finite element prediction of wave motion in structural waveguides », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, n° 5, p. 2835–2843, 2005.
- [77] M. Castaings and M. Lowe, « Finite element model for waves guided along solid systems of arbitrary section coupled to infinite solid media », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, n° 2, p. 696–708, 2008.
- [78] K. L. Mittal, « Adhesion measurement of thin films, thick films and bulk coatings », in *Symposium: Headquarters ASTM*, 1978.
- [79] V. Vlasie and M. Rousseau, « Acoustical validation of the rheological models for a structural bond », *Wave Motion*, vol. 37, n° 4, p. 333–349, 2003.
- [80] P. B. Nagy and L. Adler, « Nondestructive evaluation of adhesive joints by guided waves », *J. Appl. Phys.*, vol. 66, n° 10, p. 4658–4663, 1989.
- [81] J. L. Rose, « Ultrasonic waves in solid media cambridge university press, 1999 », *N. Y. NY USA*, 1999.
- [82] J.-F. Imbert, *Analyse des structures par éléments finis*. 1979.
- [83] M. Castaings, C. Bacon, B. Hosten, and M. V. Predoi, « Finite element predictions for the dynamic response of thermo-viscoelastic material structures », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, n° 3, p. 1125–1133, 2004.
- [84] D. N. Alleyne and P. Cawley, « The interaction of Lamb waves with defects », *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 39, n° 3, p. 381–397, 1992.

- [85] W. Brockmann, P. L. Geiß, J. Kligen, and K. B. Schröder, *Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology*. John Wiley & Sons, 2009.
- [86] S. Y. Park, W. J. Choi, H. S. Choi, H. Kwon, and S. H. Kim, « Recent trends in surface treatment technologies for airframe adhesive bonding processing: a review (1995–2008) », *J. Adhes.*, vol. 86, n° 2, p. 192–221, 2010.
- [87] J. Deruelle, « Préparation des surfaces: Introduction », *Tech. Ing. Matér. Métalliques*, n° M1435, p. M1435–1, 1998.
- [88] M. Barquins et K. Fadel, « Adhésion et collage », *Découverte*, vol. 271, p. 31–46, 1999.
- [89] P. R. Underhill and D. L. DuQuesnay, « The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation », *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 26, n° 1-2, p. 62–66, 2006.
- [90] M.-L. Abel, A. N. N. Adams, A. J. Kinloch, S. J. Shaw, and J. F. Watts, « The effects of surface pretreatment on the cyclic-fatigue characteristics of bonded aluminium-alloy joints », *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 26, n° 1-2, p. 50–61, 2006.
- [91] R. Develay, « Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés », *Tech. L'ingénieur Doss. M*, vol. 440, 1992.
- [92] B. B. Johnsen, K. Olafsen, and A. Stori, « Reflection-absorption FT-IR studies of the specific interaction of amines and an epoxy adhesive with GPS treated aluminium surfaces », *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 23, n° 2, p. 155–163, 2003.
- [93] L. Attar, D. Leduc, M. V. Predoi, and J. Galy, « Evaluation of the bonding quality in a metal composite structure using lamb waves », *ICSV26, 7-11 July 2019, Montréal, Canada*.
- [94] M. Castaings, « SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion », *Ultrasonics*, vol. 54, n° 7, p. 1760–1775, 2014.
- [95] J. Ding, B. Wu, and C. He, « Reflection and transmission coefficients of the SH0 mode in the adhesive structures with imperfect interface », *Ultrasonics*, vol. 70, p. 248–257, 2016.
- [96] S. Dixon, C. Edwards, and S. B. Palmer, « A laser-EMAT system for ultrasonic weld inspection », *Ultrasonics*, vol. 37, n° 4, p. 273–281, 1999.
- [97] K. Arun, R. Dhayalan, K. Balasubramaniam, B. Maxfield, P. Peres, and D. Barnoncel, « An EMAT-based shear horizontal (SH) wave technique for adhesive bond inspection », in *AIP Conference Proceedings*, 2012, vol. 1430, p. 1268–1275.
- [98] J. R. Bernstein and J. B. Spicer, « Hybrid laser/broadband EMAT ultrasonic system for characterizing cracks in metals », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 111, n° 4, p. 1685–1691, 2002.
- [99] P. Jiang, R. E. Apfel, and E. C. Everbach, « Mixture laws for ultrasonic tissue characterization », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87, n° S1, p. S115–S115, 1990.
- [100] J. Achenbach, *Wave Propagation in Elastic Solids*. Elsevier, 2012.
- [101] D. Royer et E. Dieulesaint, *Ondes élastiques dans les solides: propagation libre et guidée*. Masson, 1996.
- [102] V. Vlasie, S. De Barros, M. Rousseau, and L. Champaney, « Ultrasonic rheological model of cohesive and adhesive zones in aluminum joints: validation by mechanical tests », *Arch. Appl. Mech.*, vol. 75, n° 4-5, p. 220–234, 2006.
- [103] *COMSOL Multiphysics Modeling Software, User Manual, COMSOL Inc., 2018.* .

- [104] M. B. Drozd, « Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media », PhD Thesis, Imperial College London, 2008.
- [105] G. Dhatt et J. L. Batoz, « Modélisation des structures par éléments finis: poutres et plaques », 1990.
- [106] D. Alleyne and P. Cawley, « A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 89, n° 3, p. 1159–1168, 1991.
- [107] P. R. Murray and R. J. Dewhurst, « Application of a laser/EMAT system for using shear and LS mode converted waves », *Ultrasonics*, vol. 40, n° 1-8, p. 771–776, 2002.
- [108] H. Überall, *Acoustic Resonance Scattering*. CRC Press, 1992.
- [109] R. Fiorito, W. Madigosky, and H. Überall, « Resonance theory of acoustic waves interacting with an elastic plate », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 66, n° 6, p. 1857-1866, déc. 1979.
- [110] S. Derible, « Caractérisation complète des résonances acoustiques par une nouvelle méthode fondée sur le diagramme d'Argand », thesis, Le Havre, 1995.