N° d'ordre : 4024

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

par **Bénédicte LE CROM**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : **Mécanique**

Evaluation ultrasonore des réparations de structures métalliques par collage de patchs composites.

Date de soutenance : 10 mai 2010

Après avis de :

M.	J.L. IZBICKI, professeur, université du Havre,	**Rapporteurs**
M.	G. CORNELOUP, professeur, université de la Méditerranée,	

Devant la commission d'examen formée de :

M.	M.E.R. SHANAHAN, professeur, université de Bordeaux,	**Président**
M.	J.L. IZBICKI, professeur, université du Havre,	**Rapporteurs**
M.	G. CORNELOUP, professeur, université de la Méditerranée,	
M.	G. RAIMONDI, ingénieur, DGA Techniques Aéronautiques,	**Examinateurs**
M.	M. CASTAINGS, professeur, université de Bordeaux	

- 2010 -

Remerciements

Je souhaite commencer par remercier Marc Deschamps, Directeur de Laboratoire de Mécanique Physique ainsi que tout le personnel pour m'avoir accueillie dans ce laboratoire.

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe Ultrasons Matériaux, coordonnée par Bernard Hosten puis Michel Castaings.

Je tiens à remercier messieurs Jean-Louis Izbicki, Professeur de l'Université du Havre, et Gilles Corneloup, Professeur de l'Université de la Mediterrannée, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce mémoire.

Mes remerciements vont également à Martin Shanahan, Professeur de l'Université Bordeaux 1, et Gilles Raimondi, Ingénieur à la DGA Techniques Aéronautiques, pour avoir accepté de participer au jury de thèse ainsi que pour avoir suivi et porté de l'intérêt aux différentes avancées de mon travail.

Je souhaite rendre hommage à Bernard Hosten pour l'intérêt et le temps qu'il m'a consacrés.

Merci à Michel Castaings, mon directeur de thèse, pour avoir suivi et encadré mon travail ainsi que pour m'avoir aiguillée dans mes choix professionnels.

Et puis merci aux doctorants du bureau, Hughes, Damien et Mathieu en particulier pour les pauses café, parfois salvatrices, sans oublier Christine pour m'avoir sauvée lorsque les manips faisaient de la résistance, merci à Béa et Sandrine pour avoir toujours été là, merci à Cathy pour sa gentillesse, merci à Isa pour les discussions (huiles essentielles, cosmétiques maison et tout et tout ...) et tous les bons conseils pendant la pause déjeuner.

Enfin un gros merci à mes amis et ma famille et tout particulièrement à mon mari Guillaume et à ma fille Léna, tout simplement pour avoir été inconditionnellement là et m'avoir supportée.

A Guillaume et Léna.

Table des matières

Introduction **1**

1 La structure testée et la caractérisation des matériaux **7**
1.1 Rappels théoriques sur la matrice des rigidités **C** 8
1.2 Les méthodes de caractérisation 11
1.2.1 La caractérisation par fonctions de transfert 11
1.2.2 La caractérisation par temps de vol 13
1.2.3 Les mesures au contact 14
1.3 Résultats des mesures 15
1.3.1 Présentation des échantillons 15
1.3.2 Caractérisation des matériaux pris isolément 16
L'aluminium 16
Le plexiglas 18
Le carbone époxy 19
1.3.3 Caractérisation d'un matériau entre deux substrats 28

2 Etude des ondes guidées de type SH **35**
2.1 Rappels sur les ondes SH 35
2.2 Etude de sensibilité 39
2.2.1 La méthode SAFE 1D à une variable 39
Principe 39
Implémentation COMSOL 41
Géométrie et maillage 42
2.2.2 Courbes de dispersion des ondes SH guidées par l'assemblage collé . . . 42
Sensibilité aux masses volumiques et aux épaisseurs 44
Sensibilité aux modules de cisaillement 44
2.3 Etudes numérique et expérimentale des modes SH_0 et SH_1 50
2.3.1 Génération / détection des ondes SH 51
2.3.2 Mesures des vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1 52
Validation du dispositif expérimental 52
Evaluation du module de Coulomb d'un joint de colle 54

3 Etude des ondes guidées de type Lamb **61**
3.1 Rappel sur les ondes de Lamb 62
3.2 Etude de sensibilité 65
3.2.1 La méthode SAFE 1D à deux variables 65
Principe 65

Implémentation COMSOL 67
Classement des modes 68
3.2.2 Courbes de dispersion des ondes de Lamb guidées par l'assemblage collé . 69
Sensibilité aux densités et aux épaisseurs 72
Sensibilité aux propriétés (visco)élastiques 76
3.3 Transmission d'une onde de Lamb par une zone réparée avec patch collé 80
3.3.1 Modèle éléments finis de propagation des ondes guidées 81
Présentation du modèle 81
Post traitement par relation d'orthogonalité 84
Implémentation COMSOL 85
3.3.2 Simulations numériques de la transmission d'un mode guidé 87
Importance de la viscoélasticité 87
Prédictions numériques pour plusieurs épaisseurs de colle 89
Influence de la géométrie du joint de colle 92
3.3.3 Génération et détection expérimentales d'un mode guidé 94
3.3.4 Coefficients de transmission 95
Cas du mode A_0 incident pour l'assemblage avec patch en plexiglas . . . 95
Cas du mode A_0 incident pour l'assemblage avec patch en composite . . . 98
Cas du mode S_0 incident pour l'assemblage avec patch en plexiglas 100
3.4 Confrontation des mesures ultrasonores à des essais de traction uni axiale 101
3.4.1 Cas d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas 102
3.4.2 Cas d'un assemblage aluminium / colle / composite 104

Conclusions et perspectives **109**

Annexes **115**

A Champs de déplacements et contraintes du mode SH_0 d'un assemblage collé **115**

B Compléments à l'étude de sensibilité des ondes SH **119**

C Implémentation sous COMSOL de la méthode SAFE 1D à trois variables **121**

D Zoom de la figure 3.8(e) **127**

E Sensibilité des ondes de Lamb à un assemblage aluminium/colle/composite **129**

F Sensibilité des ondes de Lamb à un assemblage aluminium / colle / plexiglas **133**

Bibliographie **136**

Table des figures

1.1 Photographie d'une réparation par collage de patch composite sur une aile d'avion. Vue globale (a) et détaillée (b) de la réparation. *Photographies CEAT.* 7
1.2 (a) Schéma de la géométrie retenue pour l'étude des propriétés d'un assemblage collé et (b) repère utilisé pour caractériser chacun des matériaux pris isolément. 8
1.3 Dispositif expérimental utilisé lors des caractérisations de matériaux par les méthodes ultrasonores à immersion. 11
1.4 Schéma de principe des mesure de C_{ij} au contact. 14
1.5 Mesures expérimentales (•) et calculs avec des propriétés initiales (– –) et optimisées (——) des lenteurs de phase des ondes longitudinales et transverses se propageant à travers un aluminium de 3 mm d'épaisseur. 17
1.6 Lenteurs de phase (a) et amplitudes (b) mesurées (•) et calculées avec des C_{ij} initiaux (– –) et optimisés (——) des ondes longitudinales et transverses se propageant dans le plan P_{12} d'un plexiglas épais de 1 mm. 18
1.7 Fonctions de transfert expérimentales (•) et calculées avec des C_{ij} optimisés (— –) et non optimisés (– –) du champs transmis à 0° (a), 20° (b), 28° (c) et 40° (d). 20
1.8 Fonctions de transfert expérimentales (•) et calculées avec des C_{ij} optimisés (—) et non optimisés (– –) du champs transmis à travers un carbone époxy $[0° / 90°]_{8s}$ et pour un angle d'incidence de 0° (a), 8° (b), 18° (c) et 30° (d) dans le plan principal P_{12} ainsi que de 4° (e), 8° (f), 18° (g) et 30° (h) dans le plan principal P_{13}. 21
1.9 Lenteurs de phase (colonne de gauche) et amplitudes (colonne de droite) expérimentales (•) et calculées avec des C_{ij} initiaux (– –) et optimisés (——) pour un carbone époxy $[0°/90°]_{8s}$ dans les plans principaux P_{12} (a) et (b) ainsi que P_{13} (c) et (d). 24
1.10 Lenteurs de phase et amplitudes mesurées (symboles) et calculées avec des C_{ij} optimisés (——) et non optimisés (– –) pour un carbone époxy uni-directinnel dans les plans principaux P_{12} (a) et (b), P_{13} (c) et (d) ainsi que dans le plan à 45° (e) et (f). 25
1.11 Fonctions de transfert simulées (•) et calculées avec des C_{ij} optimisés (—) et non optimisés (– –) du champs transmis à travers un carbone époxy $[0° / 90°]_{8s}$ et pour un angle d'incidence de 0° (a), 15° (b), 20° (c) et 30° (d) dans le plan principal P_{12} ainsi que de 6° (e), 13° (f) dans le plan $P_{45°}$. 27
1.12 Fonctions de transfert mesurées (•) et calculées avec des C_{ij} optimisés (—) et non optimisés (– –) du champs transmis à travers un assemblage verre / colle / verre, pour un angle d'incidence de 0° (colonne de gauche) et de 21° (colonne de droite) 120 min (première ligne), 600 min (seconde ligne) et 20h (troisième ligne) après la réalisation du collage. 30

1.13 Valeurs optimisées des C'_{ij} (• : série de mesures n°1 et ∘ : n°2) et des C''_{ij} (■ : série de mesures n°1) obtenues par caractérisation par fonctions de transfert ainsi que les lois d'évolution des modules de viscoélasticité de la colle, calculées avec de C_{ij} nominaux (− −) et des C_{ij} tenant compte de la précision moyenne des mesures (——), (a) pour le C_{11} et (b) pour le C_{66}. 31

1.14 Schéma de la géométrie retenue pour le collage et repère choisi pour les simulations numériques de la propagation d'ondes guidées le long d'un assemblage collé. 32

2.1 Domaine quelconque Ω. 36

2.2 Déplacements induits par (a) une onde longitudinale (ou onde de compression) et (b) une onde transverse (ou onde de cisaillement). 37

2.3 Courbes de dispersion des ondes guidées de type SH pour un aluminium épais de 1 mm, (a) nombre d'onde, (b) vitesse de phase et (c) vitesse d'énergie. 38

2.4 Distribution des champs de déplacement (a), de contraintes (b) et du flux de puissance (c) du mode SH_1 dans l'épaisseur d'une plaque d'aluminium de 1 mm à $2,5$ MHz. 38

2.5 Présentation en 3 dimensions d'une structure aluminium / colle / patch avec le maillage SAFE 1D représenté par une série de points dans l'épaisseur. 40

2.6 Vitesse de phase des modes guidés de type SH se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch (——), d'une plaque d'aluminium (− • −) et d'une plaque de composite (−■−). 43

2.7 Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des 3 premiers modes SH se propageant le long d'un assemblage collé, à un changement de $\pm x\%$ de l'épaisseur (colonne de gauche) et à $\pm 3\%$ de la densité (colonne de droite) du patch ($x = 5$) (a) et (b), de la colle ($x = 15$) (c) et (d) et de l'aluminium ($x = 5$) (e) et (f). Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (——) et pour une propriété modifiée (− • −). 45

2.8 Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des modes SH_0, SH_1 et SH_2 se propageant le long d'un assemblage collé à un changement de (a) $\pm 5\%$ du C_{44} de l'aluminium (− −), (b) $\pm 10\%$ du C_{44} et du C_{55} du patch (− −), (c) -40% (−▫−), -85% (− ∘ −) et -99% (−△−) du C_{44} de la colle et (d) -85% (−○−) et -99% (−△−) du k_T de l'interface. Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (——). 46

2.9 Prédictions numériques de la distribution dans l'épaisseur des déplacements (a) et (b), de la contrainte σ_{23} (b) et (d), et de la contrainte σ_{13} (e) et (f), normalisés en puissance, (——) pour un assemblage de propriétés nominales ; colonne de gauche pour les variations de propriétés des substrats : $+5\%$ (−■−) et -5% (−▫−) du C_{44} de l'aluminium, $+10\%$ (−▲−) et -10% (−▵−) du C_{44} et $+10\%$ (− • −) et -10% (− ∘ −) du C_{55} du patch composite ; colonne de droite pour les variations de propriétés de la colle : -40% (− × −) et -85% (− + −) du C_{44} de la colle. Mode SH_1 à 200 kHz. 48

2.10 Prédictions numériques de la distribution dans l'épaisseur des déplacements (a) et (b), de la contrainte σ_{23} (b) et (d), et de la contrainte σ_{13} (e) et (f), normalisés en puissance, (——) pour un assemblage de propriétés nominales ; colonne de gauche pour les variations de propriétés des substrats : +5% (−■−) et −5% (−□−) du C_{44} de l'aluminium, +10% (−▲−) et −10% (−△−) du C_{44} et +10% (− • −) et −10% (− ○ −) du C_{55} du patch composite ; colonne de droite pour les variations de propriétés de la colle : −40% (− × −) et −85% (− + −) du C_{44} de la colle. Mode SH_1 à 500 kHz. 49
2.11 Dispositif expérimental utilisé pour les mesures de vitesses de phase des ondes SH se propageant le long d'un assemblage collé. 51
2.12 Signaux (vitesse particulaire en $V/\mu s$) mesurés en temps réel à la surface d'une plaque d'aluminium (a) et du patch composite d'un assemblage collé (b) *via* le dispositif expérimental présenté figure 2.11. 52
2.13 Vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1 se propageant le long (a) d'une plaque d'aluminium de 3 mm et (b) d'une plaque de carbone époxy de 5 mm ; prédictions numériques (modèle SAFE 1D) avec un C_{44} et un C_{55} initiaux (− − −−) et optimisés (——) et données expérimentales (•). 53
2.14 Vitesses de phase des modes type SH_0 et SH_1 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch ; prédictions numériques avec un C_{44} optimisé (traits) et valeurs expérimentales (symboles) obtenues pour différents temps de réticulation : 45 min (——, •) ; 4 h (— - —,▲) ; 8h30 (— —, ♦) ; 35 h (– – –, ■) et après plusieurs jours de réticulation (- - - , ▼). 55
2.15 Distributions dans l'épaisseur de l'assemblage aluminium / colle / patch de la composante dans le plan du flux de puissance pour (colonne de gauche) une colle non réticulée *i.e.* 45 min après la réalisation du collage, et pour (colonne de droite) une colle réticulée, *i.e.* plusieurs jours après la réalisation du collage. Les graphes (a) et (b) ainsi que (c) et (d) correspondent respectivement aux modes de type SH_0 et SH_1. 56
2.16 Atténuation des modes SH_0 et SH_1 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch (a) pour une colle non réticulée *i.e.* 45 min après la réalisation du collage et (b) pour une colle réticulée, *i.e.* plusieurs jours après la réalisation du collage. 57
2.17 Prédictions numériques de la sensibilité des atténuation des modes guidés SH_0 et SH_1 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch à un changement (a) de ±15% du C''_{44} et du C''_{55} du composite (− − −) et (b) de ±15% (– • –) ; de ±30% (– ▲ –) et ±50% (– ■ –) du $C''_{44} = C''_{55}$ de la colle. Prédictions numériques pour un assemblage de propriétés nominales (——) . . . 58

3.1 Type de déplacements induits par des ondes de Lamb symétriques (a) et antisymétriques (b). 62
3.2 Courbes de dispersion (a) en nombre d'onde, (b) en vitesse de phase, (c) en vitesse d'énergie et (d) en angle de coïncidence dans l'air des 4 premiers modes de Lamb se propageant le long d'un aluminium épais de 1 mm. 64
3.3 Distributions dans l'épaisseur d'une plaque d'aluminium de 1 mm (a) du champ de déplacements, (b) du champ de contraintes et (c) du flux de puissance du mode S_0 à 1 MHz. 65

3.4 Présentation en 3 dimensions d'une structure aluminium / colle / patch avec le maillage SAFE 1D représenté par une série de points dans l'épaisseur. 66

3.5 Vitesse de phase des modes guidés de type Lamb se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch (——) ; d'une plaque d'aluminium seule ($-\bullet-$) ; d'un patch seul ($-\blacksquare-$) et d'un bicouche colle / patch ($-\blacktriangle-$) (a) avec patch en plexiglas et (b) avec patch en carbone époxy. 71

3.6 Distribution dans l'épaisseur (a) des champs de déplacement et (b) du flux de puissance du mode M_1 d'un assemblage collé avec patch en composite (—-) et du mode A_0 d'une plaque d'aluminium ($- - -$) à 200 kHz. 72

3.7 Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des 7 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage collé avec patch en plexiglas à un changement de $\pm x\%$ de l'épaisseur (colonne de gauche) et de $\pm 3\%$ de la densité (colonne de droite) du patch ($x = 5$) (a) et (b), de la colle ($x = 15$) (c) et (d) et de l'aluminium ($x = 5$) (e) et (f). Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (——) et pour des propriétés modifiées ($-\bullet-$). 73

3.8 Même légende que la figure 3.7 pour la vitesse de phase des modes guidés se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / composite. 75

3.9 Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des 3 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / composite à une variation de (a) $\pm 5\%$ ($- - -$) des C_{ij} de l'aluminium ; (b) $\pm 10\%$ ($- - -$) des C_{ij} du patch composite ; à une chute de 50% ($-\bullet-$) et 90% ($-\circ-$) (c) des C_{ij} de la couche de colle ou (d) des k_L et k_T de l'interface. (——) Vitesses de phase d'un assemblage aux propriétés nominales. 77

3.10 Prédictions numériques de la sensibilité de l'atténuation des modes M_1 (gauche), M_2 (milieu) et M_3 (droite) se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / composite à une variation de $\pm 5\%$ ($- - -$) des C_{ij} de l'aluminium (1re ligne) ; $\pm 10\%$ ($- - -$) des C_{ij} du patch composite (2e ligne) ; à une chute de -20% ($-\blacksquare-$) et -50% ($-\bullet-$) des C_{ij} de la couche de colle (3e ligne) et de -50% ($-\bullet-$) et -90% ($-\circ-$) des k_L et k_T de l'interface (4e ligne). (——) Atténuations d'un assemblage aux propriétés nominales. 78

3.11 Superposition de la distribution des champs de déplacement, (a) des modes M_1 et A_0, (b) des modes M_2 et S_0, et (c) des modes M_3 et S_0 se propageant respectivement le long d'un assemblage collé avec patch en composite (——) et le long d'une plaque d'aluminium de 3 mm ($- - -$) à 400 kHz. 81

3.12 Schéma de la géométrie 2D simulée par éléments finis sous COMSOL. 82

3.13 Evolution du coefficient de transmission du mode guidé A_0 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas (a) élastique et (b) viscoélastique, pendant la réticulation du joint de colle et pour des fréquences variant de $0,3$ à $0,6$ MHz. 88

3.14 Evolution du coefficient de transmission du mode guidé S_0 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas (a) élastique et (b) viscoélastique, pendant la réticulation du joint de colle et pour des fréquences variant de $0,3$ à $0,6$ MHz. 89

3.15 Prédictions numériques de l'évolution du coefficient de transmission du mode A_0 au cours du processus de réticulation d'un joint de colle épais de $0,15\ mm$ (— —), de $0,175\ mm$ (− − −), de $0,2\ mm$ (——) et de $0,25\ mm$ (—- —), à $0,4\ MHz$. 90
3.16 Prédictions numériques de l'évolution du coefficient de transmission du mode S_0 au cours du processus de réticulation d'un joint de colle épais de $0,15\ mm$ (− − −), de $0,175\ mm$ (— —), de $0,2\ mm$ (——) et de $0,22\ mm$ (—- —). 91
3.17 Schématisation des modifications de géométrie apportées au joint de colle : (a) joint avec bourrelets de colle et (b) joint d'épaisseur non uniforme. 92
3.18 Prédictions numériques de l'évolution du coefficient de transmission du mode A_0 à $0,4\ MHz$ au cours du processus de réticulation d'un joint de colle (a) épais de $0,2\ mm$ (———) et avec des bourrelets larges de $1\ mm$ (- • -) et $5\ mm$ (- ∘ -) et (b) épais de $0,175\ mm$ (———) et dont l'épaisseur varie linéairement de $e_c^1 = 0,15\ mm$ à $e_c^2 = 0,2\ mm$ (− − −). 93
3.19 Prédictions numériques de l'évolution du coefficient de transmission du mode S_0 à $0,4\ MHz$ au cours du processus de réticulation d'un joint de colle (a) épais de $0,2\ mm$ (———) et avec des bourrelets larges de $1\ mm$ (- • -) et $5\ mm$ (- ∘ -) et (b) épais de $0,175\ mm$ (———) et dont l'épaisseur varie linéairement de $e_c^1 = 0,15\ mm$ à $e_c^2 = 0,2\ mm$ (− − −). 93
3.20 Dispositif expériemental à accès uni-latéral et couplage par air utilisé pour la mesure de la transmission des ondes de Lamb. 94
3.21 Mesures (symboles) et simulation (trait), à $0,4\ MHz$, du coefficient de transmission du mode A_0 se propageant le long d'une plaque d'aluminium sur laquelle est collé un patch de $1\ mm$ de plexiglas, (a) avec sablage de l'aluminium, pour un joint épais de $0,2\ mm$ (• et ——) et $0,175\ mm$ avec des propriétés ajustées (− − −) et (b) sans sablage de l'aluminium, pour un joint épais de $0,35\ mm$ (▪ et ——) et $0,32\ mm$ (− − −). 96
3.22 Coefficient de transmission du mode A_0 mesuré expérimentalement à $0,4\ MHz$ au cours du processus de réticulation d'un joint épais de $0,25^{\pm 0,05}\ mm$ collant une plaque d'aluminium sablée (▫) ou juste poncée (∘) et un patch de $3,46\ mm$ de plexiglas, (a) entre 0 et 1300 min et (b) entre 0 et 2 jours. 98
3.23 Coefficient de transmission du mode A_0 mesuré expérimentalement à $0,34\ MHz$ au cours du processus de réticulation d'un joint épais de $0,2\ mm$ collant une plaque d'aluminium et un patch de $1,2\ mm$ de composite. 99
3.24 Coefficient de transmission d'un mode S_0 se propageant le long d'une plaque d'aluminium sur laquelle est collé un patch en plexiglas de $1\ mm$, à $0,4\ MHz$, (•) mesuré lorsque l'aluminium est sablé et le joint de colle épais de $0,2\ mm$, ainsi que prédit numériquement pour un joint de colle épais de $0,2\ mm$ (——) et pour un joint de colle épais de $0,175\ mm$ dont la loi d'évolution du C_{11} varie de -10% par rapport à celle présentée au chapitre 1 (− − −). 101
3.25 Eprouvette de traction utilisée pour les essais mécaniques. 102
3.26 Forces d'arrachement obtenues lors d'essais de traction uni-axiale sur un assemblage aluminium / joint n°1 / plexiglas / joint n°2 / aluminium, pour différents temps de réticulation du joint de colle n°2 des éprouvettes présentées sur la figure 3.25. 103

3.27 Confrontation entre les résultats des essais de traction uni-axiale et des mesures ultrasonores (A_0 incident à $0,4\ MHz$) réalisés sur un assemblage aluminium / colle / plexiglas de $3,46\ mm$. 104

3.28 Forces d'arrachement obtenues lors d'essais de traction uni-axiale sur un assemblage aluminium / joint n°1 / composite / joint n°2 / aluminium, pour différents temps de réticulation du joint de colle n°2 des éprouvettes, (a) pour l'ensemble des temps de mesures et (b) pour les temps allant de 15 à 1200 min. 106

3.29 Corrélation des essais de traction uni-axiale et des mesures ultrasonores réalisés sur un assemblage aluminium / colle / composite, (a) pour l'ensemble des temps de mesures et (b) pour les temps allant de 15 à 1200 min. 106

A.1 Prédictions numériques de la distribution dans l'épaisseur des déplacements (a) et (b), de la contrainte σ_{23} (b) et (d), et de la contrainte σ_{13} (e) et (f), normalisés en puissance. (—-) pour un assemblage de propriétés nominales ; colonne de gauche pour les variations de propriétés des substrats : +5% ($-\blacksquare-$) et −5% ($-\square-$) du C_{44} de l'aluminium, +10% ($-\blacktriangle-$) et −10% ($-\triangle-$) du C_{44} et +10% ($-\bullet-$) et −10% ($-\circ-$) du C_{55} du patch composite ; colonne de droite pour les variations de propriétés de la colle : −40% ($-\times-$) et −85% ($-+-$) du C_{44} de la colle. Mode SH_0 à 200 kHz. 116

A.2 Prédictions numériques de la distribution dans l'épaisseur des déplacements (a) et (b), de la contrainte σ_{23} (b) et (d), et de la contrainte σ_{13} (e) et (f), normalisés en puissance. (—-) pour un assemblage de propriétés nominales ; colonne de gauche pour les variations de propriétés des substrats : +5% ($-\blacksquare-$) et −5% ($-\square-$) du C_{44} de l'aluminium, +10% ($-\blacktriangle-$) et −10% ($-\triangle-$) du C_{44} et +10% ($-\bullet-$) et −10% ($-\circ-$) du C_{55} du patch composite ; colonne de droite pour les variations de propriétés de la colle : −40% ($-\times-$) et −85% ($-+-$) du C_{44} de la colle. Mode SH_0 à 500 kHz. 117

B.1 Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse d'énergie des modes SH_0 et SH_1 d'un assemblage collé (—-) (a) à une variation de ±5% du $C_{44} = C_{55}$ de l'aluminium (– –) ; (b) à une variation de ±10% des C_{44} et C_{55} du patch (– –) ; (c) à une chute de 27% ($-\bullet-$), 50% ($-\square-$), 90% ($-\circ-$) et 99% ($-\blacksquare-$) du $C_{44} = C_{55}$ de la colle et (d) à une chute de 50% ($-\square-$) et 99% ($-\blacksquare-$) du k_T de l'interface. 120

D.1 Zoom de la figure 3.8(e) présentée page 75. 127

E.1 Prédictions numériques de la sensibilité de l'atténuation des 5 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage collé avec patch en composite à un changement de ±5% de l'épaisseur (colonne de gauche) et à ±3% de la densité (colonne de droite) du patch (a) et (b), de la colle (c) et (d) et de l'aluminium (e) et (f). Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (—-) et pour une propriété modifiée ($-\bullet-$). 130

E.2 Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse d'énergie des 5 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage collé avec patch en composite à un changement de ±5% de l'épaisseur (colonne de gauche) et à ±3% de la densité (colonne de droite) du patch (a) et (b), de la colle (c) et (d) et de l'aluminium (e) et (f). Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (—-) et pour une propriété modifiée (− • −). 131

F.1 Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des 7 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage aluminium / interface / colle / plexiglas à une variation de (a) ±5% (− − −) des C_{ij} de l'aluminium ; (b) de ±5% (− − −) des C_{ij} du patch plexiglas ; (c) et (d) de −50% (−□−) et −90% (−△−) des C_{ij} de la couche de colle et des k_L et k_T de l'interface respectivement. (——) Vitesses de phase d'un assemblage aux propriétés nominales. 134

F.2 Prédictions numériques de la sensibilité de l'atténuation des 3 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage aluminium / interface / colle / plexiglas à une variation de (a) ±5% (− − −) des C_{ij} de l'aluminium ; (b) de ±5% (− − −) des C_{ij} du patch plexiglas ; (c) de −50% (−•−) des C_{ij} de la couche de colle et (d) de −50% (−•−) et −90% (−○−) des k_L et k_T de l'interface. (——) Vitesses de phase d'un assemblage aux propriétés nominales. 135

Introduction

Ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte de la réparation de structures aéronautiques. Les flottes d'avions sont vieillissantes et beaucoup d'appareils volent au-delà de leur durée de vie prévue. Cela a bien évidemment des conséquences, comme l'apparition de dommages à des localisations critiques, particulièrement des fissures aux niveaux des ailes, à proximité du fuselage. La structure peut alors être réparée par l'intermédiaire d'un patch métallique ou composite, afin de transférer les charges de la zone endommagée vers le patch. La réparation par collage de patch composite, technique dont le développement a été initié par la « Royal Australian Air Force » ou RAAF à la fin des années 70, apparaît alors comme une alternative avantageuse par rapport aux techniques plus conventionnelles de réparation par rivetage ou soudure de structures métalliques [1]. Tout d'abord les composites sont des matériaux légers aux caractéristiques mécaniques intéressantes qui peuvent aisément être assemblés sur des surfaces non parfaitement planes comme des ailes d'avions. Ensuite le choix du collage permet de réduire la transmission des efforts ainsi que d'éliminer les zones de concentration de contraintes dues aux rivets ou à des raidisseurs additionnels. Enfin l'assemblage collé montre de bonnes performances vis à vis de la propagation de fissure.

Néanmoins la qualité de ce type de réparations est fortement liée aux procédures de réalisation du collage, chaque écart par rapport au protocole de collage pouvant provoquer une dégradation inattendue des performances de la réparation. De même, les difficultés à prédire de manière fiable la durabilité à long terme ou à contrôler de manière non destructive la qualité des réparations collées freinent le développement de cette technique.

Les industriels expriment donc un besoin pressant de mise au point de méthodes d'évaluation non destructive afin de pouvoir non seulement qualifier mais surtout quantifier les performances d'un joint de colle. C'est à cet objectif que cette thèse va apporter sa contribution.

Les méthodes les plus classiques pour caractériser un collage sont destructives. Les valeurs de résistance à la fracture permettent de caractériser à la fois l'adhésif et le processus de collage. Il existe de nombreux essais mécaniques normalisés (normes ASTM ou ISO) donnant accès à l'énergie de fracture ou à la résistance à la rupture d'un assemblage collé. Les essais de double levier (DCB pour « double cantilever beam »), les essais de pelage, de traction en bout ou de cisaillement en sont des exemples. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter à la référence [2]. L'émission acoustique peut également être utilisée pour détecter un défaut d'adhésion avant que ne survienne la rupture. Cette méthode est ici considérée comme semi destructive puisqu'elle nécessite que l'assemblage collé soit chargé à approximativement 50% de sa charge de ruine. La surface auscultée est instrumentée de transducteurs piézoélectriques afin d'enregistrer les ondes émises par la propagation d'éventuelles fissures. Le temps d'arrivée de la première d'entre elles permet de localiser le défaut. L'énergie des signaux permet quant à elle d'estimer la sévérité des dommages et de donner une indication sur le temps de vie de la réparation [3]. Ces essais permettent par exemple de choisir un adhésif, d'optimiser une géométrie de patch,

de mettre au point et valider un protocole de collage ou encore d'établir des lois statistiques sur les performances de tel ou tel assemblage. Mais ils sont par essence destructifs. Ce dernier point n'est pas pleinement satisfaisant du point de vue industriel et c'est pour cette raison que la mise au point de méthodes de contrôle non destructif d'assemblages collés est si importante.

Un certain nombre de techniques d'évaluation non destructive sont applicables au contrôle du collage [4,5]. Elles visent à assurer que le collage a été correctement réalisé ou qu'il n'est pas altéré par son environnement durant son service.
Pour ce faire trois types de défauts sont ciblés :

- une faible adhésion, c'est à dire une interface adhésif / substrat de faible qualité ;
- une faible force de cohésion, c'est à dire une faiblesse mécanique dans l'épaisseur du joint ;
- des trous, des décollements ou de la porosité.

Plusieurs techniques non destructives permettent de détecter des défauts tels que des trous, des décollements ou de la porosité. Commençons par citer les techniques optiques [6]. Il est par exemple possible de visualiser la présence de défauts de type décollement (avec présence d'une lame d'air) en mesurant les franges d'interférences d'un assemblage collé. Chan et Yeung effectuent ces mesures à deux reprises, avant, puis après qu'un chargement ne soit appliqué à l'échantillon. Un algorithme d'extraction leur permet alors de remonter à la distribution de phase qui est elle-même liée à la déformation de la surface. En présence d'un défaut des anomalies apparaissent. Mais cette technique est valable pour les matériaux réfléchissants (ici de l'aluminium) et le chargement de la structure peut s'avérer contraignant. Ces deux points limitent fortement son application au niveau industriel.

L'utilisation de la radiographie permet elle aussi de visualiser la présence de ce type de défauts et dans une certaine mesure, de détecter de la porosité dans un assemblage collé. Cette technique se base sur le phénomène d'absorption de rayons X ou γ qui est fonction de l'épaisseur et de la nature des matériaux avec lesquels ils interagissent. Une variation de l'un de ces paramètres modifie la quantité de rayonnement transmis et le contraste sur l'image résultante. L'utilisation d'émetteurs focalisés [7] permet par exemple de détecter des variations de l'épaisseur du joint de colle ou d'identifier des zones d'absence de colle dans des assemblages de type aluminium/colle/composite. Malheureusement cette technique est non seulement coûteuse mais présente également de fortes contraintes de sécurité (effets bien connus de l'exposition aux rayonnements ionisants).

Les méthodes de vibrations soniques, dont le test du marteau, sont parmi les plus anciennes techniques de contrôle non destructif. La présence d'un trou réduit la raideur locale de la structure. Lorsqu'un marteau vient impacter une structure saine ou défectueuse sa réponse acoustique n'est pas la même. A force identique, l'impact sur la structure saine est d'intensité plus forte et de durée plus courte [8,9]. Et même si la taille minimale de détection d'un défaut est plus importante que pour d'autres techniques (fréquences de travail de l'ordre de $1 - 30\ kHz$), la facilité de mise en œuvre de cette technique fait qu'il existe des outils de mesure disponibles dans le commerce. Elle n'est cependant pas suffisante pour répondre au besoin industriel de quantification de la qualité d'un joint de colle.

Les méthodes thermiques [10–12] sont une alternative aux techniques précédentes pour la détection de défauts de type décollement. Leur utilisation est même normalisée (cf. norme ASTM E2582-07). Le principe repose sur le chauffage de l'une des surfaces de la structure collée et l'observation de l'augmentation de température de la face opposée. Le résultat de la mesure

est acquis *via* une caméra infrarouge. Ensuite diverses techniques de traitement d'image, soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel, permettent d'exploiter le résultat. La présence de défauts perturbe le champ de température, ce qui se manifeste par l'apparition de zones de contraste. Genest et al. [13] présentent une procédure expérimentale permettant de détecter une zone de décollement simulée par un insert de téflon ou un décollement réel et de suivre sa croissance dans un assemblage de type aluminium/colle/graphite époxy. Ils mesurent la différence entre les images acquises sur la structure testée et une référence. Cette manière de faire permet de diminuer les erreurs de mesures et d'automatiser la lecture des résultats. Néanmoins la taille des défauts détectés est systématiquement sous estimée de 7 à 26%.

Ces techniques, et plus précisément la combinaison de deux ou trois d'entre elles, par exemple l'association des méthodes thermiques, radiographiques, et des vibrations soniques, permettent de détecter et d'évaluer la taille d'un défaut localisé dans un joint de colle. Malheureusement la mise en œuvre industrielle reste lourde et ces méthodes ne permettent pas d'évaluer de manière quantitative la qualité du joint dans son ensemble. Les ultrasons sont une méthode d'évaluation non destructive très employée dans le domaine du contrôle des réparations par collage parce qu'il permettent non seulement de détecter des trous [14] ou de la porosité [15] mais également de prédire les propriétés cohésives voire adhésives du joint de colle [14, 16–18].

Une méthode classique consiste à émettre un signal ultrasonore de durée brève, dans un domaine de fréquences compris entre 1 et 20 *MHz*. Des ondes de compression sont émises par un transducteur piézoélectrique dans la structure à tester. Si le défaut est assimilé à une bulle d'air, l'impédance acoustique de l'adhésif et de l'air sont suffisamment différentes pour que le coefficient de réflexion de l'onde incidente approche 1 au niveau de l'interface séparant la colle et le défaut. La mesure du signal réfléchi, ou transmis, permet alors d'attester de la présence (ou de l'absence) d'un défaut. De manière plus concrète, le transducteur émetteur est placé perpendiculairement à la surface à ausculter. Le signal est reçu soit par un second transducteur placé de l'autre côté de la surface (méthode « Pitch-Catch »), soit par le transducteur émetteur lui-même (méthode « Pulse-Echo »). Ce second mode est à préférer dans la mesure où ces techniques sont développées pour contrôler des structures dont l'accès bilatéral n'est pas possible. La variation d'amplitude des échos réfléchis permet de détecter la présence de défauts. Cette technique, dite de A-scan, permet d'ausculter une ligne de la structure étudiée. Il est également possible de cartographier la surface considérée dans son ensemble en ne s'intéressant qu'à un écho particulier. Les changements de son amplitude, tracée en fonction de la position, révèlent non seulement la présence d'un défaut mais aussi ses dimensions [19].

La spectroscopie ultrasonore permet quant à elle de remonter aux propriétés cohésives de la colle grâce à ses propriétés vibratoires. Le module de rigidité et l'épaisseur de l'adhésif peuvent ainsi être déterminés par l'intermédiaire de la mesure des fréquences propres de l'assemblage en incidence normale [16, 20–22]. Pour obtenir des informations sur l'interface, des auteurs tels que Pilarski [23], Rokhlin [24] ou Nagy [25] suggèrent de travailler en incidence oblique. En particulier, il serait possible de détecter les « kissing bonds », ces défauts d'interface où l'adhésif et le substrat sont en contact mais sans adhérer l'un à l'autre convenablement. La conséquence est une raideur normale du joint suffisamment forte pour rendre le défaut invisible aux ultrasons, tandis que sa raideur en cisaillement est significativement plus faible que pour un joint de bonne qualité. Baltazar et al. [17] ont mis au point une procédure de caractérisation d'un joint de colle permettant de remonter au coefficient de Lamé, à la densité et à l'atténuation de la colle ainsi qu'aux raideurs d'interface. Ces grandeurs sont obtenues *via* la mesure des spectres du signal

acoustique réfléchi pour deux angles d'incidence et une procédure d'optimisation numérique. Les inconvénients majeurs de cette technique sont sa lenteur de mise en œuvre et le couplage des transducteurs. Que ce soit avec du gel (reproductibilité réduite) ou par l'intermédiaire de l'eau (mise en œuvre lourde) elle ne satisfait que partiellement les exigences des industriels. C'est pour cette raison que des appareillages alternatifs sont développés. Les transducteurs à couplage par air [26–29] ou à couplage sec [30, 31], tout comme la génération / détection laser [19] en sont l'illustration. Néanmoins la spectroscopie ultrasonore reste un procédé relativement lent pour la caractérisation d'un joint de colle lorsque de larges zones sont à inspecter.

L'évaluation non destructive de structures par ondes guidées présente un énorme avantage sur les techniques précédemment citées. De par leurs propriétés elles permettent d'ausculter une structure non plus point par point mais sur de longues distances, occasionnant ainsi un gain de temps considérable. Lorsque l'onde guidée se propage le long de l'assemblage collé elle accumule de l'information concernant l'ensemble du joint de colle. Santos et al. [32] ont ainsi montré qu'il était possible d'effectuer un examen rapide d'un joint à simple recouvrement d'aluminium. Dans ce cas une mesure de type « Pitch-Catch » des ondes guidées se propageant à 1 MHz le long de la structure permet de révéler la présence de défauts de type trou. Duflo et al. [33] ont, quant à eux, montré qu'une mesure du coefficient de transmission du mode S_0 se propageant le long d'un assemblage collé composite / colle / composite à $300 - 320$ kHz permettait d'estimer la taille de défauts artificiels.

Il existe une infinité de modes guidés, chacun avec ses caractéristiques propres. Une étude numérique de sensibilité permet d'isoler un (ou des) mode(s) sensible(s) aux propriétés de l'adhésif d'un assemblage collé [34, 35]. Les campagnes de calculs ont pour but de sélectionner un mode guidé plus sensible aux propriétés de l'adhésif qu'à celles des substrats. Elles consistent à analyser des courbes de dispersion [34] et des profils de déplacements ou de contraintes des modes dans l'épaisseur de la structure à tester [35].

Ainsi Heller et al. [36] étudient l'influence d'un vieillissement chimique sur un joint de colle époxy entre deux substrats d'aluminium de 0,94 mm chacun. Ils montrent, dans leur cas particulier où le joint de colle possède un module d'Young de l'ordre de 5 MPa seulement et un coefficient de Poisson proche de 0,5, que les modes guidés mesurés le long de l'assemblage collé correspondent à ceux d'une plaque d'aluminium épaisse de 0,94 mm et non pas 1,88 mm. Lorsque le collage n'a subit aucun dommage, et parce que leur joint de colle possède des propriétés mécaniques très faibles qui n'assurent pas un bon couplage acoustique entre les deux substrats, les courbes de dispersion de l'assemblage se comportent comme celles de deux plaques d'aluminium quasiment indépendantes. Ils montrent également qu'un vieillissement chimique du joint de colle époxy influe sur les vitesses des modes guidés : moins de modes sont observés expérimentalement par rapport à un collage non dégradé. Castaings et al. [37, 38] ont exploité la sensibilité d'un mode de type Rayleigh se propageant le long d'un assemblage béton / colle / composite, aux propriétés de l'adhésif, dans la bande de fréquences $[50 - 300]$ kHz. En corrélant les résultats ultrasonores à des résultats de traction uni-axiale, une évolution linéaire de la contrainte à la rupture en fonction de la vitesse de phase du mode guidé de type Rayleigh a pu être mise en évidence. Lanza di Scalea et al. [39] ont étudié la transmission du mode A_0 le long d'un assemblage collé de type aluminium / colle époxy / aluminium, dont la géométrie correspond à un joint de type simple recouvrement Trois niveaux de collage ont été considérés : un premier pour lequel la colle a totalement réticulé, un second pour lequel la colle a partiellement réticulé et un dernier niveau pour lequel l'adhésif est remplacé par de

l'eau. En mesurant le coefficient de transmission du mode A_0 par l'intermédiaire d'un système expérimental excitation laser / réception *via* un transducteur à couplage par air, ils ont mis en évidence un domaine de fréquences, $[580 - 670]$ kHz, dans lequel le niveau de transmission varie de plus de 9 dB entre chacun des trois collages considérés. Les méthodes précédemment citées montrent qu'il est possible de distinguer un bon collage d'un mauvais. Koreck et al. [40] résolvent, quant à eux, un problème inverse pour des structures simplifiées. L'assemblage est simplement constitué d'une plaque d'aluminium sous laquelle est collé un film d'adhésif autosupporté. Leur démarche consiste à remonter aux propriétés de l'adhésif *via* la mesure des courbes de dispersion du système. En prenant comme donnée initiale des courbes de dispersion calculées (et non pas mesurées), leur procédure d'inversion leur a permis d'optimiser le module d'Young, le coefficient de Poisson et l'épaisseur de la couche de colle avec une précision de 7%. Les ondes guidées montrent ainsi leur potentiel pour l'évaluation non destructive des caractéristiques mécaniques d'une couche de colle. Dixon et al. [41,42] ou Challis et al. [43] présentent par exemple des méthodes acoustiques de suivi de l'évolution de colles époxy au cours de leur réticulation. Mais, à l'exception du dispositif de mesures en « Pulse-Echo » de Dixon [42], ces études sont plus des méthodes de caractérisation de la colle que de la qualité d'un collage dans la mesure où les échantillons, spécifiquement conçus pour les dispositifs expérimentaux, ne sont pas représentatifs d'un assemblage collé tel qu'il peut être réalisé en industrie, mais que d'une couche de colle déposée sur un substrat [40], uniquement d'une couche de colle [43], ou alors de deux adhérents dont les épaisseurs ont été choisies pour que le dispositif expérimental fonctionne dans des conditions optimales [41]. Ces études ne répondent pas encore aux critères industriels d'évaluation, non destructive et quantitative, par onde guidée d'un joint de colle, par l'intermédiaire d'un dispositif expérimental sans contact et à accès unilatéral.

En ce qui concerne les propriétés adhésives, la tâche est plus ardue étant donné que c'est une surface qui fait l'objet de l'inspection. L'interface est classiquement modélisée par une densité surfacique de ressorts [17,18,44–48]. Drinkwater et al. [47] ont par exemple mesuré l'atténuation des modes A_0 et S_0 se propageant le long d'une plaque de verre partiellement en contact avec un élastomère. Lorsque la pression appliquée sur ce dernier varie, les atténuations des ondes varient elles aussi. Les valeurs mesurées de ces atténuations ont ensuite pu être reliées expérimentalement à des raideurs d'interface longitudinale et transversale. Vlasie et Rousseau [48] proposent un modèle original où la condition d'interface est modélisée non pas par une densité surfacique de ressorts mais par une condition de sauts de contraintes en faisant apparaître l'énergie libre de surface.

L'objectif de cette thèse est de contribuer à la mise au point d'une technique à accès unilatéral, de préférence sans contact, permettant l'évaluation non destructive d'un joint de colle. Le dispositif expérimental en question doit pouvoir quantifier la qualité du collage de manière à ce que la grandeur ultrasonore mesurée puisse être mise en relation avec une contrainte à la rupture. Pour ce faire deux types d'ondes guidées ont été envisagés : les ondes SH (pour « Shear Horizontal » en anglais) qui sollicitent le matériau uniquement en cisaillement et les ondes de Lamb qui sollicitent le matériau à la fois en traction / compression et en cisaillement.

Pour mettre au point une technique d'évaluation non destructive de la qualité d'un joint de colle, il ne faut pas que l'onde guidée sélectionnée soit plus sensible aux variations probables des propriétés de l'un ou l'autre des substrats qu'à une variation des propriétés viscoélastiques de l'adhésif. Avant de procéder à une étude de sensibilité des ondes guidées aux propriétés mécaniques des différents matériaux de l'assemblage, il est nécessaire de connaître ces propriétés

mécaniques. Dans le chapitre 1 chacun des matériaux constituant l'assemblage sera caractérisé au moyen de techniques ultrasonores. Cette campagne de mesures permettra de déterminer les épaisseurs, les densités et les modules de viscoélasticité de chacun des matériaux de l'assemblage. Les résultats de mesures sont obtenus avec une précision qui définit, par la suite, le domaine de variabilité des propriétés de l'aluminium et du patch.

Le chapitre 2 traite de l'étude des ondes guidées SH. L'objectif est de mettre en évidence leur potentiel à évaluer de manière quantitative et non destructive les propriétés en cisaillement d'un joint de colle. Dans un premier temps une étude de sensibilité des 4 premiers modes SH aux propriétés viscoélastiques d'un assemblage collé permet d'identifier un domaine de fréquences pour lequel il possible de mesurer expérimentalement les propriétés en cisaillement d'un adhésif, sans être perturbé par les substrats. Parallèlement, la distribution des champs de déplacements et de contraintes des modes SH permet de comprendre la manière dont les propriétés viscoélastiques des matériaux influent sur les ondes guidées. En traçant ces distributions pour différentes fréquences, il est possible d'étayer les résultats concernant les domaines de sensibilité des ondes SH à la qualité d'un collage. Des mesures sont ensuite réalisées puis confrontées aux résultats issus des simulations numériques. Finalement, un problème inverse est résolu pour obtenir le module de cisaillement du joint de colle.

Le chapitre 3 est, quant à lui, consacré à l'étude des ondes de Lamb. Il est construit de la même manière que le précédent. Une étude de sensibilité permet dans un premier temps de sélectionner la ou les onde(s) guidée(s) qui est(sont) sensible(s) aux propriétés viscoélastiques de l'adhésif et peu sensible(s) aux propriétés des substrats. Par la suite une série de simulations numériques et de mesures expérimentales permet de vérifier cette sensibilité. Enfin les résultats de mesures non destructives sont confrontés à ceux obtenus lors d'essais de traction uni-axiale, dans le but de faire se correspondre une force d'arrachement et une grandeur ultrasonore.

La conclusion reprendra les différents résultats obtenus au cours de cette thèse et discutera des différentes pistes envisagées pour mener plus avant ce travail et ainsi continuer à répondre aux attentes des industriels.

Chapitre 1

La structure testée et la caractérisation des matériaux

Introduction

Le CEAT a exprimé le besoin de caractériser de manière non destructive et quantitative les réparations de structures métalliques par collage de patch composite. En pratique, le patch est de géométrie variable et adaptée à la réparation (cf. l'exemple de la figure 1.1). Le nombre ainsi que la séquence d'empilement des plis de carbone époxy est également fonction de l'application, de plus un pli de tissu de verre est inséré entre le matériau composite et la colle.



(a) (b)

FIGURE 1.1 – Photographie d'une réparation par collage de patch composite sur une aile d'avion. Vue globale (a) et détaillée (b) de la réparation. *Photographies CEAT.*

Pour ce travail de thèse il a été convenu d'étudier un assemblage simplifié, représenté sur la figure 1.2. Le substrat métallique sera une plaque d'aluminium de 3 mm d'épaisseur, le patch sera quant à lui rectangulaire de dimensions 100×200 mm^2 et d'épaisseur e_p. Il sera soit fait de carbone époxy $[0/90°]_{2s}$, soit fait de plexiglas. Ce second matériau est isotrope et faiblement viscoélastique, il permet de simplifier l'étude en réduisant le nombre de paramètres à influer sur la propagation des ondes guidées. Sa faible viscoélasticité permet de minimiser (sans la négliger pour autant) l'atténuation des ondes se propageant au sein de l'assemblage collé. Enfin l'adhésif est de type époxy et son épaisseur sera notée e_c.

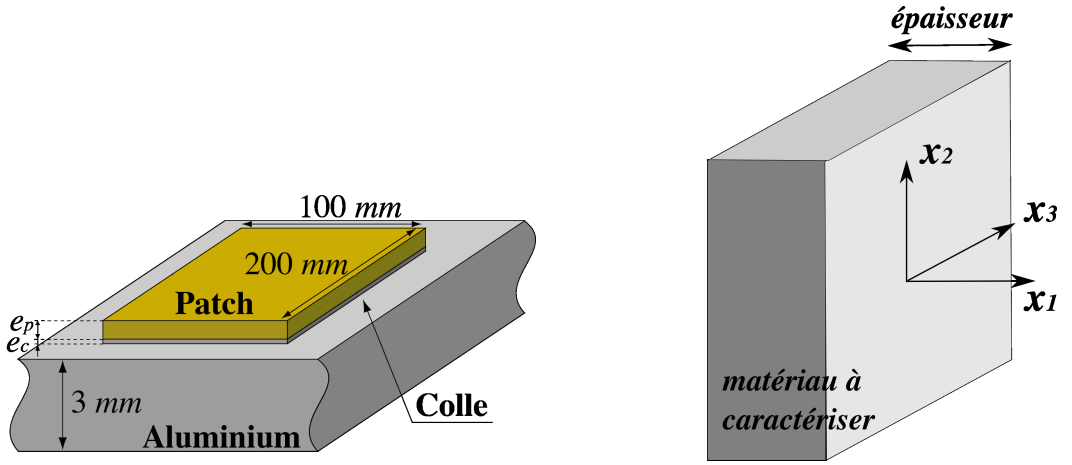


FIGURE 1.2 – (a) Schéma de la géométrie retenue pour l'étude des propriétés d'un assemblage collé et (b) repère utilisé pour caractériser chacun des matériaux pris isolément.

L'objectif est de mettre au point une technique non destructive, de préférence sans contact et à accès unilatéral, permettant de caractériser de manière quantitative les propriétés du collage. Pour y parvenir il est nécessaire de connaître avec suffisamment de précision les différents matériaux dont est constitué l'assemblage collé. Cela signifie avoir accès à leurs épaisseurs, leurs masses volumiques et leurs modules de viscoélasticité respectifs. Les deux premiers paramètres sont aisément accessibles par une mesure au comparateur et une pesée de l'échantillon. Mais mesurer les modules de viscoélasticité s'avère moins aisé. Afin de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux, trois techniques ultrasonores ont été employées : deux en immersion et une au contact. Ces méthodes ne répondent pas aux critères industriels de caractérisation *in situ* puisque d'une part les deux premières exigent un accès bilatéral et d'autre part les couplages employés pour les trois méthodes peuvent s'avérer problématiques (techniques à immersion ou au contact avec présence d'un produit de couplage). Avoir recours à ces méthodes de caractérisations permet néanmoins d'obtenir un point de départ pour l'étude : les modules de viscoélasticité des différents matériaux. Dans les chapitres suivants ces modules vont en effet permettre de calculer les courbes de dispersion des ondes guidées se propageant le long d'un assemblage collé. L'étude de sensibilité consistera alors à faire varier les modules de viscoélasticité de chacun des matériaux. De cette manière il sera possible de mettre en évidence qui de l'aluminium, du patch ou de la colle influence le plus la propagation des ondes guidées.

L'objectif de ce chapitre consiste donc à évaluer les modules complexes C_{ij} de la matrice de rigidité de chacun des matériaux, les parties réelles d'un module représentant la raideur et les parties imaginaires la viscoélasticité de ce matériau [49, 50].

1.1 Rappels théoriques sur la matrice des rigidités C

Tout ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte de l'acoustique linéaire sous l'hypothèse des petites déformations. Le repère de travail est représenté sur la figure 1.2. La direction 1 est définie par la direction normale à la surface du matériau caractérisé, les directions 2 et 3 sont définies dans le plan du matériau.

Dans un repère de coordonnées cartésiennes, le tenseur des déformations s'écrit :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\Big(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\Big) \tag{1.1}$$

C'est un tenseur de rang 2, symétrique, il ne contient donc que 6 composantes indépendantes. Pour cette raison la notation sous forme de vecteur est généralement adoptée [51] :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \tag{1.2}$$

avec la convention classique de contraction d'indices :

$$\alpha = 1,2,3,4,5,6 \quad \text{lorsque} \quad (\text{i,j}) = (1,1),(2,2),(3,3),(2,3),(1,3),(1,2)$$

De la même manière le vecteur des contraintes, issu du tenseur du même nom, peut être noté :

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \tag{1.3}$$

Ces deux grandeurs tensorielles sont liées entre elles par la loi de Hooke. Cette loi est écrite ici avec la règle de sommation sur les indices répétés :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \tag{1.4}$$

ou, avec la convention de contraction des indices :

$$\sigma_\alpha = C_{\alpha\beta}\varepsilon_\beta \tag{1.5}$$

où $\mathbf{C}$ est un tenseur de rang 4 appelé tenseur des rigidités.

Dans le cas le plus général le tenseur $\mathbf{C}$ est symétrique et composé de 21 composantes indépendantes (des considérations de symétrie et de thermodynamique permettent de passer de 81 à 21 composantes). C'est le cas d'un matériau ne possédant aucune symétrie, le matériau triclinique.

La plupart des matériaux utilisés dans le monde industriel possèdent des symétries supplémentaires : ils sont au plus orthotropes. C'est à dire qu'ils possèdent 3 plans de symétrie, appelés aussi plans principaux. La matrice des rigidités doit alors rester inchangée lors d'un changement de base par rapport au plan principal considéré. Cela conduit à une matrice des rigidités à neuf composantes indépendantes de la forme suivante :

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ - & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ - & - & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & C_{44} & 0 & 0 \\ - & - & - & - & C_{55} & 0 \\ - & - & - & - & - & C_{66} \end{pmatrix} \tag{1.6}$$

Cette expression de la matrice des rigidités, comme toutes les expressions de **C** présentées dans ce paragraphe, est valable lorsque les directions principales du matériau coïncident avec les directions 1, 2 et 3 du repère de travail (cf. figure 1.2).

Les matériaux dont il sera question par la suite possèdent encore plus de symétries. Tout d'abord les composites unidirectionnels possèdent un axe de révolution. Ce type de matériau est isotrope transverse (ou hexagonal), la matrice des rigidités est composée de 5 modules indépendants. Lorsque les fibres sont alignées parallèlement à la direction 3, elle est de la forme :

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ - & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ - & - & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & C_{55} & 0 & 0 \\ - & - & - & - & C_{55} & 0 \\ - & - & - & - & - & \dfrac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{pmatrix} \tag{1.7}$$

Ensuite les composites [0°/90°]. Ils sont constitués de la superposition de plis dont les fibres sont orientées parallèlement à la direction 3 et de plis dont les fibres sont orientées parallèlement à la direction 2. Ils possèdent des propriétés identiques suivant les directions 2 et 3 et appartiennent à la classe des matériaux quadratiques. Leur matrice des rigidités est composée de 6 modules indépendants :

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ - & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ - & - & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & C_{44} & 0 & 0 \\ - & - & - & - & C_{66} & 0 \\ - & - & - & - & - & C_{66} \end{pmatrix} \tag{1.8}$$

Enfin un matériau est isotrope si ses propriétés sont indépendantes du choix des axes de référence. C'est le cas par exemple de l'aluminium et du plexiglas. Ces considérations amènent à écrire une matrice de rigidité à seulement deux modules indépendants :

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ - & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ - & - & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & \dfrac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ - & - & - & - & \dfrac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ - & - & - & - & - & \dfrac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{pmatrix} \tag{1.9}$$

Comme précisé dans l'introduction, ces différents modules peuvent être complexes, les parties réelle et imaginaire représentant respectivement la raideur et la viscoélasticité du matériau.

1.2 Les méthodes de caractérisation

1.2.1 La caractérisation par fonctions de transfert

L'objectif de cette technique développée au LMP à la fin des années 90 est d'identifier les modules de viscoélasticité du matériau considéré en comparant les champs acoustiques transmis obtenus expérimentalement à ceux obtenus par calcul. Les matériaux caractérisés sont dans un premier temps supposés orthotropes, cette technique permet donc de déterminer ses 9 modules de viscoélasticité. Ensuite il est possible de retrouver les symétries de l'échantillon testé en fonction des valeurs obtenues (matériau isotrope, quadratique, etc.).

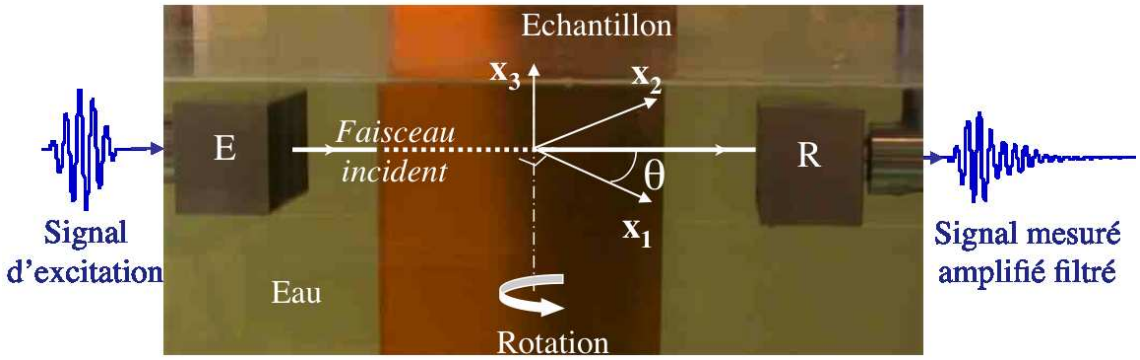


FIGURE 1.3 – Dispositif expérimental utilisé lors des caractérisations de matériaux par les méthodes ultrasonores à immersion.

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 1.3 : l'échantillon est immergé puis insonifié La totalité du champ acoustique transmis est alors mesurée sans discerner les ondes longitudinales et transversales [52]. Puisque les différents échos qui se propagent dans l'échantillon n'ont pas besoin d'être séparés dans le temps, la zone de fréquences est choisie assez faible pour que le milieu soit homogène vis-à-vis de la longueur d'onde, mais pas trop pour que le champ acoustique transmis soit porteur d'informations concernant la viscoélasticité du matériau. Une attention particulière est portée aux transducteurs de manière à ce que la condition d'onde localement plane soit toujours respectée. En effet, cette condition permet de réduire le coût du calcul dans la mesure où la prise en compte de la dimension finie du champ acoustique impliquerait une sommation d'ondes planes en fonction de l'ouverture angulaire des transducteurs utilisés. De son côté, le modèle prend en compte l'anisotropie et la viscoélasticité des matériaux par l'intermédiaire du principe des ondes planes hétérogènes et des modules de viscoélasticité complexes $C_{ij} = C'_{ij} + IC''_{ij}$ [49,53,54]. Les C_{ij} théoriques sont alors modifiés jusqu'à ce que les champs expérimentaux et calculés se superposent au mieux dans tout le domaine angles-fréquences choisi lors des mesures. Pour les matériaux dont il est question dans ce chapitre le domaine de fréquences sera choisi entre 0,1 et 1 MHz tandis que les angles d'incidence s'échelonneront entre 0 et 50°.

Ce problème inverse est résolu en minimisant la fonctionnelle suivante :

$$F(C_{ij}) = \sum_{p=1}^{P}\sum_{q=1}^{Q}\left(|A_T^{Th}(f_p,\theta_q,C_{ij})| - |A_T^{Exp}(f_p,\theta_q)|\right)^2 \tag{1.10}$$

où $m = P \times Q$ est le nombre total de points de comparaison dans le domaine angles-fréquences, $|A_T^{Th}(f_p,\theta_q,C_{ij})|$ est le module du spectre du champ transmis théorique à la fréquence f_p, à l'angle θ_q et pour les modules de viscoélasticité C_{ij}. Enfin $|A_T^{Exp}(f_p,\theta_q)|$ est le module du spectre du champ transmis mesuré à la fréquence f_p et à l'angle θ_q.

A chaque pas de l'optimisation des modules de viscoélasticité, le spectre du champ transmis théorique est calculé grâce à la relation 1.11, valable lorsqu'une onde plane incidente insonifie la surface d'une plaque homogène, anisotrope et viscoélastique, placée dans un fluide parfait :

$$|A_T^{Th}(f,\theta,C_{ij})| = |T^{Th}(f,\theta,C_{ij}) \times A_I^{Exp}(f)| \tag{1.11}$$

où f et θ sont respectivement la fréquence et l'angle d'incidence, A_I^{Exp} désigne le spectre fréquentiel de l'onde incidente mesurée expérimentalement, A_T^{Th} représente le spectre du champ acoustique transmis calculé et T^{Th} le coefficient de transmission de l'onde. Ce dernier est calculé grâce à la méthode des impédances de surface [55, 56]

Les modules C_{ij} sont optimisés grâce à une combinaison des algorithmes du simplex et de Newton-Raphson [57, 58]. Les données obtenues en incidence normale permettent d'optimiser le C_{11}. Les autres modules sont obtenus *via* les mesures en incidence oblique dans le plan P_{12} (défini par les axes x_1 et x_2) pour C_{22}, C_{12} et C_{66}, ans le plan P_{13} pour C_{33}, C_{13} et C_{55}, et enfin dans le plan pour lequel l'échantillon est incliné à 45°, noté P_{45°, pour optimiser C_{23} et C_{44}.

Le calcul des erreurs faites dans l'estimation des C_{ij} est basé sur le calcul des matrices d'insensibilité [59]. Cette méthode permet d'estimer, dans chacun des plans de mesures (P_{12}, P_{13} et P_{45°) les erreurs relatives commises sur les modules de viscoélasticité complexes (parties réelles et imaginaires). Cette méthode est très brièvement présentée ici.

Soient m valeurs expérimentales représentées par un vecteur $\tilde{\mathbf{V}}_k$ ($k \in \{1,\ldots,m\}$), considérées comme la somme d'une valeur vraie, notée $\mathbf{V}_k$, et d'une erreur expérimentale $\Delta\mathbf{V}_k$, c'est à dire :

$$\tilde{\mathbf{V}}_k = \mathbf{V}_k + \Delta\mathbf{V}_k$$

Soit $(C_i)_{i=1\ldots n}$ un vecteur à n composantes que l'on cherche à identifier grâce aux vecteurs $\tilde{\mathbf{V}}_{k=1,\ldots,m}$ avec $m \ll n$. La résolution d'un problème inverse en utilisant la méthode classique de Newton-Raphson consiste à trouver la meilleure estimation des paramètres C_i afin de minimiser la forme quadratique positive suivante :

$$F(\tilde{\mathbf{C}}) = \sum_{k=1}^{m}\left(\tilde{\mathbf{V}}_k - V(\tilde{\mathbf{C}})|_k\right)^2 \tag{1.12}$$

où $\tilde{\mathbf{C}} = (C_i + \partial C_i)_{i=1,\ldots,n}$ est la somme de la meilleure estimation de la solution, notée $\mathbf{C}$, et d'une erreur $\partial\mathbf{C}$. V est une fonction des composantes recherchées. Elle est connue par l'intermédiaire du problème direct. Un algorithme de minimisation (ici une combinaison de l'algorithme su simplex et de celui de Newton-Raphson) permet d'obtenir la meilleure estimation de $\tilde{C}_i = C_i + \Delta C_i$ avec l'erreur ΔC_i.

Soit $\mathbf{E} = (e_k)_{k=1...m}$ le vecteur différence entre les valeurs calculées et celles mesurées. Il est défini par :

$$e_k = \tilde{\mathbf{V}}_k - V(\tilde{\mathbf{C}})|_k$$

Soit $\mathbf{r} = (r_i)_{i=1...n}$ le vecteur erreur relative recherché. Il est défini par :

$$r_i = \frac{\Delta C_i}{C_i}$$

Ces deux vecteurs sont liés entre eux par la matrice d'insensibilité $\mathbf{I}$:

$$\mathbf{r} = \mathbf{IE} \tag{1.13}$$

La matrice d'insensibilité de taille $(n \times m)$ est l'inverse de la matrice de sensibilité qui peut être calculée à partir des dérivées de la fonction $V(\tilde{\mathbf{C}})$, c'est à dire $(\partial V(\tilde{\mathbf{C}})/\partial \tilde{\mathbf{C}})_k$. Finalement, tous calculs faits (calculs dont le détail est présenté dans l'annexe de la référence [59]) la plus grande erreur commise sur les r_i peut être maximisée de la manière suivante :

$$\max_{i=1}^{n}(r_i) \leq \sum_{k=1}^{m} |I_{ik} e_k| \tag{1.14}$$

Cette estimation d'erreur sera bien évidemment à prendre en compte lors de la caractérisation des matériaux. Par la suite elle sera également considérée lors des études de sensibilité des ondes guidées aux propriétés viscoélastiques des différents matériaux constituant l'assemblage collé. De cette manière il sera possible de déterminer quelles ondes guidées sont insensibles à une variation de l'ordre de grandeur de l'erreur commise sur les modules de viscoélasticité des substrats. Une telle onde guidée, si elle est sensible aux propriétés viscoélastiques du joint de colle, pourra alors être générée / détectée grâce à un dispositif de mesure à accès unilatéral et sans contact afin d'évaluer la qualité d'un joint de colle.

1.2.2 La caractérisation par temps de vol

Cette technique classique de caractérisation [50,60,61], consiste à mesurer des temps de propagation et des atténuations des ondes longitudinales et transversales générées dans le matériau à tester. Elle est valable sous deux hypothèses :

- que le matériau soit homogène à l'échelle des longueurs d'onde considérées ;
- que les échos des modes générés soient parfaitement séparés pour permettre une mesure de temps de vol.

Sous de telles conditions une onde incidente est générée par un transducteur piézoélectrique travaillant en immersion sous une incidence θ généralement comprise entre 0 et 70°. Pour chaque angle d'incidence θ une mesure de temps de vol et d'amplitude est effectuée avec le même dispositif expérimental que pour la méthode précédente. (Cf. figure 1.3.)

Les modes générés à l'interface liquide/solide sont au nombre de deux ou trois selon que le plan de mesure soit principal (P_{12} et P_{13}) ou pas ($P_{45°}$). Il existe ainsi au plus un mode quasi longitudinal et deux modes quasi transversaux. La traversée de l'échantillon par chacun d'eux entraîne un retard de phase du signal incident. En mesurant ces retards τ_m^{exp} pour différents angles d'incidence il est alors possible de construire les courbes de lenteur de phase expérimentales des modes générés dans le matériau grâce à la relation :

$$L_m^{exp} = \frac{1}{c_m^{exp}} = \frac{1}{c_e}\sqrt{1 + \frac{\tau_m^{exp} c_e}{h}\left(\frac{\tau_m^{exp}}{h} - 2\cos(\theta)\right)} \tag{1.15}$$

où c_e est la vitesse de propagation dans le milieu incident, ici de l'eau, c_m^{exp} est la vitesse expérimentale de propagation de l'onde considérée dans l'échantillon d'épaisseur h et où θ est l'angle d'incidence.

Le modèle inverse est construit de la même manière que pour la méthode précédente. Les vitesses des ondes se propageant dans le milieu sont calculées grâce à l'équation de Christoffel [49] (équation 1.16) et à la loi de Snell-Descartes (équation 1.17) :

$$|\Gamma_{ij} - \rho(c_m^{theo})^2\delta_{ij}| = 0 \tag{1.16}$$

où $\Gamma_{ij} = C_{ijkl}n_k n_l$ $(i,j,k,l = 1,2,3)$, ρ est la masse volumique du matériau, $\mathbf{n}$ est le vecteur unitaire définissant la direction de propagation de l'onde dont la vitesse de phase est notée c_m^{theo}. Les C_{ijkl} $(i,j,k,l = 1,2,3)$, représentent les composantes du tenseur des rigidités et δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

$$\frac{\sin\theta}{c_e} = \frac{\sin\theta_m}{c_m} \tag{1.17}$$

avec θ_m qui définit l'angle selon lequel se propage le mode dans l'échantillon.

Un algorithme d'optimisation permet alors d'estimer le jeu de valeurs des modules de viscoélasticité qui permettent la meilleure corrélation entre les lenteurs de phases mesurées et calculées.

Afin de déterminer les parties imaginaires des modules de viscoélasticité du matériau il est nécessaire de travailler avec les atténuations mesurées, noté α_m^{exp}, et calculées α_m^{theo} qui dépendent des modules de viscoélasticité complexes du matériau. Encore une fois la procédure d'optimisation vise à minimiser l'écart quadratique moyen entre ces deux facteurs d'amortissement.

1.2.3 Les mesures au contact

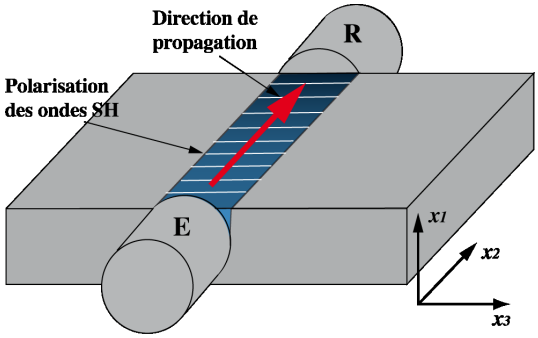


FIGURE 1.4 – Schéma de principe des mesure de C_{ij} au contact.

Une dernière technique de mesures, dite « au contact », permet de vérifier l'ordre de grandeur des parties réelles de certains des modules de viscoélasticité préalablement déterminés par les méthodes à immersion. Tout d'abord, des transducteurs travaillant en compression permettent de générer / détecter une onde de Lamb symétrique dont la vitesse est proche de celle des ondes longitudinales (L) se propageant soit dans la direction x_2 soit dans la direction x_3. Une mesure de temps de vol permet alors de calculer la vitesse de cette onde. Cette dernière est liée au module de rigidité : $C'_{22} = \rho c_{L2}^2$ pour la direction x_2 et $C'_{33} = \rho c_{L3}^2$ pour la direction x_3, où ρ

est la masse volumique de l'échantillon, c_{L2} et c_{L3} désignent les vitesses approchées des ondes longitudinales respectivement dans les directions x_2 et x_3. Dans un second temps, un autre type de transducteurs permet de générer / détecter une onde de Lamb antisymétrique (A_0) dont la vitesse est proche de celle des ondes transversales dans le plan de propagation (ondes T). Suivant la direction x_2, la mesure de temps de vol permet de remonter au module C'_{66}, grâce à la relation $C'_{66} = \rho c^2_{T2}$. Suivant la direction x_3, elle permet de remonter au module C'_{55}, grâce à la relation $C'_{55} = \rho c^2_{T3}$. Enfin, ces mêmes transducteurs sont utilisés pour générer / détecter les ondes transversales polarisées hors plan de propagation (ondes SH), par exemple polarisées suivant la direction 2 si elles se propagent suivant la direction 3 et vice versa. Que ce soit dans la direction x_2 ou x_3, la mesure de temps de vol permet d'estimer le module de rigidité C'_{44} *via* la relation $C'_{44} = \rho c^2_{SH}$. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure 1.4.

1.3 Résultats des mesures

1.3.1 Présentation des échantillons

Comme précisé dans l'introduction de ce chapitre, cette étude porte sur la propagation d'ondes guidées dans un assemblage de type aluminium/colle/patch. Pour effectuer une étude de sensibilité, il est indispensable de connaître les modules de viscoélasticité de chacun des matériaux le constituant. Ces modules permettent de calculer les courbes de dispersion de l'assemblage collé considéré. En les faisant varier il est possible de sélectionner une onde guidée à la fois sensible aux propriétés de la colle et faiblement sensible aux propriétés des autres matériaux. Pour ce travail de thèse il a été choisi de faire varier les propriétés des substrats au sein de l'intervalle de confiance de leur mesure.

Afin d'obtenir ces modules, des échantillons ont été spécifiquement réalisés par le CEAT et le LMP pour leur caractérisation. Leur description est faite ci-dessous :

- une plaque d'aluminium épaisse de 3 mm, de dimensions latérales 150×150 mm^2 ;
- une plaque de carbone époxy, faite de 32 plis unidirectionnels, de dimensions latérales 200×200 mm^2, épaisse de 5 mm ;
- une plaque de carbone époxy $[0°/90°]_{8s}$, faite de 32 plis, de dimensions latérales 200×200 mm, épaisse de 5 mm ;
- une plaque de plexiglas épaisse de 1 mm, de dimensions latérales 150×150 mm^2 ;
- une plaque de plexiglas épaisse de 3,46 mm, de dimensions latérales 150×150 mm^2 ;
- un assemblage verre / colle / verre dont il sera plus largement question dans le paragraphe 1.3.3.

Toutes les épaisseurs ont été mesurées avec une précision de $\pm 5\%$.

La mesure de la masse volumique des différents matériaux considérés est une étape préliminaire nécessaire à l'évaluation des modules de viscoélasticité. Les différents échantillons ont été pesés dans l'air puis dans l'eau et le calcul de masse volumique a été effectué grâce au principe d'Archimède. Celui-ci stipule que tout corps plongé dans un fluide reçoit une poussée, qui s'exerce de bas en haut, et qui est égale au poids du volume de liquide déplacé. La masse volumique d'un matériau peut ainsi être calculée de la manière suivante :

$$\rho = \frac{M_{air}}{M_{air} - M_{eau}} \tag{1.18}$$

Les résultats, obtenus avec une précision de ±3%, sont regroupées dans le tableau 1.1.

Matériau	**Densité** (g/cm^3)
Aluminium	2,67
Plexiglas	1,04
Carbone époxy	1,58
Colle	1,05

TABLE 1.1 – Densités des différents matériaux mesurées à ±3%.

1.3.2 Caractérisation des matériaux pris isolément

L'aluminium

L'aluminium est un matériau isotrope dont les propriétés sont bien connues. Classiquement la masse volumique, le module d'Young et le coefficient de Poisson considérés valent :

$$\begin{aligned} \rho &= 2{,}8\ g/cm^3 \\ E &= 72\ GPa \\ \nu &= 0{,}34 \end{aligned}$$

Ces constantes de l'ingénieur sont liées aux modules de viscoélasticité par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} E &= C_{11} - \frac{2{C_{12}}^2}{C_{11} + C_{12}} \\ \nu &= \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}} \end{aligned}$$

Dans un souci de précision, l'aluminium qui sert de substrat tout au long de l'étude a été caractérisé à la fois pour obtenir des données plus spécifiques à l'échantillon et pour estimer un intervalle de confiance sur ces modules mécaniques. Les modules d'élasticité ont été obtenus grâce à la méthode de caractérisation par temps de vol. L'échantillon a été insonifié à l'aide de transducteurs *Ultran WS100-5* de 25 mm de diamètre, dans la bande de fréquences [3,5 − 5,8] MHz (spectre à $-6\ dB$). Les signaux transmis à travers l'aluminium ont été mesurés de 0 à 30° par pas de 1°. Les résultats des mesures sont présentés sur la figure 1.5.

Les nombres d'onde k_1 et k_2 représentent respectivement les projections sur les axes x_1 et x_2 du nombre d'onde k_m de l'onde longitudinale $m = L$ ou transverse $m = T$ se propageant suivant la direction définie par l'angle θ_m à travers l'échantillon. Les lenteurs de phase tracées en traits pointillés ont été calculées avec les C_{ij} initiaux donnés dans le tableau 1.2. Ces valeurs sont équivalentes à celles du module d'Young et du coefficient de Poisson donnés ci-dessus tandis que celles tracées en traits pleins ont été calculées à partir de C_{ij} optimisés.

La méthode de caractérisation des matériaux par temps de vol permet de déterminer 9 modules de viscoélasticité en effectuant des mesures dans trois plans : P_{12}, P_{13} et $P_{45°}$. Comme l'aluminium est connu pour être isotrope, les mesures n'ont été faites que pour un seul plan, le plan P_{12}. Quatre modules de viscoélasticité peuvent alors être obtenus : C_{11}, C_{22}, C_{12} et C_{66}. Les résultats de l'optimisation sont présentés dans le tableau 1.2.

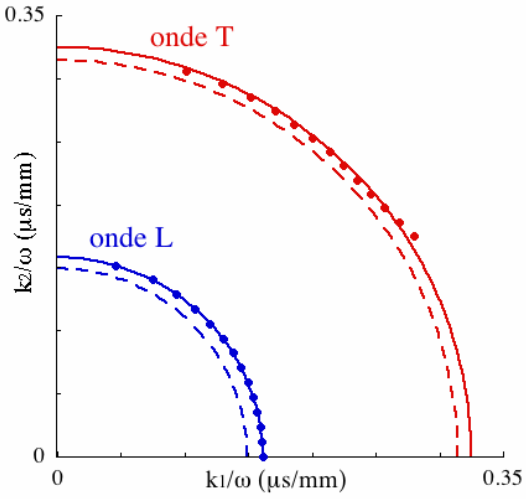


FIGURE 1.5 – Mesures expérimentales (•) et calculs avec des propriétés initiales (– –) et optimisées (——) des lenteurs de phase des ondes longitudinales et transverses se propageant à travers un aluminium de 3 *mm* d'épaisseur.

C_{ij} **initiaux**	C_{ij} **optimisés**
$C_{11} = 112$	$C_{11} = 103^{\pm 2}$
$C_{22} = 112$	$C_{22} = 107^{\pm 2}$
$C_{12} = 58$	$C_{12} = 54^{\pm 1}$
$C_{11} = 27$	$C_{66} = 25^{\pm 1}$

TABLE 1.2 – Modules de rigidité de l'aluminium, en GPa, obtenus *via* la méthode de caractérisation par temps de vol.

Les C_{ij} optimisés obtenus permettent de vérifier l'hypothèse d'un matériau isotrope puisque le C_{11} et le C_{22} ne diffèrent que de 3,8% et le C_{12} est effectivement égal au $C_{11} - 2C_{66}$ à moins de 2% près. De plus la forme des courbes de lenteurs de phase mesurées est quasi circulaire. Le matériau peut donc être considéré comme isotrope. Si l'échantillon est désormais considéré comme isotrope et qu'une nouvelle optimisation est réalisée à partir des précédentes mesures, le C_{11} et le C_{66} obtenus sont respectivement égaux à $103^{\pm 4}$ et $25^{\pm 1}$ GPa. Etant donné les différentes valeurs optimisées ainsi que les erreurs associées, les propriétés retenues pour l'aluminium seront les suivantes :

$$\begin{aligned} C_{11} &= 103^{\pm 5\%}\ GPa \\ C_{66} &= 25^{\pm 5\%}\ GPa \end{aligned}$$

ce qui correspond à un module d'Young de 67 GPa, à un module de Coulomb ($G = C_{66}$) de 25 GPa et à un coefficient de Poisson de 0,34.

Le plexiglas

Comme précisé page 15, deux épaisseurs d'échantillon ont été considérées : 1 et 3,46 mm. Le matériau mince a été caractérisé par la méthode des temps de vol. L'échantillon a été insonifié par les mêmes transducteurs *Ultran* et dans le même domaine de fréquences $[3{,}5 - 5{,}8]$ MHz que précédemment. Les lenteurs de phase ainsi que les amplitudes mesurées dans le plan P_{12} sont présentées sur la figure 1.6.

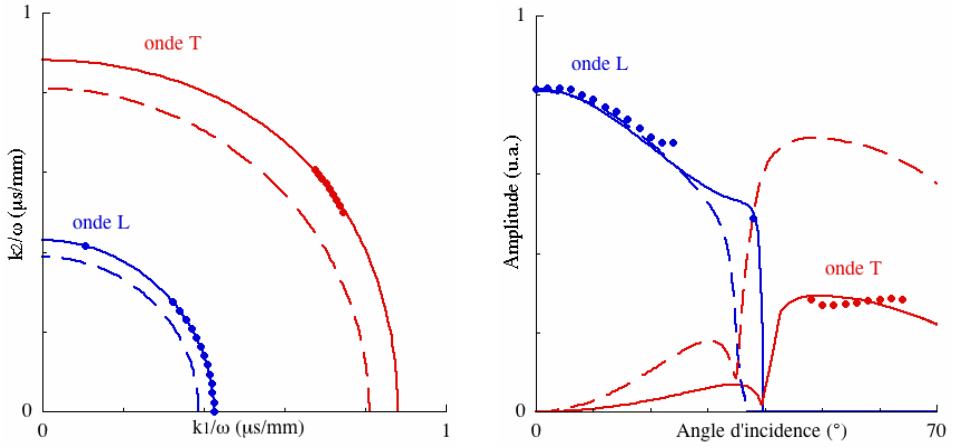


FIGURE 1.6 – Lenteurs de phase (a) et amplitudes (b) mesurées (•) et calculées avec des C_{ij} initiaux (– –) et optimisés (——) des ondes longitudinales et transverses se propageant dans le plan P_{12} d'un plexiglas épais de 1 mm.

Comme l'aluminium, le plexiglas est supposé être un matériau isotrope, c'est pour cette raison que les mesures n'ont été effectuées que dans un seul plan. Les lenteurs de phase et les amplitudes tracées en traits pointillés ont été calculées avec les C_{ij} initiaux donnés dans le tableau 1.3 tandis que celles tracées en traits pleins ont été calculées à partir de C_{ij} optimisés qui sont regroupés dans ce même tableau. Ces mesures permettent de vérifier que le plexiglas est bien isotrope et faiblement viscoélastique, la partie imaginaire des modules de viscoélasticité est de l'ordre de 2% de leur partie réelle. Cet ordre de grandeur reste néanmoins à vérifier du fait des différences observées entre les amplitudes mesurées et calculées (cf. figure 1.6(b)).

La caractérisation d'un échantillon plus épais (3,46 mm) conduit aux résultats présentés dans le tableau 1.3. Cette caractérisation a été réalisée grâce à la méthode des fonctions de transfert. Pour cet échantillon l'isotropie du plan dans lequel ont été effectuées les mesures, est également vérifiée, ainsi que la faible viscoélasticité du matériau (de l'ordre de 1% des modules de rigidité).

La figure 1.7 présente les fonctions de transfert mesurées (points) et calculées avec des C_{ij} initiaux (pointillés) et optimisées des C_{ij} (traits pleins). La concordance entre les fonctions de transfert mesurées et calculées montre bien la sensibilité de la méthode pour caractériser avec précision le matériau puisque les deux jeux de modules de viscoélasticité (initial et optimisé) diffèrent au plus de 10% tandis que les différences entre leur fonctions de transfert sont nettes, voire très prononcées pour $\theta = 40°$.

Ces deux caractérisations ont conduit à des résultats quelque peu différents, le C_{11} change en effet de 10% approximativement. Cela peut avoir plusieurs origines :

- des différences de fabrication entre les matériaux ;
- des différences dues au fait que les mesures n'ont pas été réalisées avec les mêmes transducteurs. Pour la caractérisation par la méthode des fonctions de transfert la surface active des transducteurs est 5 fois plus grande que celle des transducteurs utilisés pour la caractérisation par temps de vol.

Finalement ce seront les propriétés suivantes qui seront retenues :

- Pour l'échantillon mince :

$$C'_{11} = 5{,}7^{\pm 5\%} \qquad C''_{11} = 0{,}12^{\pm 15\%}$$
$$C'_{66} = 1{,}4^{\pm 5\%} \qquad C''_{66} = 0{,}03^{\pm 15\%}$$

- Pour l'échantillon épais :

$$C'_{11} = 6{,}3^{\pm 5\%} \qquad C''_{11} = 0{,}06^{\pm 15\%}$$
$$C'_{66} = 1{,}5^{\pm 5\%} \qquad C''_{66} = 0{,}01^{\pm 15\%}$$

Le carbone époxy

Contrairement aux matériaux précédemment caractérisés, les composites sont hétérogènes puisqu'ils sont constitués d'un empilement de plis, chacun étant lui-même constitué de fibres noyées dans une matrice. Le choix de la fréquence de travail doit donc tenir compte de ces caractéristiques afin que le matériau soit homogène vis à vis de la longueur d'onde. Pour un pli unidirectionnel de matériau composite, *a priori* les vitesses des ondes sont comprises entre 1,4 et 9 $mm/\mu s$. Dans le cas présent chaque pli de carbone époxy est épais de 0,15 mm. Pour un empilement de type $[0° \,/\, 90°]_{8s}$, l'épaisseur de la super-couche, qui représente la plus forte hétérogénéité, est donc de 0,3 mm. Pour caractériser ce matériau par fonctions de transfert il est nécessaire que la plus petite longueur d'onde soit au moins 6 fois supérieure à cette

	C_{ij} **initiaux**		C_{ij} **optimisés**	
Plexiglas 1 mm	$C'_{11} = 7$	$C''_{11} = 0{,}14$	$C'_{11} = 5{,}8^{\pm 0{,}2}$	$C''_{11} = 0{,}12^{\pm 0{,}02}$
	$C'_{22} = 7$	$C''_{22} = 0{,}14$	$C'_{22} = 5{,}7^{\pm 0{,}2}$	$C''_{22} = 0{,}12^{\pm 0{,}03}$
	$C'_{12} = 3{,}8$	$C''_{12} = 0{,}076$	$C'_{12} = 3{,}2^{\pm 0{,}1}$	$C''_{12} = 0{,}06^{\pm 0{,}03}$
	$C'_{66} = 1{,}6$	$C''_{66} = 0{,}032$	$C'_{66} = 1{,}35^{\pm 0{,}03}$	$C''_{66} = 0{,}03^{\pm 0{,}01}$
Plexiglas 3,46 mm	$C'_{11} = 7$	$C''_{11} = 0{,}14$	$C'_{11} = 6{,}3^{\pm 0{,}3}$	$C''_{11} = 0{,}06^{\pm 0{,}02}$
	$C'_{22} = 7$	$C''_{22} = 0{,}14$	$C'_{22} = 5{,}9^{\pm 0{,}3}$	$C''_{22} = 0{,}05^{\pm 0{,}02}$
	$C'_{12} = 3{,}8$	$C''_{12} = 0{,}076$	$C'_{12} = 3{,}1^{\pm 0{,}1}$	$C''_{12} = 0{,}02^{\pm 0{,}01}$
	$C'_{66} = 1{,}6$	$C''_{66} = 0{,}032$	$C'_{66} = 1{,}5^{\pm 0{,}02}$	$C''_{66} = 0{,}01^{\pm 0{,}005}$

TABLE 1.3 – Modules de viscoélasticité (en GPa) des échantillons de plexiglas mesurés avec la méthode des temps de vol pour le plexiglas de 1 mm et avec la méthode des fonctions de transfert pour le plexiglas de 3,46 mm.

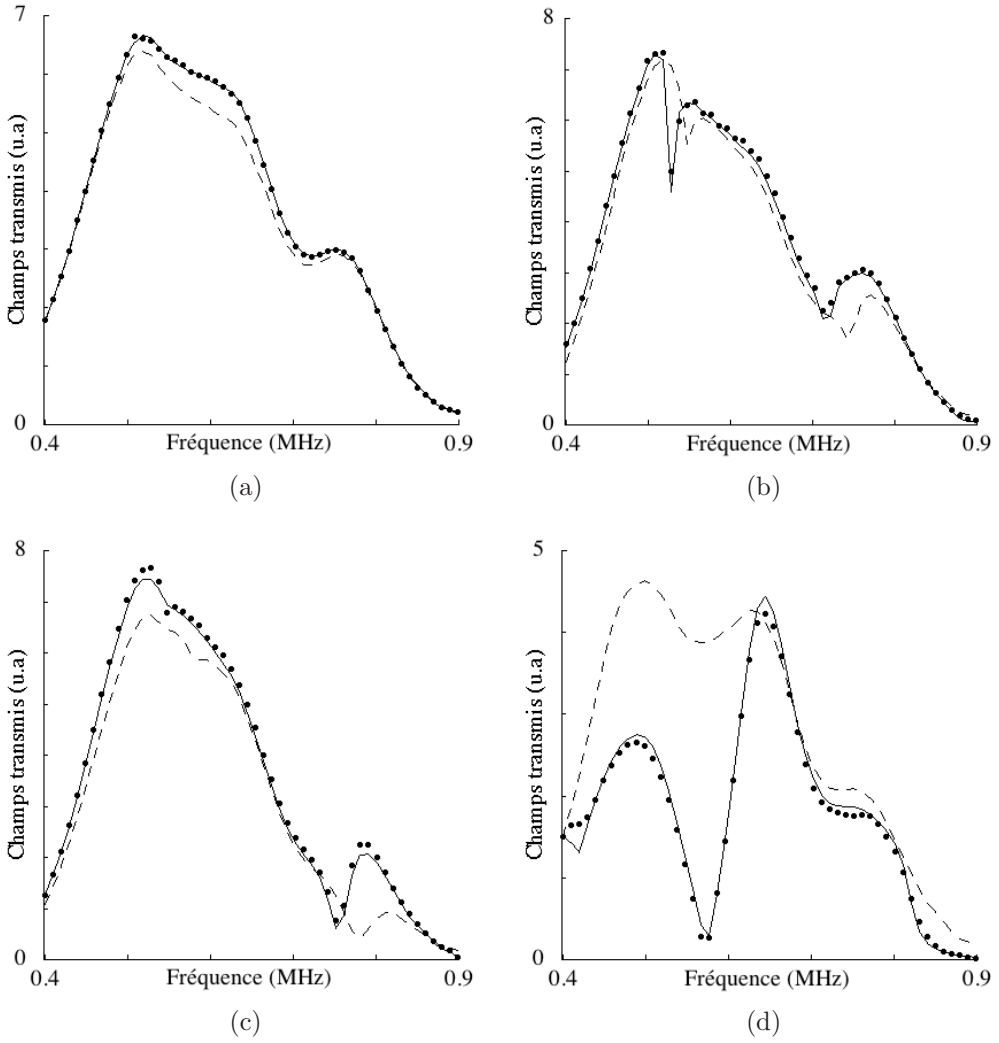


FIGURE 1.7 – Fonctions de transfert expérimentales (•) et calculées avec des C_{ij} optimisés (——) et non optimisés (– –) du champs transmis à 0° (a), 20° (b), 28° (c) et 40° (d).

épaisseur [62]. Ceci impose de travailler à une fréquence inférieure à 0,78 MHz. D'autre part, pour ne pas trop perdre en sensibilité, la fréquence de travail ne doit pas être trop basse. Il est convenu de travailler à des fréquences supérieures à 0,3 MHz, ce qui influencera le choix des transducteurs.

L'échantillon fourni par le CEAT est un empilement $[0° / 90°]_{8s}$ d'épaisseur $5^{\pm 0,1}$ mm. Il est insonifié par deux transducteurs rectangulaires *Imasonic 3258* de dimensions latérales 100×40 mm^2. Le spectre à -6 dB du signal de référence (transmission directe dans l'eau) est compris dans la bande de fréquences $[0,3-0,7]$ MHz. Le signal transmis par l'échantillon a été enregistré tous les 2° entre 0 et 50° pour les deux. Une partie des fonctions de transfert mesurées est tracée (points) sur la figure 1.8. Ces fonctions de transfert sont superposées à celles calculées à partir d'un jeux de C_{ij} initiaux (pointillés) et optimisés (traits pleins) du composite. Les valeurs de ces modules de viscoélasticité sont données dans la première partie du tableau 1.4.

Ces premiers résultats permettent effectivement de vérifier la symétrie du matériau considéré. A savoir que les plans P_{12} et P_{13} sont, aux erreurs de mesures près, identiques entre

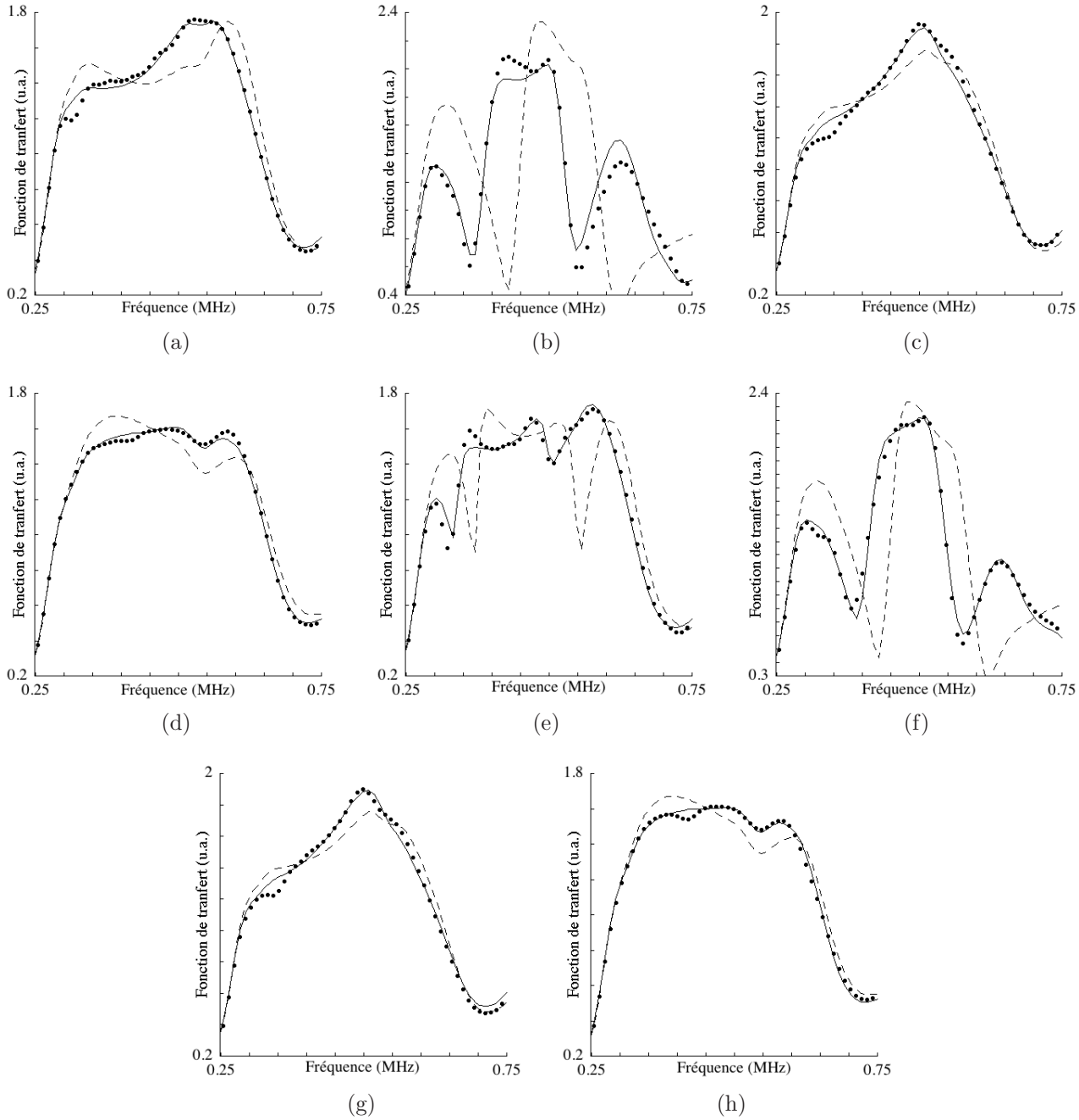


FIGURE 1.8 – Fonctions de transfert expérimentales (•) et calculées avec des C_{ij} optimisés (—) et non optimisés (– –) du champs transmis à travers un carbone époxy $[0° / 90°]_{8s}$ et pour un angle d'incidence de 0° (a), 8° (b), 18° (c) et 30° (d) dans le plan principal P_{12} ainsi que de 4° (e), 8° (f), 18° (g) et 30° (h) dans le plan principal P_{13}.

		C_{ij} **initiaux**		C_{ij} **optimisés**	
Caractérisation par fonctions transfert	**Plan P_{12}**	$C'_{11} = 14$	$C''_{11} = 0{,}28$	$C'_{11} = 13^{\pm 2}$	$C''_{11} = 0{,}15^{\pm 0{,}05}$
		$C'_{22} = 80$	$C''_{22} = 4$	$C'_{22} = 70^{\pm 2}$	$C''_{22} = 2^{\pm 1}$
		$C'_{12} = 8$	$C''_{12} = 0{,}4$	$C'_{12} = 6{,}5^{\pm 0{,}7}$	$C''_{12} = 0{,}2^{\pm 0{,}1}$
		$C'_{66} = 5$	$C''_{66} = 0{,}1$	$C'_{66} = 3{,}7^{\pm 0{,}2}$	$C''_{66} = 0{,}1^{\pm 0{,}05}$
	Plan P_{13}	$C'_{11} = 14$	$C''_{11} = 0{,}28$	$C'_{11} = 13^{\pm 2}$	$C''_{11} = 0{,}23^{\pm 0{,}2}$
		$C'_{33} = 80$	$C''_{33} = 4$	$C'_{33} = 74^{\pm 2}$	$C''_{33} = 4^{\pm 3}$
		$C'_{13} = 8$	$C''_{13} = 0{,}4$	$C'_{13} = 7^{\pm 1}$	$C''_{13} = 0{,}2^{\pm 0{,}1}$
		$C'_{55} = 5$	$C''_{66} = 0{,}1$	$C'_{55} = 4{,}1^{\pm 0{,}1}$	$C''_{55} = 0{,}2^{\pm 0{,}1}$
Caractérisation par temps de vol	**Plan P_{12}**	$C'_{11} = 14$	$C''_{11} = 0{,}28$	$C'_{11} = 15{,}2^{\pm 0{,}3}$	$C''_{11} = 0{,}34^{\pm 0{,}06}$
		$C'_{22} = 80$	$C''_{22} = 4$	$C'_{22} = 65^{\pm 7}$	$C''_{22} = 2^{\pm 1}$
		$C'_{12} = 8$	$C''_{12} = 0{,}4$	$C'_{12} = 8{,}6^{\pm 0{,}8}$	$C''_{12} = 0{,}5^{\pm 0{,}2}$
		$C'_{66} = 5$	$C''_{66} = 0{,}1$	$C'_{66} = 4{,}4^{\pm 0{,}3}$	$C''_{66} = 0{,}2^{\pm 0{,}03}$
	Plan P_{13}	$C'_{11} = 14$	$C''_{11} = 0{,}28$	$C'_{11} = 15{,}3^{\pm 0{,}2}$	$C''_{11} = 0{,}3^{\pm 0{,}2}$
		$C'_{33} = 80$	$C''_{33} = 4$	$C'_{33} = 72^{\pm 8}$	$C''_{33} = 2^{\pm 1}$
		$C'_{13} = 8$	$C''_{13} = 0{,}4$	$C'_{13} = 9^{\pm 1}$	$C''_{13} = 0{,}2^{\pm 0{,}1}$
		$C'_{55} = 5$	$C''_{66} = 0{,}1$	$C'_{55} = 3{,}7^{\pm 0{,}4}$	$C''_{55} = 0{,}3^{\pm 0{,}1}$

TABLE 1.4 – Modules de viscoélasticité (en GPa) d'un composite $[0° / 90°]_{8s}$ de 5 mm d'épaisseur mesurés *via* la méthode des fonctions de transfert et celle des temps de vol.

eux :

$$\begin{aligned} C_{22} &\approx C_{33} \qquad \text{(écart de 5,5\%)} \\ C_{12} &\approx C_{13} \qquad \text{(écart de 7,2\%)} \\ C_{66} &\approx C_{55} \qquad \text{(écart de 9,8\%)} \end{aligned}$$

Les écarts entre les modules de viscoélasticité initiaux et optimisés sont inférieurs à 15% pour le C_{11}, le C_{22}, le C_{33} et le C_{13}, de l'ordre de $22-23\%$ pour le C_{12} et le C_{55} et de 35% pour le C_{66}. Les fonctions de transfert mesurées (présentées sur la figure 1.8) et tout particulièrement les courbes (b), (e) et (f), sont fortement chahutées. La comparaison d'un jeu de fonctions de transferts calculées avec celles mesurées va ainsi permettre d'optimiser les C_{ij} en faisant se superposer les deux jeux de courbes. Tout d'abord les disparités observables entre les fonctions de transfert calculées à partir des C_{ij} intiaux et celle mesurées montre qu'il est nécessaire d'ajuster les propriétés viscoélastiques du matériau. Une fois ces propriétés optimisées, les fonctions de transfert calculées à partir de ce nouveau jeu de valeurs se superposent bien aux fonctions de transfert mesurées. Etant donné que les C_{ij} initiaux diffèrent des C_{ij} optimisés de 15 à 23%, il est raisonnable d'estimer que l'erreur commise sur les modules de viscoélasticité ne dépasse pas $15-20\%$.

Néanmoins cette caractérisation n'a apporté aucune indication sur le C_{44} et le C_{23}. Le premier de ces deux modules a donc été mesuré « au contact ». Deux transducteurs à ondes de cisaillement *Panametrics V151* ont permis d'émettre et recevoir un signal acoustique de 5

cycles, de fréquence centrale 0,5 MHz. Ces deux éléments piézoélectriques ont été orientés de manière à ce que l'onde émise soit polarisée horizontalement (onde SH). Une mesure du temps de vol de cette onde guidée SH permet alors d'estimer la vitesse de propagation des ondes SH. Grâce à la relation qui existe entre cette vitesse et la partie réelle du module de viscoélasticité C_{44} ($C'_{44} = \rho c_{SH}^2$), il est ainsi possible d'évaluer le C'_{44} de l'échantillon de composite. Ce dernier a été estimé à $6^{\pm 0,5}$ GPa.

Ce matériau a également été caractérisé par « temps de vol ». L'échantillon a été insonifié par deux transducteurs *Panametrics A304R*, de 25 mm de diamètre, entre 1,6 et 2,7 MHz (spectre à $-6dB$). Pour ce domaine de fréquences l'hypothèse d'homogénéité du matériau vis à vis de la longueur d'onde des ondes transverses n'est plus respectée, d'un autre côté, à plus basse fréquence les échos des ondes longitudinales et transverses se propageant dans un échantillon de 5 mm ne sont pas séparés. Les mesures ont néanmoins été réalisées et l'analyse des résultats tiendra compte de l'hétérogénéité du matériau en accordant une certaine prudence vis a vis des valeurs qui seront obtenues pour les modules de viscoélasticité.

La figure 1.9 regroupe la comparaison des lenteurs de phase mesurées (symboles) et calculées à partir des C_{ij} initiaux (pointillés) et optimisés (traits pleins) dont les valeurs sont présentées dans la seconde moitié du tableau 1.4.

Cette figure montre que les courbes de lenteur de phase calculées à partir de données optimisées se superposent relativement bien à celles mesurées. D'ailleurs, les parties réelles des modules de viscoélasticité obtenues, soit lors d'une caractérisation par fonctions de transfert, soit lors d'une caractérisation par temps de vol, concordent lorsque les erreurs de mesures sont prises en compte, sauf en ce qui concerne le C_{12} et C_{13}. Ces deux modules sont égaux entre eux (aux erreurs de mesures près) pour chacune des deux caractérisations prise séparément mais le C_{12} issu des mesures de fonctions de transfert ne correspond ni au C_{12} ni au C_{13} issus des mesures de temps de vol. Cette différence confirme bien que le matériau n'est plus homogène vis à vis de la longueur d'onde des ondes transverses. Enfin, aucune des deux optimisations n'a permis d'obtenir de résultats suffisamment précis pour déterminer avec fiabilité les parties imaginaires. Les mesures effectuées dans le plan $P_{45°}$ n'ont pas plus permis d'évaluer le C_{44} et le C_{23} de ce matériau quadratique. Le C'_{44} a néanmoins pu être évalué grâce à une mesure au contact.

Afin de confirmer les divers résultats cohérents et d'obtenir des informations supplémentaires sur le C_{44} et le C_{23} ainsi que sur les parties imaginaires de l'ensemble des C_{ij}, une caractérisation d'un échantillon de carbone époxy unidirectionnel a été réalisée. Comme les plis élémentaires des échantillons unidirectionnel et $[0°/90°]_{8s}$ sont identiques, il est possible de calculer les C_{ij} du second échantillon à partir de ceux du premier, par l'intermédiaire d'une simulation numérique de la caractérisation par fonctions de transfert [53,63]. De plus le composite unidirectionnel est une base plus fiable pour ce processus de caractérisation dans la mesure où la taille de la plus forte hétérogénéité du matériau, un unique pli élémentaire, est deux fois plus faible que pour le composite $[0°/90°]_{8s}$. L'ensemble des jeux de modules de viscoélasticité obtenus, que ce soit pour le composite unidirectionnel ou l'échantillon $[0°/90°]_{8s}$, pourront également être vérifiés grâce aux invariants de propriétés [64].

L'échantillon unidirectionnel décrit page 15 a été insonifié par deux transducteurs *Panametrics A304R*, de 25 mm de diamètre dans la bande de fréquences $[1{,}55 - 2{,}75]$ MHz. La figure 1.10 présente la comparaison des lenteurs de phase et des amplitudes mesurées (points) et calculées avec les C_{ij} initiaux (pointillés) et optimisés (traits pleins) dont les valeurs sont

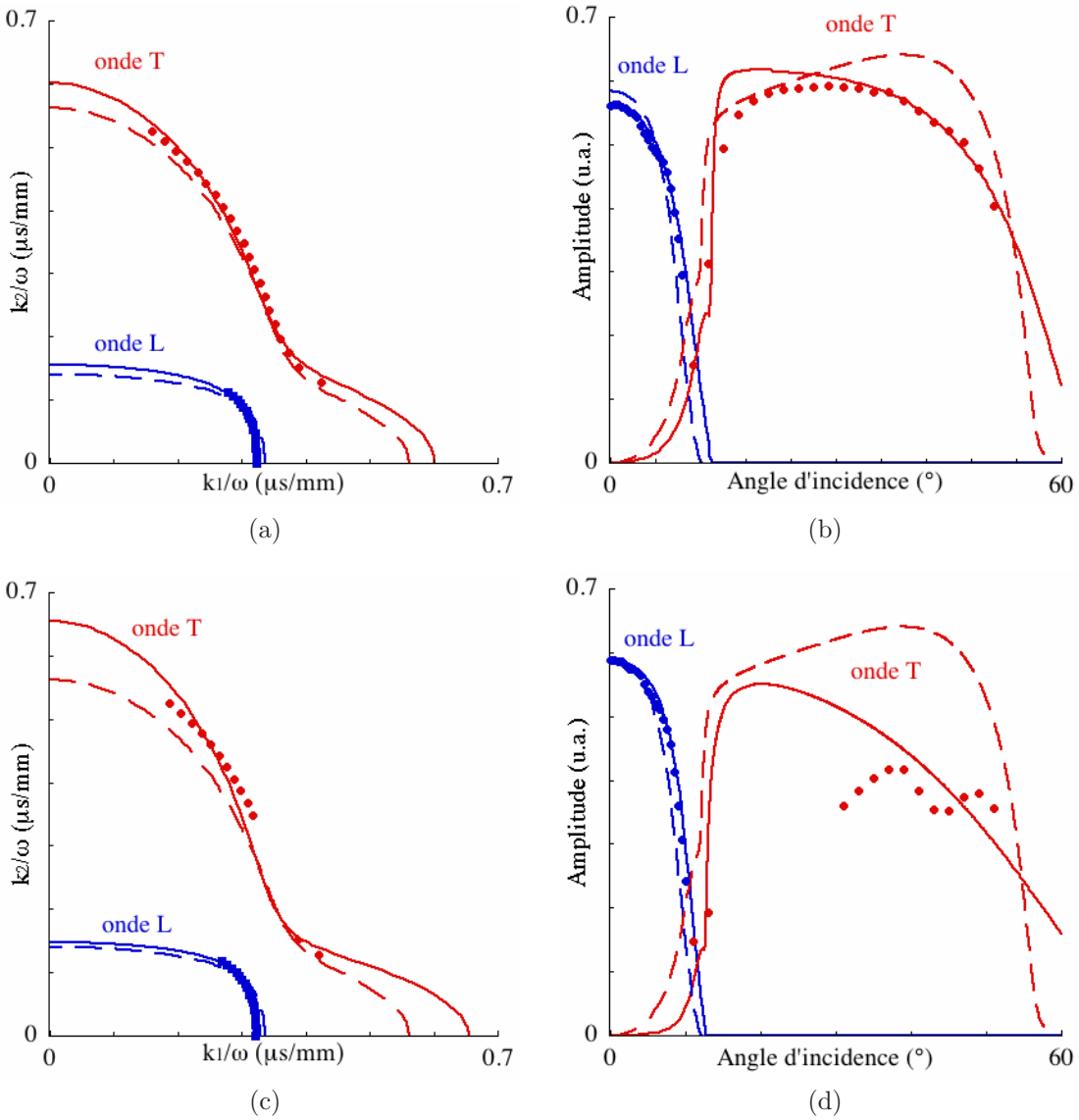


FIGURE 1.9 – Lenteurs de phase (colonne de gauche) et amplitudes (colonne de droite) expérimentales (•) et calculées avec des C_{ij} initiaux (– –) et optimisés (——) pour un carbone époxy $[0°/90°]_{8s}$ dans les plans principaux P_{12} (a) et (b) ainsi que P_{13} (c) et (d).

données dans le tableau 1.5.

Le composite unidirectionnel est de symétrie hexagonale, il possède donc 5 modules de viscoélasticité indépendants (cf. matrice présentée page 10). Aux erreurs de mesures près, l'échantillon caractérisé remplit tous les critères excepté la condition $C_{44} = C_{55}$, mais comme le montre les graphes (e) et (f) de la figure 1.10, les mesures effectuées dans le plan $P_{45°}$ sont moyennement sensibles aux C_{ij} pour cette épaisseur d'échantillon et cette plage de fréquences.

Ces résultats peuvent néanmoins servir de données d'entrée à une simulation numérique de la mesure par fonctions de transfert des modules de viscoélasticité d'un échantillon de carbone époxy $[0°/90°]_{8s}$. La caractérisation d'un matériau grâce à la méthode des fonctions de transfert exigent que l'échantillon sur lequel sont effectuées les mesures soit homogène vis à vis de la

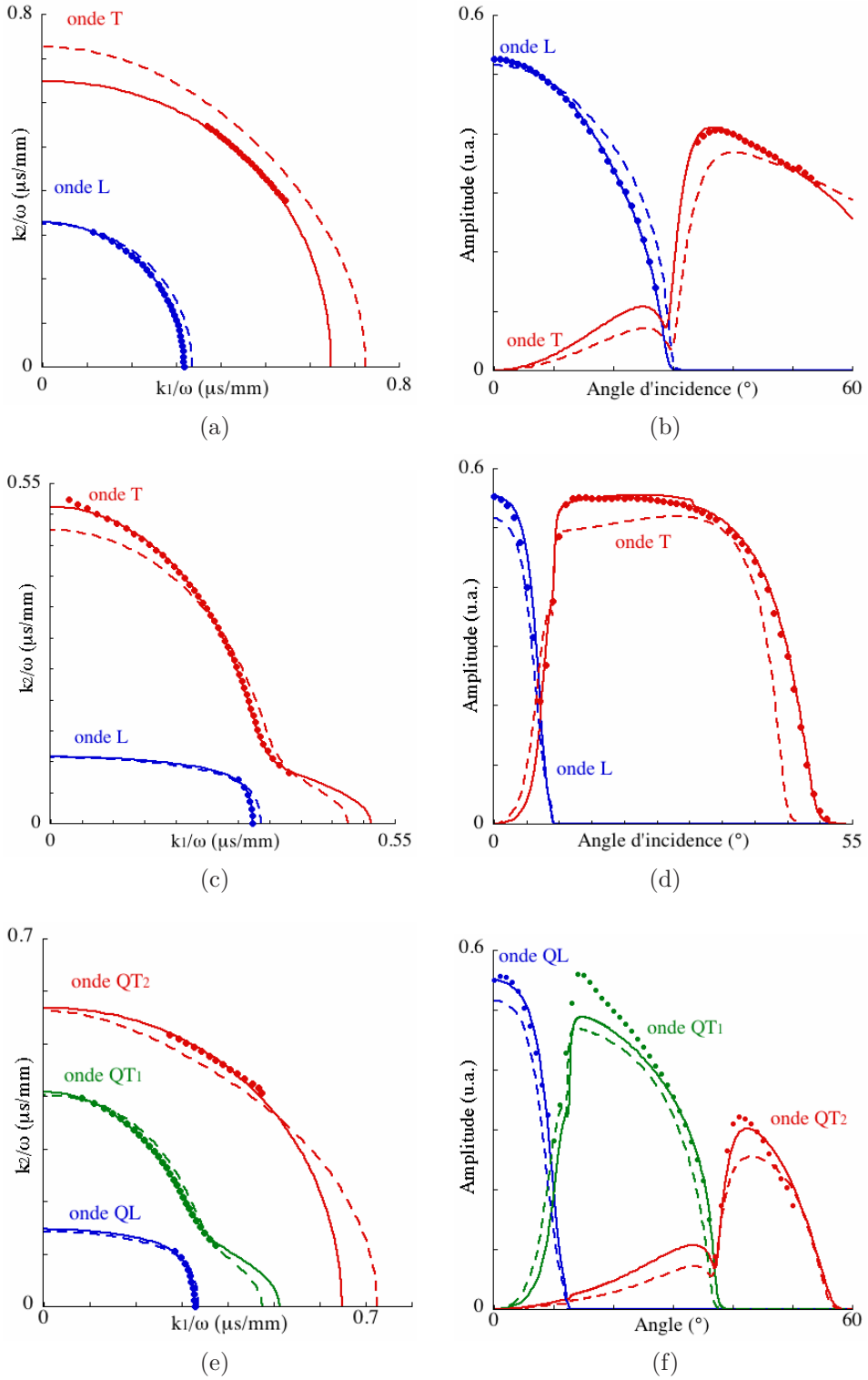


FIGURE 1.10 – Lenteurs de phase et amplitudes mesurées (symboles) et calculées avec des C_{ij} optimisés (——) et non optimisés (– –) pour un carbone époxy uni-directinnel dans les plans principaux P_{12} (a) et (b), P_{13} (c) et (d) ainsi que dans le plan à 45° (e) et (f).

	C_{ij} **initiaux**		C_{ij} **optimisés**	
Plan P_{12}	$C'_{11} = 14$	$C''_{11} = 0{,}42$	$C'_{11} = 15{,}7^{\pm 0{,}1}$	$C''_{11} = 0{,}51^{\pm 0{,}02}$
	$C'_{22} = 15$	$C''_{22} = 0{,}3$	$C'_{22} = 14{,}7^{\pm 0{,}1}$	$C''_{22} = 0{,}68^{\pm 0{,}04}$
	$C'_{12} = 8$	$C''_{12} = 0{,}16$	$C'_{12} = 7{,}9^{\pm 0.1}$	$C''_{12} = 0{,}38^{\pm 0{,}02}$
	$C'_{66} = 3$	$C''_{66} = 0{,}09$	$C'_{66} = 3{,}8^{\pm 0{,}1}$	$C''_{66} = 0{,}09^{\pm 0{,}03}$
Plan P_{13}	$C'_{11} = 14$	$C''_{11} = 0{,}42$	$C'_{11} = 15{,}1^{\pm 0{,}1}$	$C''_{11} = 0{,}4^{\pm 0{,}02}$
	$C'_{33} = 140$	$C''_{33} = 4{,}2$	$C'_{33} = 136^{\pm 9}$	$C''_{33} = 3^{\pm 1}$
	$C'_{13} = 7$	$C''_{13} = 0{,}21$	$C'_{13} = 7{,}6^{\pm 0{,}7}$	$C''_{13} = 0{,}3^{\pm 0{,}02}$
	$C'_{55} = 7$	$C''_{55} = 0{,}21$	$C'_{55} = 6{,}0^{\pm 0{,}1}$	$C''_{55} = 0{,}2^{\pm 0{,}03}$
Plan P_{45°	$C'_{23} = 17$	$C''_{23} = 0{,}51$	$C'_{23} = 11^{\pm 1}$	$C''_{23} = 1{,}2^{\pm 0{,}4}$
	$C'_{44} = 10$	$C''_{44} = 0{,}3$	$C'_{44} = 7{,}1^{\pm 0{,}5}$	$C''_{44} = 0{,}4^{\pm 0{,}1}$

TABLE 1.5 – Modules de viscoélasticité (en GPa) d'un composite uni-directionnel de 5 mm d'épaisseur mesurés *via* la méthode des temps de vol.

longueur d'onde. Pour satisfaire ce critère, il est nécessaire que la plus petite longueur d'onde soit 6 fois plus grande que la plus grande inhomogénéité de l'échantillon, c'est à dire 6 fois plus grande que l'épaisseur de la super couche du composite. Or cette super couche est deux fois plus épaisse pour le carbone époxy $[0°/90°]_{8s}$ que pour l'échantillon unidirectionnel (0,15 mm). L'objectif est de simuler la propagation d'un signal acoustique, pour divers angles d'incidence, à travers un échantillon pour lequel les propriétés de chaque pli unidirectionnel sont connues. En effectuant ensuite une optimisation à partir des signaux simulés, il est possible de remonter aux modules de viscoélasticité du composite $[0°/90°]_{8s}$ homogénéisé [52]. Les précédentes mesures de caractérisation réalisées sur le composite $[0°/90°]_{8s}$ ont montré que ce matériau avait une symétrie à tendance quadratique. Puisque les propriétés viscoélastiques de ce composite sont identiques dans les plans P_{12} et P_{13}, les fonctions de transferts de l'échantillon homogénéisé ont donc été calculées grâce à la simulation de la séquence d'empilement du composite, uniquement dans les plans P_{12} et P_{45°. Certaines d'entre elles sont tracées (points) sur la figure 1.11. Elles y sont superposées aux fonctions de transfert calculées avec les valeurs des C_{ij} initiaux (pointillés) et optimisés (traits pleins) donnés dans le tableau 1.6.

Chacun des modules de viscoélasticité influence plus particulièrement les fonctions de transfert à des angles particuliers [52]. Par exemple, le module C_{11} est le seul module de viscoélasticité à influer sur la fonction de transfert mesurée à 0°, il est donc optimisé pour cet angle. Cette valeur étant fixée, c'est le C_{66} qui est optimisé à partir des fonctions de transfert simulées entre 26 et 30°, ensuite le C_{12} est optimisé à partir des fonctions de transfert simulées entre 18 et 25° et enfin le C_{22} est optimisé à partir des fonctions de transfert simulées entre 14 et 17°. Etant donné que le C'_{44} a été mesuré « au contact », cette valeur a été considérée comme connue lors de la phase d'optimisation des modules de viscoélasticité. De ce fait, les fonctions de transfert simulées dans le plan P_{45° et cette valeur estimée du C'_{44} ont ainsi permis d'évaluer le C_{23} d'un carbone époxy $[0°/90°]_{8s}$. Si les C_{ij} présentés dans les tableaux 1.4 sont comparés à ceux du tableau 1.6 en prenant en compte les erreurs commises lors de l'estimation des modules, alors les différents résultats concordent à peu près entre eux. Cela signifie donc que, même si l'hypothèse d'homogénéité du matériau n'était pas tout à fait respectée lors des mesures effectuées

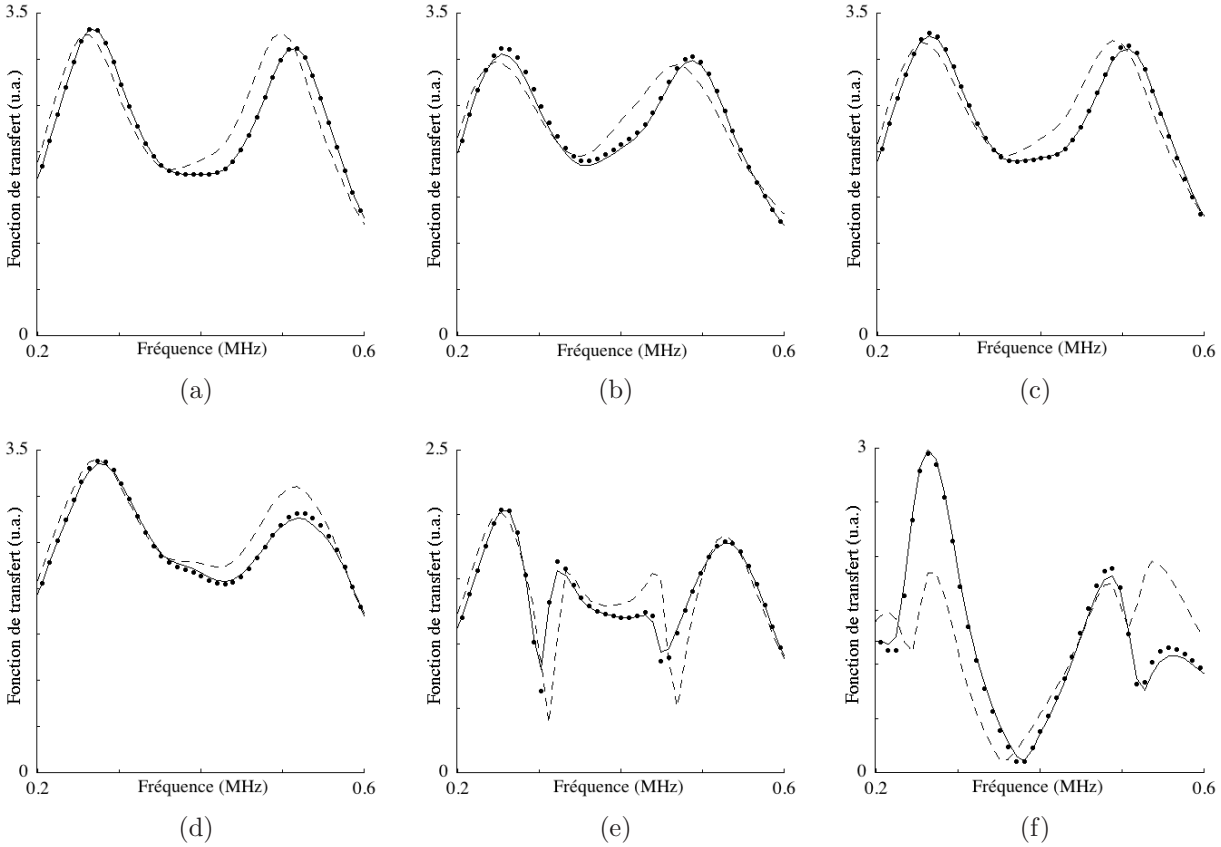


FIGURE 1.11 – Fonctions de transfert simulées (•) et calculées avec des C_{ij} optimisés (—) et non optimisés (– –) du champs transmis à travers un carbone époxy $[0° / 90°]_{8s}$ et pour un angle d'incidence de 0° (a), 15° (b), 20° (c) et 30° (d) dans le plan principal P_{12} ainsi que de 6° (e), 13° (f) dans le plan $P_{45°}$.

	C_{ij} **initiaux**		C_{ij} **optimisés**	
Plan P_{12} **ou** P_{13}	$C'_{11} = 14$	$C''_{11} = 0{,}28$	$C'_{11} = 15{,}5^{\pm 0.01}$	$C''_{11} = 0{,}4^{\pm 0{,}05}$
	$C'_{22} = 80$	$C''_{22} = 4$	$C'_{22} = 74^{\pm 2}$	$C''_{22} = 3^{\pm 1}$
	$C'_{12} = 8$	$C''_{12} = 0{,}4$	$C'_{12} = 7{,}6^{\pm 0{,}5}$	$C''_{12} = 0{,}3^{\pm 0{,}05}$
	$C'_{66} = 5$	$C''_{66} = 0{,}1$	$C'_{66} = 4{,}6^{\pm 0{,}1}$	$C''_{66} = 0{,}2^{\pm 0{,}03}$
Plan $P_{45°}$	$C'_{23} = 10$	$C''_{23} = 0{,}2$	$C'_{23} = 9^{\pm 1}$	$C''_{23} = 1^{\pm 0{,}2}$
	$C'_{44} = 5$	$C''_{44} = 0{,}1$	$C'_{44} = 6^{\pm 1}$	$C''_{44} = 0{,}3^{\pm 0{,}1}$

TABLE 1.6 – Modules de viscoélasticité (en GPa) d'un composite $[0°/90°]_{8s}$ de 5 mm d'épaisseur, obtenus par simulation numérique à partir des modules de viscoélasticité mesurés d'un échantillon de composite uni-directionnel.

par temps de vol sur l'échantillon de type quadratique, le jeu de C_{ij} obtenu était quand même convenable. Mais il était important de le vérifier.

Une manière supplémentaire de valider les valeurs de ces modules est de comparer les invariants de propriétés calculés à partir de chacun des jeux de C_{ij} présentés [64]. Le premier invariant $I_1 = C_{11}$ correspond aux propriétés dans la direction normale aux plis. Le second et le troisième invariants, $I_2 = C_{12} + C_{13}$ et $I_3 = C_{55} + C_{66}$, sont reliés aux propriétés de cisaillement dans le plan de propagation tandis que le quatrième et le cinquième invariants, $I_4 = C_{22} + C_{33} + 2C_{44}$ et $I_5 = C_{44} - C_{23}$, sont reliés aux propriétés de compression / traction dans le plan de propagation. Ces quantités sont invariantes du fait que, quelle que soit la séquence d'empilement, elles impliquent la même proportion de fibres. Les valeurs obtenues pour chacun d'entre eux et pour chaque série de mesures sont rassemblées dans le tableau 1.7.

	UD	$[0°/90°]_{8s}$		$[0°/90°]_{8s}$
		(mesures n°1)	*(mesures n°2)*	*(simulations)*
$I_1 = C_{11}$	$15{,}7^{\pm 0{,}1}$	$13^{\pm 2}$	$15{,}2^{\pm 0{,}3}$	$15{,}5^{\pm 0{,}01}$
$I_2 = C_{12} + C_{13}$	$15{,}5^{\pm 0{,}8}$	$14^{\pm 2}$	$18^{\pm 2}$	$15^{\pm 1}$
$I_3 = C_{55} + C_{66}$	$9{,}8^{\pm 0{,}2}$	$7{,}8^{\pm 0{,}3}$	$8{,}1^{\pm 0{,}7}$	$9{,}3^{\pm 0{,}2}$
$I_4 = C_{22} + C_{33} + 2C_{44}$	$164^{\pm 10}$	$156^{\pm 5}$	$149^{\pm 16}$	$160^{\pm 6}$
$I_5 = C_{44} - C_{23}$	$-4^{\pm 2}$	-	-	$-3^{\pm 2}$

TABLE 1.7 – Invariants de propriétés (en GPa) calculés à partir des C_{ij} du matériau composite obtenus lors des différentes mesures de caractérisation.

Les résultats présentés attestent bien de la difficulté à caractériser le composite $[0° / 90°]_{8s}$. Par exemple l'invariant I_2 fluctue de l'ordre de 18% autour de sa valeur moyenne.

Des trois jeux de C_{ij} issus de mesures de caractérisation, celui du composite unidirectionnel est celui pour lequel la précision de l'optimisation est la meilleure, particulièrement en ce qui concerne l'évaluation des parties imaginaires des modules de viscoélasticité. Ainsi ce sont les C_{ij} présentés dans le tableau 1.6 qui seront retenus pour la suite de l'étude, car ce jeu de valeurs a été obtenu grâce à une simulation numérique de la caractérisation par fonctions de transfert où les données d'entrées étaient les modules de viscoélasticité du composite unidirectionnel. De plus l'ordre de grandeur des C''_{ij} sera estimé égal à 3% de celui des parties réelles des C_{ij} des différents modules de viscoélasticité, ce qui est un ordre de grandeur courant pour ce type de matériaux [52, 63, 65].

1.3.3 Caractérisation d'un matériau entre deux substrats

Comme précisé dans l'introduction, les industriels expriment le besoin d'une évaluation non destructive et quantitative de la qualité d'un assemblage collé. Il a été décidé de travailler avec

une colle époxyde à réticulation lente. En choisissant ce type de colle, effectuer des mesures tout au long du processus de réticulation permettra de passer de manière continue d'un collage aux propriétés cohésives et adhésives faibles à un collage aux propriétés cohésives et adhésives dites nominales. L'adhésif considéré ici est bi-composant. Il est constitué d'une résine Araldite GY 784 BD de chez Huntsman en proportion double d'un durcisseur Aradur 125. Cette colle présente l'avantage de réticuler sur plusieurs heures à température ambiante.

Obtenir les propriétés d'un tel matériau pour plusieurs états de réticulation s'avère être un point délicat lors du procédé de caractérisation. La caractérisation par fonctions de transfert précédemment utilisée pour caractériser des matériaux pris isolément permet également de caractériser un matériau situé entre deux substrats [66]. C'est de cette manière que les modules de viscoélasticité de la colle vont être déterminés. De plus, l'adhésif dont il est question n'est pas autosupporté mais initialement « pâteux », ceci implique la réalisation d'un échantillon spécifique : un assemblage de type verre / colle / verre où le verre sert de support à la colle. Il a été choisi de travailler avec un substrat en verre parce que ce matériau est élastique (ce qui limite les phénomènes de dissipation d'énergie au sein de l'assemblage) dont les propriétés sont bien connues et quasiment invariantes :

$$\begin{aligned} e &= 1{,}8^{\pm 5\%}\ mm \\ \rho &= 2{,}51^{\pm 3\%}\ g/cm^3 \\ C_{11} &= 85^{\pm 2\%}\ GPa \\ C_{66} &= 29^{\pm 2\%}\ GPa \end{aligned}$$

Dernier avantage du verre, il est transparent. De cette manière il est possible de vérifier la qualité du collage (répartition de la colle, présence de bulles d'air).

Deux assemblages, avec deux épaisseurs de colle, ont été réalisés : 1 et 0,5 mm. Ces échantillons ont été insonifiés par l'intermédiaire de deux transducteurs *Imasonic 3258* de dimensions latérales $100 \times 40\ mm^2$. Le spectre à $-15dB$ du signal de référence, c'est à dire la transmission directe dans l'eau, est compris dans la bande de fréquences $[0{,}25 - 0{,}7]\ MHz$. Pour chaque état de la colle (c'est à dire pour différents instants au cours de la réticulation de l'adhésif) le signal transmis à travers l'échantillon a été mesuré et enregistré tous les 3°, de 0 à 30°. La figure 1.12 présente par exemple les fonctions de transfert mesurées à 0° (colonne de gauche) et 21° (colonne de droite) pour trois états distincts de la colle : 120 min (première ligne), 600 min (seconde ligne) et $20h$ (troisième ligne) après la réalisation du collage. Les valeurs initiales (pointillées) et optimisées (traits pleins) des modules de viscoélasticité qui ont été utilisées pour calculer les fonctions de transfert présentées sur cette figure sont rassemblées dans le tableau 1.8.

La caractérisation de l'adhésif a été effectuée non seulement pour ces trois temps mais également pour des temps de réticulation de la colle s'échelonnant de 0 min à $21h40$. La synthèse des différentes résultats est présentée sur la figure 1.13. Les symboles ronds et carrés correspondent respectivement aux valeurs obtenues pour chacune des optimisations des parties réelles et imaginaires du C_{11} (figure 1.13(a)) et du C_{66} (figure 1.13(b)). Les marges d'erreur, commises pour chacune de ces optimisations, varient avec le niveau de réticulation de la colle : importantes lorsque la colle est encore visqueuse, elles diminuent au fur et à mesure que le joint se solidifie. Elles ont permis de calculer une précision moyenne de $\pm 5\%$ et $\pm 10\%$ sur l'évaluation des parties réelles et imaginaires du C_{11}, et $\pm 15\%$ et $\pm 40\%$ sur celles du C_{66}.

Ces mesures ont également permis d'estimer des lois d'évolution des C_{ij} (traits pointillés

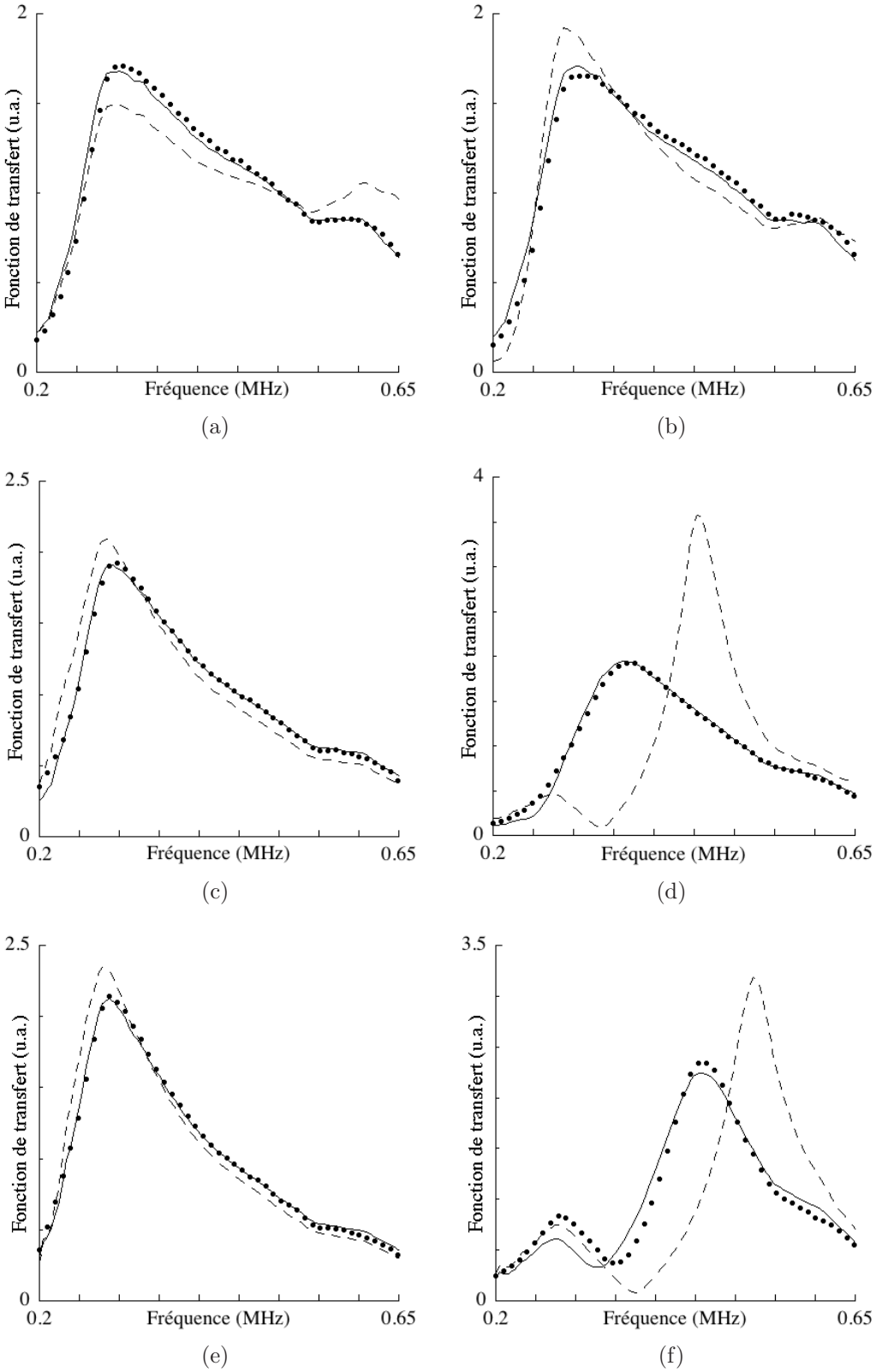


FIGURE 1.12 – Fonctions de transfert mesurées (•) et calculées avec des C_{ij} optimisés (—) et non optimisés (– –) du champs transmis à travers un assemblage verre / colle / verre, pour un angle d'incidence de 0° (colonne de gauche) et de 21° (colonne de droite) 120 *min* (première ligne), 600 *min* (seconde ligne) et 20*h* (troisième ligne) après la réalisation du collage.

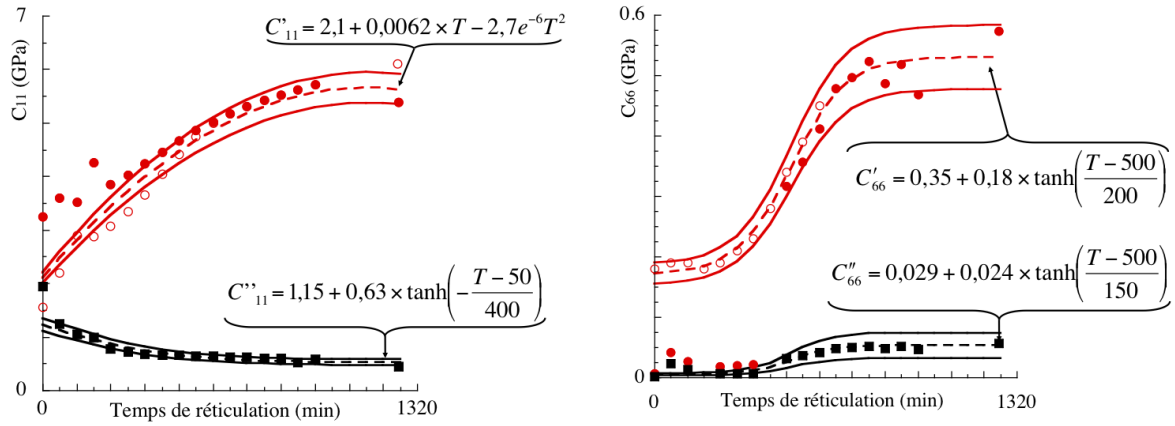


FIGURE 1.13 – Valeurs optimisées des C'_{ij} (● : série de mesures n°1 et ○ : n°2) et des C''_{ij} (■ : série de mesures n°1) obtenues par caractérisation par fonctions de transfert ainsi que les lois d'évolution des modules de viscoélasticité de la colle, calculées avec de C_{ij} nominaux (– –) et des C_{ij} tenant compte de la précision moyenne des mesures (——), (a) pour le C_{11} et (b) pour le C_{66}.

sur la figure 1.13) en fonction de l'état de réticulation de la colle, avec la précision moyenne des mesures correspondantes (traits pleins sur la figure 1.13). Elles serviront par la suite de données d'entrée aux modèles éléments finis de simulation des dispositifs expérimentaux à ondes guidées.

D'autre part dans la suite du mémoire les propriétés dites nominales de la colle seront celles données par les lois présentées sur la figure 1.13 pour un temps $T = 1300\ min$ (soit $21h40$), les valeurs du C_{11} et du C_{66} sont les suivantes :

$$\begin{aligned} C_{11}^{Nom} &= 5{,}6(1 + I10\%)\ GPa \\ C_{66}^{Nom} &= 0{,}53(1 + I10\%)\ GPa \end{aligned}$$

	C_{ij} **initiaux**		C_{ij} **optimisés**	
120 *min* **de**	$C'_{11} = 3$	$C''_{11} = 0{,}6$	$C'_{11} = 2{,}8^{\pm 0{,}2}$	$C''_{11} = 1{,}3^{\pm 0{,}1}$
réticulation	$C'_{66} = 0{,}3$	$C''_{66} = 0{,}06$	$C'_{66} = 0{,}02^{\pm 0{,}004}$	$C''_{66} = 0{,}004^{\pm 0{,}002}$
600 *min* **de**	$C'_{11} = 6$	$C''_{11} = 0{,}3$	$C'_{11} = 5^{\pm 0{,}2}$	$C''_{11} = 1^{\pm 0{,}2}$
réticulation	$C'_{66} = 0{,}8$	$C''_{66} = 0{,}04$	$C'_{66} = 0{,}45^{\pm 0{,}05}$	$C''_{66} = 0{,}14^{\pm 0{,}1}$
$20h$ **de**	$C'_{11} = 7$	$C''_{11} = 0{,}35$	$C'_{11} = 6^{\pm 0{,}2}$	$C''_{11} = 0{,}8^{\pm 0{,}2}$
réticulation	$C'_{66} = 1$	$C''_{66} = 0{,}05$	$C'_{66} = 0{,}7^{\pm 0{,}1}$	$C''_{66} = 0{,}1^{\pm 0{,}05}$

TABLE 1.8 – Modules de viscoélasticité (en GPa) d'une colle époxy, mesurés *via* la méthode des fonctions de transfert pour trois stades de réticulation.

Conclusions et synthèse des résultats

Les intervalles d'erreurs obtenus pour les parties réelles des modules de viscoélasticité sont, dans l'ensemble, inférieurs à 10%, ce qui est assez classique pour les techniques ultrasonores de caractérisation par immersion ou au contact. Ces caractérisations ont également permis, pour le plexiglas et le carbone époxy unidirectionnel, d'obtenir un ordre de grandeur vraisemblable de la viscoélasticité des matériaux. Pour le plexiglas, le rapport C''_{ij}/C'_{ij} a été estimé entre 1 et 2%, ce qui est relativement faible. Néanmoins cet ordre de grandeur est confirmé par deux jeux de mesures réalisées sur deux échantillons d'épaisseurs distinctes. Pour le second matériau, la caractérisation par temps de vol a permis d'estimer la valeur des parties imaginaires des modules de viscoélasticité à 3% de celles de leurs parties réelles. Cet ordre de grandeur est conforme à ce qu'il est possible de trouver dans la littérature [52, 63].

En conclusion, ces mesures sont satisfaisantes étant donné qu'elles sont en accord avec les symétries escomptées des matériaux : isotropie de l'aluminium et du plexiglas, caractère hexagonal et quadratique des échantillons de carbone époxy unidirectionnel et $[0°/90°]_s$ respectivement. De plus les valeurs des modules sont conformes aux ordres de grandeur trouvés dans la littérature. Les modules de viscoélasticité de la colle ont été obtenus avec des marges d'erreur plus importantes en raison d'une mise en œuvre plus difficile (caractérisation d'un assemblage collé, en position verticale, pendant le processus de réticulation de l'adhésif). Ils seront néanmoins utilisés comme données d'entrée aux différents modèles dont il sera question dans la suite de l'étude.

Le repère dans lequel sont caractérisés les différents matériaux (cf. figure 1.2(b)) et celui dans lequel seront effectuées toutes les simulations de propagation d'ondes guidées de type Lamb ou SH sont différents. Dans ce second cas il a été décidé, par commodité d'utilisation du logiciel COMSOL, que la direction normale à l'assemblage serait parallèle à l'axe x_2, comme indiqué sur la figure 1.14.

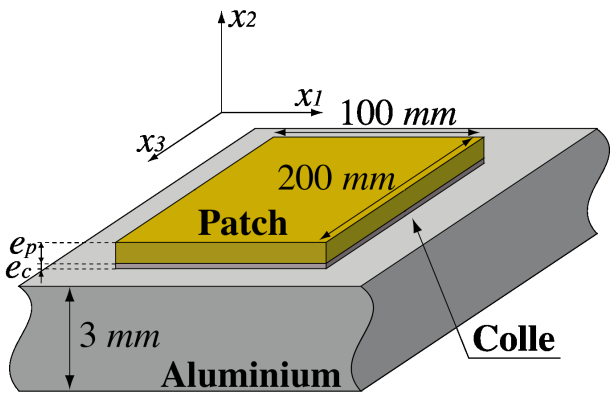


FIGURE 1.14 – Schéma de la géométrie retenue pour le collage et repère choisi pour les simulations numériques de la propagation d'ondes guidées le long d'un assemblage collé.

Le bilan des différentes caractérisations a donc été transféré dans le repère présenté sur la figure 1.14, qui est le repère dans lequel seront effectuées les simulations numériques. Les différentes transformations à effectuer sur les C_{ij}, pour passer du repère de la figure 1.2 à celui présenté sur la figure 1.14, sont résumées dans le tableau 1.9.

Repère de la figure 1.2	$\longrightarrow$	**Repère de la figure 1.14**
C_{11}	$\longrightarrow$	C_{22}
C_{22}	$\longrightarrow$	C_{11}
C_{12}	$\longrightarrow$	C_{12}
C_{66}	$\longrightarrow$	C_{66}
C_{33}	$\longrightarrow$	C_{33}
C_{13}	$\longrightarrow$	C_{23}
C_{55}	$\longrightarrow$	C_{44}
C_{44}	$\longrightarrow$	C_{55}
C_{23}	$\longrightarrow$	C_{13}

TABLE 1.9 – Transformation des C_{ij} des différents matériaux pour passer du repère de la figure 1.2 à celui de la figure 1.14.

La majorité des matériaux considérés sont isotropes. Ce changement de repère ne les affecte donc pas, ce qui n'est pas le cas du patch composite qui est un matériau quadratique. Dans le repère de la figure 1.14 un carbone époxy $[0°/90°]_{Xs}$, quelle que soit la valeur du nombre X d'empilement, possède toujours 6 modules de viscoélasticité indépendants lorsque les axes de symétrie du matériau coïncident avec les axes du repère, avant ou après rotation :

$$\begin{cases} C_{11} & = & C_{33} \\ C_{22} & & \\ C_{12} & = & C_{23} \\ C_{66} & = & C_{44} \\ C_{13} & & \\ C_{55} & & \end{cases} \tag{1.19}$$

Les C_{ij} qui seront finalement retenus pour le reste de ces travaux de thèse sont regroupés dans le tableau 1.10.

Aluminium	$C'_{11} = 103^{\pm 5\%}$	
	$C'_{66} = 25^{\pm 5\%}$	
Plexiglas mince	$C'_{11} = 5{,}7^{\pm 5\%}$	$C''_{11} = 0{,}12^{\pm 15\%}$
	$C'_{66} = 1{,}4^{\pm 5\%}$	$C''_{66} = 0{,}03^{\pm 15\%}$
Plexiglas épais	$C'_{11} = 6{,}3^{\pm 5\%}$	$C''_{11} = 0{,}06^{\pm 15\%}$
	$C'_{66} = 1{,}5^{\pm 5\%}$	$C''_{66} = 0{,}01^{\pm 15\%}$
Composite $[0°/90°]_s$	$C'_{11} = 74^{\pm 10\%}$	$C''_{11} = 3^{\pm 15\%}$
	$C'_{22} = 15{,}5^{\pm 10\%}$	$C''_{22} = 0{,}4^{\pm 15\%}$
	$C'_{12} = 7{,}6^{\pm 10\%}$	$C''_{12} = 0{,}3^{\pm 15\%}$
	$C'_{66} = 4{,}6^{\pm 10\%}$	$C''_{66} = 0{,}2^{\pm 15\%}$
	$C'_{13} = 9^{\pm 10\%}$	$C''_{13} = 1^{\pm 15\%}$
	$C'_{55} = 6^{\pm 10\%}$	$C''_{55} = 0{,}3^{\pm 15\%}$
Colle époxyde réticulée	$C'_{11} = 5{,}6^{\pm 10\%}$	$C''_{11} = 0{,}56^{\pm 15\%}$
	$C'_{66} = 0{,}53^{\pm 10\%}$	$C''_{66} = 0{,}05^{\pm 40\%}$

TABLE 1.10 – Modules de viscoélasticité, en GPa, dans le repère de la figure 1.14, des différents matériaux.

Chapitre 2

Etude des ondes guidées de type SH

Introduction

Comme présenté dans l'introduction de ce mémoire, les assemblages collés sont de plus en plus utilisés dans le milieu industriel. Ils sont conçus de manière à travailler essentiellement en cisaillement et, dans ces conditions, la résistance suivant ce mode de sollicitation devient un paramètre critique de l'assemblage. Le module de Coulomb étant forcément lié à la résistance en cisaillement de l'assemblage, l'objectif de ce chapitre est de mesurer de manière non destructive la raideur en cisaillement d'un joint de colle et / ou d'une interface. Les ondes guidées de type SH (pour « Shear Horizontal » en anglais) paraissent *a priori* être de bonnes candidates pour ce type de mesures car, du fait de leur polarisation hors plan de propagation, elles sont sensibles uniquement aux propriétés en cisaillement de la structure testée.

Ce chapitre débute par quelques rappels sur les ondes SH puis par la présentation de la méthode numérique développée à partir de la méthode SAFE (pour « Semi Analytical Finite Element »), pour calculer les courbes de dispersion d'un assemblage. Ensuite une étude numérique de la sensibilité de la vitesse de phase des modes SH à la masse volumique, à l'épaisseur et aux modules de viscoélasticité de chacun des matériaux considérés sera réalisée. Elle permettra de mettre en évidence un domaine de fréquences pour lequel une (ou des) onde(s) sera (seront) plus sensible(s) aux propriétés de l'adhésif et / ou de l'interface aluminium / colle qu'aux substrats. Un dispositif expérimental sera alors mis en place, et les mesures seront comparées aux résultats numériques. Finalement les modules de Coulomb de collages de différentes qualités seront estimés à partir des mesures ultrasonores réalisées.

2.1 Rappels sur les ondes SH

Avant d'étudier la propagation des ondes guidées de type SH le long d'un assemblage collé, ce chapitre débute par quelques rappels sur la propagation des ondes de volume. Pour cela considérons un domaine Ω, de dimensions 3, de frontière $\partial\Omega$ placé dans le vide (cf.figure 2.1). Par application du principe fondamental de la dynamique, l'équation du mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = \rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} \tag{2.1}$$

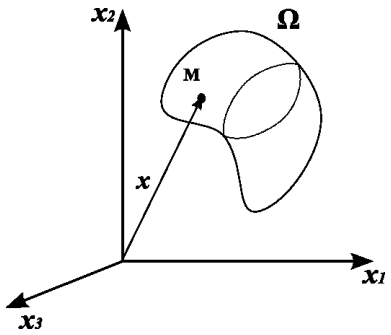


FIGURE 2.1 – Domaine quelconque Ω.

où $\bar{\bar{\boldsymbol{\sigma}}} = (\sigma_{ij})_{1\leq i,j\leq 3}$ est le tenseur des contraintes du matériau dont est constitué le domaine Ω, ρ est la masse volumique du matériau, $\mathbf{U} = (u_i)_{1\leq i\leq 3}$ est le vecteur déplacement et t la variable temps. Le vecteur $\mathbf{f} = (f_i)_{1\leq i\leq 3}$ représente quant à lui les forces volumiques qui s'appliquent sur le domaine Ω.

La propagation d'une onde correspond à un régime dynamique pour lequel les forces de volume (par exemple la pesanteur) sont généralement négligées. De plus cette étude est réalisée dans le domaine de l'acoustique linéaire et sous l'hypothèse des petites déformations, donc si la loi de Hooke définie par l'équation 1.4, est introduite dans l'équation 2.1 on obtient :

$$C_{ijkl}\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l} - \rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = 0 \tag{2.2}$$

C'est l'équation de propagation d'ondes dans le domaine Ω. Les solutions sont recherchées sous la forme d'ondes planes se propageant suivant une direction définie par un vecteur unitaire $\mathbf{n}$, *i.e.* avec un déplacement de la forme suivante :

$$u_i(\mathbf{x},t) = AP_i e^{I\omega\left(t-\frac{\mathbf{n}\cdot\mathbf{x}}{c}\right)}$$

où A et P_i représentent respectivement l'amplitude du déplacement et la composante du vecteur polarisation de l'onde suivant la direction i, $\omega = 2\pi f$ et f sont respectivement la pulsation et la fréquence, où c est la vitesse de l'onde se propageant dans la direction $\mathbf{n}$ et où $\mathbf{x}$ désigne le vecteur position du point M considéré.
Dans ce cas l'équation d'onde 2.2 peut s'écrire :

$$\rho c^2 P_i = \Gamma_{il} P_l \tag{2.3}$$

où $\Gamma_{il} = C_{ijkl} n_j n_k$ est le tenseur de Christoffel.

Le vecteur polarisation $\mathbf{P}$ est donc vecteur propre du tenseur de Christoffel avec pour valeur propre ρc^2. Dans un matériau homogène isotrope il existe ainsi trois valeurs propres de cette équation :

- une onde longitudinale de vitesse $c_L = \sqrt{C_{11}/\rho}$ et de polarisation parallèle à la direction de propagation de l'onde. Elle produit des déformations de type compression / traction (cf. figure 2.2(a)).
- deux ondes transversales, de vitesse $c_T = \sqrt{C_{66}/\rho}$ et de polarisations perpendiculaires à la direction de propagation. La première est parfois appelée onde SV (pour « shear vertical »

en anglais) et la seconde est appelée onde SH (pour « shear horizontal » en anglais). Elles produisent des déplacements de type cisaillement (cf. figure 2.2(b)).

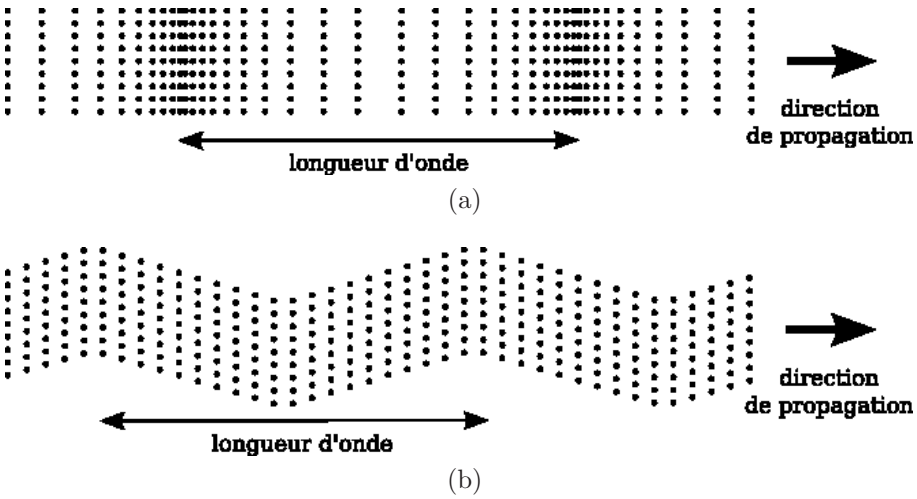


FIGURE 2.2 – Déplacements induits par (a) une onde longitudinale (ou onde de compression) et (b) une onde transverse (ou onde de cisaillement).

Si le milieu considéré est désormais délimité par deux plans parallèles entre eux et parallèles au plan $(O,\boldsymbol{x_1},\boldsymbol{x_3})$ (guide de type plaque), ces ondes fondamentales, parfois appelées ondes de volume, se superposent pour générer d'autres types d'ondes. Dans ce cas de figure le plan qui contient la direction normale à la plaque et la direction de propagation des ondes est appelé plan de propagation, et l'onde de volume SH est alors polarisée suivant la direction perpendiculaire au plan de propagation. La multi réflexion de ces ondes de volume SH sur les surfaces de la plaque engendre une onde guidée également appelée onde SH. Dans le cas où le guide est une plaque constituée d'un matériau élastique isotrope, d'épaisseur h suivant la direction 2 et dans le cas où l'onde guidée SH considérée se propage suivant l'axe x_1, alors le plan de propagation de l'onde est en fait le plan $(O,\boldsymbol{x_1},\boldsymbol{x_2})$ et la polarisation de l'onde est portée par l'axe x_3 (cf. repère de la figure 2.1).

L'équation de dispersion s'écrit [67] :

$$k_n^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 \qquad n = 0,1,2,3\cdots \tag{2.4}$$

où k_n est le nombre d'onde de l'onde SH_n, $\omega = 2\pi f$ est la pulsation, c_T la vitesse des ondes de volume transversales SH. La courbe 2.3(a) représente l'évolution de ce nombre d'onde en fonction de la fréquence.

Il est alors possible d'en déduire sa vitesse de phase (cf. figure 2.3(b)) qui s'exprime de la manière suivante :

$$V_{ph}^n = \omega/k_n$$

Lorsque le nombre d'onde est complexe, il est également possible de tracer sa partie imaginaire. Néanmoins pour des raisons de commodité et d'ordre de grandeur, ce terme, calculé en mm^{-1}, est souvent exprimé en dB/mm par la relation :

$$(k_n'')_{dB/mm} = 20log\left(e^{k_n''}\right)$$

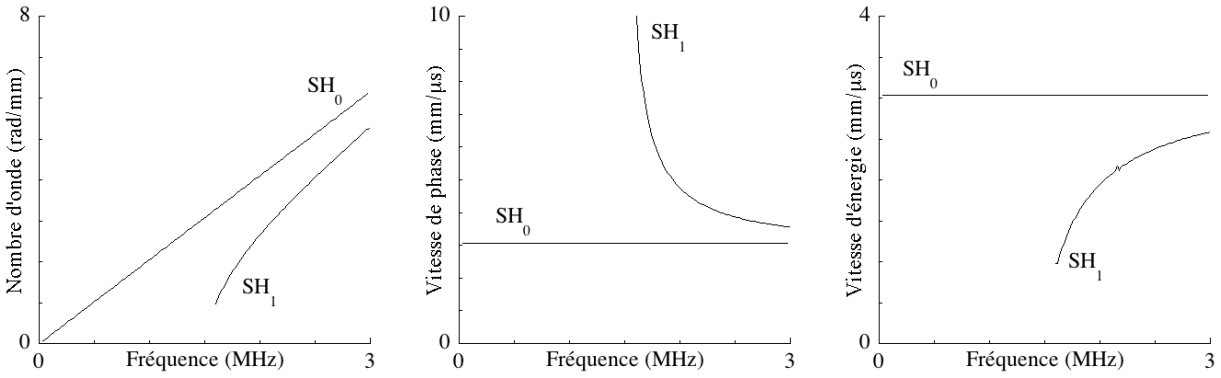


FIGURE 2.3 – Courbes de dispersion des ondes guidées de type SH pour un aluminium épais de 1 mm, (a) nombre d'onde, (b) vitesse de phase et (c) vitesse d'énergie.

Il représente ainsi l'atténuation de l'onde.

Le graphe (c) de la figure 2.3 représente la vitesse d'énergie, norme du vecteur vitesse d'énergie $\mathbf{V}_e^n$, des ondes SH. Contrairement à la vitesse de groupe qui n'a de sens physique que lorsque le nombre d'onde est réel, cette grandeur représente toujours la vitesse de propagation de l'énergie [68]. Le vecteur vitesse d'énergie est calculé à partir du vecteur de Poynting $\mathbf{P}$ (flux d'énergie en un point du guide pendant une période temporelle) et de la densité d'énergie totale E (énergie totale instantanée par unité de volume) :

$$\mathbf{V}_e^n = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \mathbf{P} dx_2}{\int_{-h/2}^{h/2} \int_0^T E dt dx_2}$$

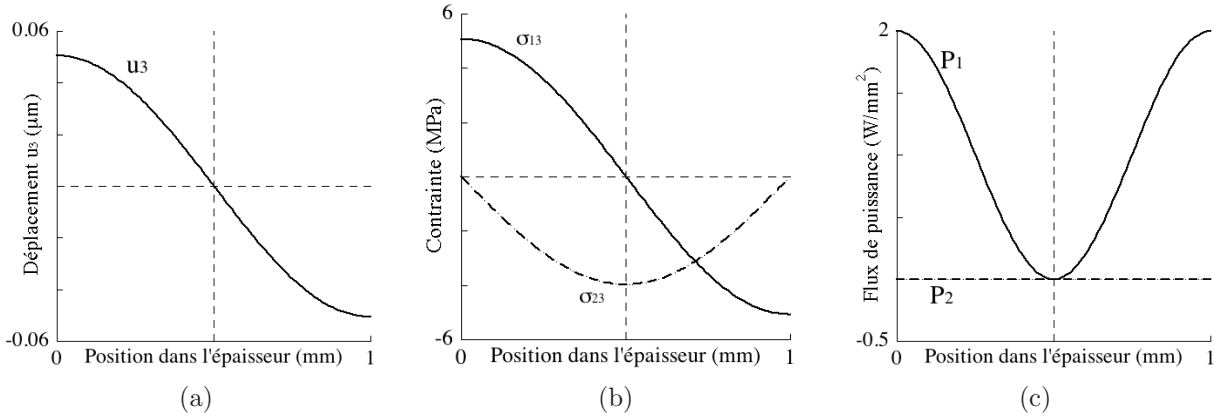


FIGURE 2.4 – Distribution des champs de déplacement (a), de contraintes (b) et du flux de puissance (c) du mode SH_1 dans l'épaisseur d'une plaque d'aluminium de 1 mm à 2,5 MHz.

Pour n'importe quelle solution modale (f,k_n) il est possible de tracer la distribution des champs de déplacements, de contraintes et de puissance dans l'épaisseur de la plaque (cf. figure

2.4 pour le mode SH_1 à 1 MHz). Ces distributions renseignent sur la nature du mode (symétrique ou antisymétrique, selon que n soit pair ou impair, par rapport au plan médian lorsque le guide est symétrique par rapport à ce plan) et apportent de l'information sur sa sensibilité aux propriétés du matériau le constituant (le C_{44} ou le C_{55} pour les ondes SH). Ces profils de déplacement et contraintes s'expriment de la manière suivante pour un matériau isotrope [67] :

$$u_3^n = cos\left(\frac{n\pi}{h}\Big(x_2+\frac{h}{2}\Big)\right)e^{-Ik_nx_1} \tag{2.5}$$

$$\sigma_{13}^n = -\frac{k_nC_{44}}{\omega}cos\left(\frac{n\pi}{h}\Big(x_2+\frac{h}{2}\Big)\right)e^{-Ik_nx_1} \tag{2.6}$$

$$\sigma_{23}^n = -\frac{n\pi}{h}\frac{C_{44}}{I\omega}sin\left(\frac{n\pi}{h}\Big(x_2+\frac{h}{2}\Big)\right)e^{-Ik_nx_1} \tag{2.7}$$

Afin de pouvoir comparer ces distributions à plusieurs fréquences et pour différents modes guidés, les champs sont normalisés en puissance.

$$\xi = \sqrt{\left|\int_{-h/2}^{h/2}\mathbf{P}\cdot\mathbf{n}dx_2\right|}$$

où $\mathbf{n}$ est le vecteur unitaire définissant la direction de propagation des fronts d'ondes.
Toutes les distributions de champs tracées dans ce mémoire, y compris celles de la figure 2.4, sont normalisées en puissance.

2.2 Etude de sensibilité

2.2.1 La méthode SAFE 1D à une variable

Principe

Dans la littérature plusieurs méthodes ont été développées afin de calculer les solutions de l'équation de dispersion. Lorsque le guide est de type plaque ou cylindre, fait de matériaux homogènes ou multicouches, isotropes ou anisotropes, les méthodes matricielles telles que la méthode des matrices de transfert ou la méthode des matrices d'impédance de surface permettent d'obtenir les courbes de dispersion des modes guidés [56, 69, 70]. Ces techniques permettent aussi de calculer les champs de déplacements et de contraintes ainsi que le flux de puissance dans l'épaisseur du guide considéré. Elles se révèlent néanmoins inadéquates lorsque le guide est de section arbitraire. C'est principalement pour cette raison qu'une méthode numérique alternative, la méthode SAFE (pour« Semi Analytical Finite Element method »en anglais), a été développée [71–75]. Cette méthode consiste à résoudre numériquement un problème aux valeurs propres par l'intermédiaire d'un modèle éléments finis, où la direction de propagation des ondes est connue et où seule la section droite du guide est maillée.

Dans ces travaux de thèse le guide considéré est de type plaque. L'une ou l'autre des méthodes peut donc être utilisée pour calculer les courbes de dispersion. Pour cette étude seules les ondes guidées de type SH sont considérées, cela permet d'une part de simplifier la mise en équations du problème (les composantes de déplacement dans le plan ($\boldsymbol{x_1}$,$\boldsymbol{x_2}$), ainsi que les composantes correspondantes des contraintes sont nulles) et par conséquent d'alléger le coût

des calculs. Il a été choisi de travailler avec la méthode SAFE. Tout d'abord, cela permet d'implémenter de manière simple une condition aux limites de type ressorts [44, 76, 77] pour simuler une interface dont les propriétés sont variables. D'autre part, les modèles basés sur la méthode des éléments finis permettent de simuler assez simplement des variations dans l'espace de propriétés mécaniques ou encore des défauts localisés. De cette manière, même si le cas de figure d'un assemblage collé avec un défaut localisé n'a pas encore été envisagé ici, cette étude pourra, par la suite, être poursuivie dans ce sens.

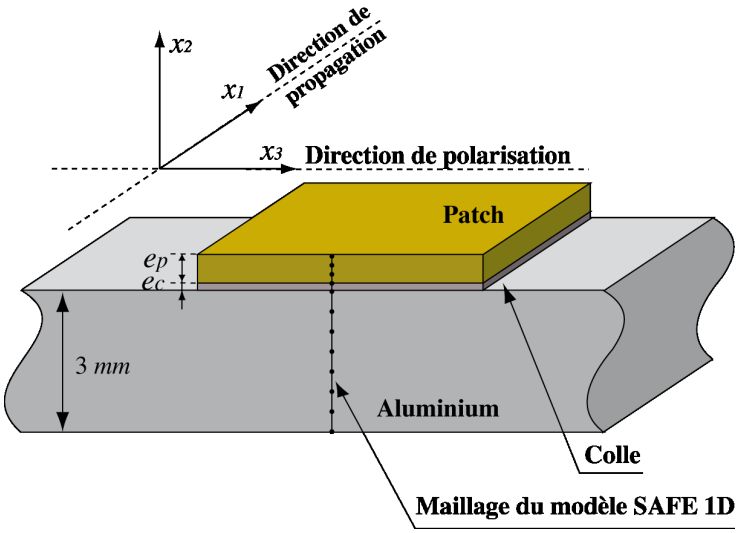


FIGURE 2.5 – Présentation en 3 dimensions d'une structure aluminium / colle / patch avec le maillage SAFE 1D représenté par une série de points dans l'épaisseur.

Le guide considéré est constitué de trois matériaux : un aluminium, un adhésif de type époxy et un patch en carbone époxy (cf. figure 2.5). Il est d'épaisseur finie mais de longueur et largeur infinies. Ces considérations géométriques permettent de travailler avec un modèle SAFE 1D. Le vecteur déplacement d'une onde harmonique guidée le long de l'axe $\boldsymbol{x_1}$ et polarisée suivant l'axe $\boldsymbol{x_3}$ (cf. figure 2.5) s'écrit alors de la manière suivante :

$$\boldsymbol{U}(x_1,x_2,x_3,t) = u_3(x_2)e^{I(\omega t - kx_1)} \qquad \text{avec } I^2 = -1 \tag{2.8}$$

où $\omega = 2\pi f$ représente la pulsation, f la fréquence, t le temps et k le nombre d'onde. Dans ce cas particulier, deux des composantes du vecteur déplacement sont nulles. De plus, pour les ondes SH le gradient de déplacement suivant la direction x_3 est nul et étant donné l'expression du déplacement (cf. équation 2.8) la dérivée partielle suivant l'axe de propagation peut être écrite de la manière suivante :

$$\frac{\partial[\cdots]}{\partial x_1} = -Ik[\cdots]$$

L'équation d'équilibre dynamique, écrite dans le domaine des fréquences, pour un matériau anisotrope, peut ainsi être simplifiée :

$$C_{44}\frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} - k^2 C_{55} u_3 + \rho\omega^2 u_3 = 0 \tag{2.9}$$

où C_{55} et C_{44} sont les modules de viscoélasticité du matériau le long duquel se propage l'onde guidée. Ils peuvent être réels dans le cas d'un matériau élastique ou complexes pour un matériau viscoélastique. Le vecteur contrainte, $\mathbf{T} = \bar{\bar{\sigma}} \cdot \mathbf{n}$, où $\mathbf{n}$ est le vecteur unitaire définissant la normale sortante au domaine considéré, s'écrit quant à lui de la manière suivante :

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \sigma_{13} \\ 0 & 0 & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{13} n_3 \\ \sigma_{23} n_3 \\ \sigma_{13} n_1 + \sigma_{23} n_2 \end{pmatrix} \tag{2.10}$$

Au niveau des surfaces supérieure, internes ou inférieure de l'empilement considéré, le vecteur définissant la normale est porté par la direction x_2. Dans ce cas la troisième composante du vecteur contrainte est la seule à être non nulle :

$$T_3 = C_{44} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} n_2 \tag{2.11}$$

où $n_2 = \pm 1$.

Les deux surfaces extérieures du domaine sont libres de contraintes, T_3 y est donc égal à zéro. L'interface entre le composite et la colle est considérée comme parfaite, c'est à dire que les déplacements ainsi que les contraintes sont continus. Pour le type d'assemblage étudié, l'interface séparant le joint de colle de l'aluminium est considérée comme une zone critique. Les propriétés adhésives de cette interface sont modélisées par l'intermédiaire d'une densité surfacique de ressorts [17, 18, 44, 45, 78, 79]. Les contraintes sont continues et un saut de déplacement est autorisé :

$$T_3 = k_T \Delta u_3 \tag{2.12}$$

où k_T représente une densité de ressorts en cisaillement (N/m^3) uniforme sur l'interface considérée et où $\Delta u_3 = \pm |u_3^{\text{adhésif}} - u_3^{\text{aluminium}}|$ est l'expression du saut de déplacement. Le signe de ce dernier dépend du domaine à partir duquel cette condition est écrite.

Une telle interface peut également être modélisée par une fine couche de solide, d'épaisseur $h_{\text{interface}}$, de masse volumique $\rho_{\text{interface}}$ et de module de Coulomb $C_{44} = k_T h_{\text{interface}}$. L'inconvénient de ce type de modélisation reste son coût en terme de degrés de liberté du maillage de la simulation numérique. Elle a néanmoins permis de valider la condition d'interface de type densité surfacique de ressorts [45, 79].

Implémentation COMSOL

Dans ce logiciel le formalisme adopté pour les problèmes aux valeurs propres est le suivant :

$$\begin{cases} \nabla \cdot (c \nabla u + \alpha u - \gamma) - a u - \beta \cdot \nabla u + d_a \lambda u - e_a \lambda^2 u = 0 & \text{dans } \Omega \\ \mathbf{n} \cdot (c \nabla u + \alpha u - \gamma) + q u = g & \text{sur } \partial\Omega \\ h u = r & \text{sur } \partial\Omega \end{cases} \tag{2.13}$$

où c,α,a,β,d_a,e_a,q et g peuvent être des coefficients scalaires, vectoriels ou matriciels sans sens physique particulier. u représente le vecteur déplacement et λ la valeur propre recherchée. Dans le modèle considéré une seule dimension géométrique et une seule variable d'espace sont considérées. Les coefficients c,α,a,β,d_a,e_a,q et g sont donc des scalaires. En identifiant les deux

premières équations du système 2.13 aux équations 2.9 et 2.11 on obtient :

$$\begin{cases} \alpha = \beta = d_a = \gamma = q = 0 \\ c = C_{44} \\ e_a = C_{55} \\ a = -\rho\omega^2 \\ g = T_3 \end{cases} \tag{2.14}$$

Géométrie et maillage

L'assemblage étudié est constitué de trois matériaux (composite, colle époxy et aluminium) d'épaisseurs très différentes, celle de l'aluminium étant 15 fois plus élevée que celle de l'adhésif. Si l'interface aluminium / colle est modélisée non pas par une densité surfacique de ressorts mais par une couche d'adhésif de 10 μm, le rapport entre leur épaisseur respective augmente même jusque 300. De telles disparités peuvent, si on n'y prête pas attention, entraîner des irrégularités de maillage qui se répercutent sur le calcul de la distribution des champs de déplacements, contraintes et puissance dans l'épaisseur du guide. Par exemple, en faisant l'hypothèse que 4 éléments quadratiques sont nécessaires dans l'épaisseur de chaque matériau pour discrétiser correctement les champs de déplacements ou de contraintes, alors les mailles feront 50 et 2,5 μm dans l'épaisseur de la couche de colle et de l'interface respectivement tandis que des éléments de 0,75 mm sont requis dans l'épaisseur de la plaque d'aluminium. Il est donc nécessaire d'adapter le maillage de manière à ce que la taille des éléments ne varie pas de manière brutale en passant d'un matériau à l'autre [80]. Ceci a des conséquences non négligeables sur le nombre de degrés de liberté du modèle et justifie l'intérêt d'un modèle de type ressort pour simuler une interface de qualité variable. Pour l'assemblage étudié ici, l'utilisation de ce type d'interface permet par exemple de réduire de 49% le coût du maillage : 138 degrés de liberté pour l'assemblage avec interface de type ressort contre 273 lorsque l'interface est modélisée par une couche de 10 μm. Bien évidemment les courbes de dispersion obtenues *via* ces deux modèles correspondent parfaitement entres elles (1‰ de différence) et également 2‰ près avec celles obtenues *via* la méthode des matrices d'impédance de surface [55].

2.2.2 Courbes de dispersion des ondes SH guidées par l'assemblage collé

Cette étude vise à déterminer des domaines de fréquences où la vitesse de phase des premières ondes de type SH est sensible au module de Coulomb du joint de colle et / ou de la raideur transverse de l'interface aluminium / colle. Il a été établi au chapitre 1 que la masse volumique et l'épaisseur des différents matériaux étaient connues à 3 et 5% près respectivement. Les modules de cisaillement de l'aluminium et du patch ont, quant à eux, été déterminés avec une précision de 5 et 10%. Des calculs de courbes de dispersion sont donc réalisés en prenant en compte ces erreurs de mesures pour pouvoir sélectionner les domaines de fréquences où la vitesse de phase des modes considérés y est peu sensible. Par la suite les propriétés de l'adhésif et de l'interface sont dégradées de manière à quantifier la sensibilité des vitesses de phase des modes SH aux propriétés en cisaillement du joint confiné entre une plaque métallique et un patch composite. L'objectif consistera à localiser les zones fréquentielles pour lesquelles ces vitesses seront plus sensibles aux caractéristiques du joint qu'à celles de l'aluminium et du composite. De telles

zones, si elles existent, seront propices au contrôle non destructif de la qualité d'une réparation par collage et seront alors exploitées dans ce sens.

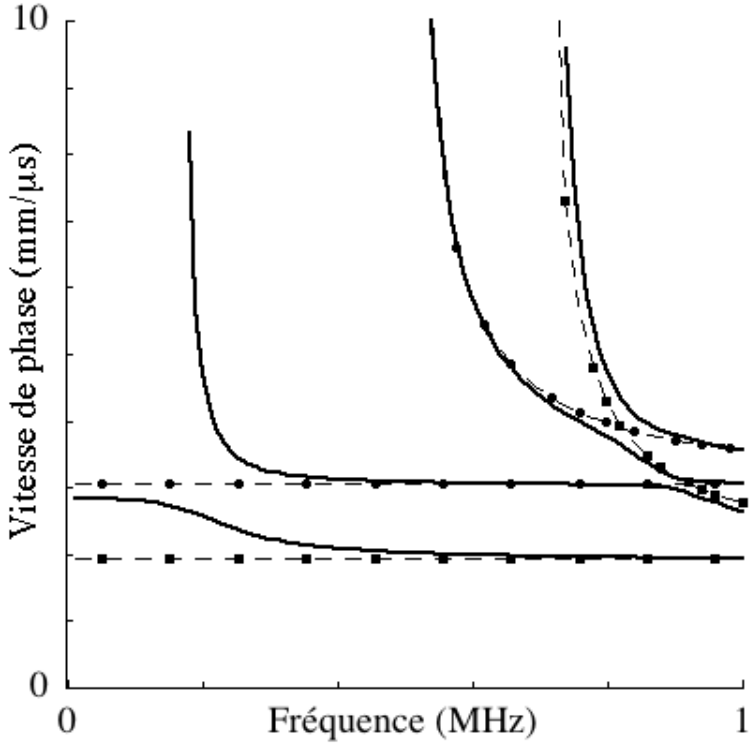


FIGURE 2.6 – Vitesse de phase des modes guidés de type SH se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch (——), d'une plaque d'aluminium (− • −) et d'une plaque de composite (−■−).

La figure 2.6 représente les vitesses de phase d'un assemblage aux propriétés nominales superposées à celles d'une plaque d'aluminium de 3 mm et d'un patch composite épais de 1.2 mm. Ces cas limites permettent d'obtenir une gamme de variation des vitesses de phase des 4 premiers modes se propageant le long de l'assemblage collé. En effet, lorsque les propriétés en cisaillement de l'adhésif tendent vers une valeur nulle, les modes guidés se propageant le long l'assemblage tendent vers ceux se propageant le long d'une plaque d'aluminium et d'un patch composite seuls. Cette figure met ainsi en évidence que les vitesses de phase des modes SH_2 et / ou SH_3 du tricouche risquent, *a priori*, de peu varier avec les propriétés de la colle puisqu'elles sont déjà très proches de celle d'un mode SH_1 se propageant le long soit d'une plaque d'aluminium seule, soit d'un patch composite seul. Par contre aux fréquences inférieures à 0,4 MHz les vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1 se propageant le long de la structure collée sont bien distinctes de celle d'un mode SH_0 se propageant le long de l'un ou l'autre des substrats pris isolément. Il semblerait donc que ces modes puissent être utilisés pour quantifier la qualité d'un collage.

Dans la suite de l'étude, les influences de l'épaisseur, de la masse volumique, des modules de viscoélasticité des différents matériaux ainsi que la raideur d'interface k_T sont examinées afin de confirmer les suppositions faites à partir de la figure 2.6.

Sensibilité aux masses volumiques et aux épaisseurs

Les différentes épaisseurs et masses volumiques des matériaux constituant l'assemblage ont été évaluées dans le chapitre 1 à ±5 et ±3% respectivement. Toutefois la reproductibilité de la réalisation d'un collage est telle qu'un intervalle de confiance de ±15% pour l'épaisseur d'un joint de colle est plus réaliste que ±5%. Par conséquent, on considérera, dans cette étude de sensibilité, que l'épaisseur de la colle est connue à ±15%. La figure 2.7 montre l'influence de telles variations sur les vitesses de phase des modes de type SH se propageant le long de l'assemblage collé considéré. De telles variations de la masse volumique n'entraînent bien évidemment pas de changements notables ni sur les vitesses de phase ($\leq 1.5\%$) ni sur les fréquences de coupure ($\leq 4\%$) des modes guidés (cf. figure 2.7(b), (d) et (f)). De manière tout à fait similaire, une variation de ±15% de l'épaisseur de la couche de colle a une faible influence sur les courbes de dispersion (cf. figure 2.7 (c)). Néanmoins la vitesse de phase du mode SH_2 est perturbée de manière non négligeable par une variation d'épaisseur de l'un ou l'autre des deux substrats. Comme le montre la figure 2.7(a), entre 0,7 et 1 MHz un changement de ±5% de l'épaisseur du patch composite entraîne jusqu'à 15% de variation de la vitesse de phase de ce mode. Lorsque ce même mode est étudié pour des fréquences proches de 0,6 MHz, une variation de ±5% de l'épaisseur d'aluminium entraîne des variations de 10% de sa fréquence de coupure (cf. 2.7(e)). Ainsi le comportement du mode guidé SH_2 se propageant le long du multicouche est fortement influencé par une variation de l'épaisseur, et dans une moindre mesure par une variation de la masse volumique, de la partie aluminium de l'assemblage. Ce phénomène peut s'expliquer par la très forte similitude observée entre la fréquence de coupure de ce mode de type SH_2 du multicouche et celle du mode SH_1 se propageant le long d'une plaque d'aluminium de 3 mm sur la figure 2.6. La même conclusion s'applique à la vitesse de phase du mode de type SH_2 du tricouche et celle du mode SH_1 se propageant le long d'une plaque composite de 1,2 mm pour les fréquence supérieures à 0,7 MHz. Seules les vitesses de phase des modes de type SH_0 et SH_1 sont suffisamment peu sensibles à une variation de la masse volumique ou de l'épaisseur de l'un ou l'autre des matériaux de l'assemblage collé pour permettre, éventuellement, de quantifier les propriétés cohésives ou adhésives d'un joint de colle entre une plaque de 3 mm d'aluminium et un patch composite de 1,2 mm, dans l'hypothèse où l'un de ces modes serait sensible aux propriétés de l'adhésif et / ou de l'interface.

Sensibilité aux modules de cisaillement des substrats, de la colle et de l'interface

De la même manière que dans le paragraphe précédent, c'est l'influence des erreurs commises sur les valeurs des modules de cisaillement des deux substrats, respectivement ±5 et ±10% pour l'aluminium et le composite, qui va être prise en compte dans le calcul des vitesses de phase des modes SH_0, SH_1 et SH_2. Les résultats sont regroupés sur les figures 2.8(a) et (b). Ici encore le mode de type SH_2 est fortement influencé par les propriétés des substrats et ce pour les mêmes raisons que celles avancées concernant l'étude de la sensibilité des ondes SH à la masse volumique et à l'épaisseur de l'aluminium et du composite.

En fait en comparant ces deux figures à la figure 2.8(c), il apparaît que seuls des changements égaux ou supérieurs à une chute de 85% du C_{44} de l'adhésif ou de la raideur de l'interface puissent être évalués par l'intermédiaire du mode SH_2. Ceci confirme que ce mode guidé est inadapté à l'évaluation de la qualité des propriétés cohésives ou adhésives du joint de colle. Pour des fréquences supérieures à 0,4 MHz les vitesses de phase des modes de type SH_0 et SH_1 se propageant le long du tricouche sont elles aussi très similaires à celles des modes SH_0

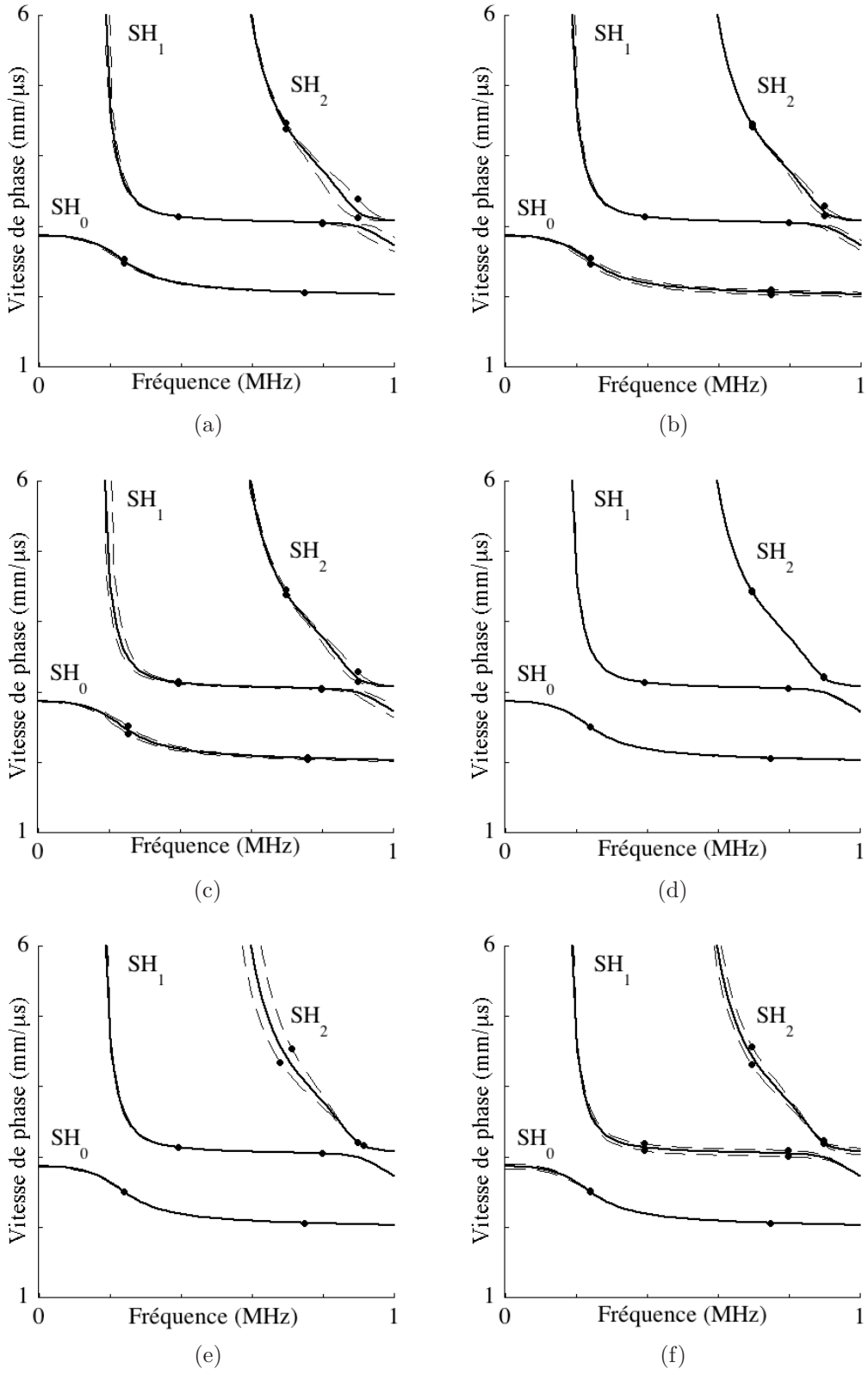


FIGURE 2.7 – Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des 3 premiers modes SH se propageant le long d'un assemblage collé, à un changement de $\pm x\%$ de l'épaisseur (colonne de gauche) et à $\pm 3\%$ de la densité (colonne de droite) du patch ($x = 5$) (a) et (b), de la colle ($x = 15$) (c) et (d) et de l'aluminium ($x = 5$) (e) et (f). Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (——) et pour une propriété modifiée ($- \bullet -$).

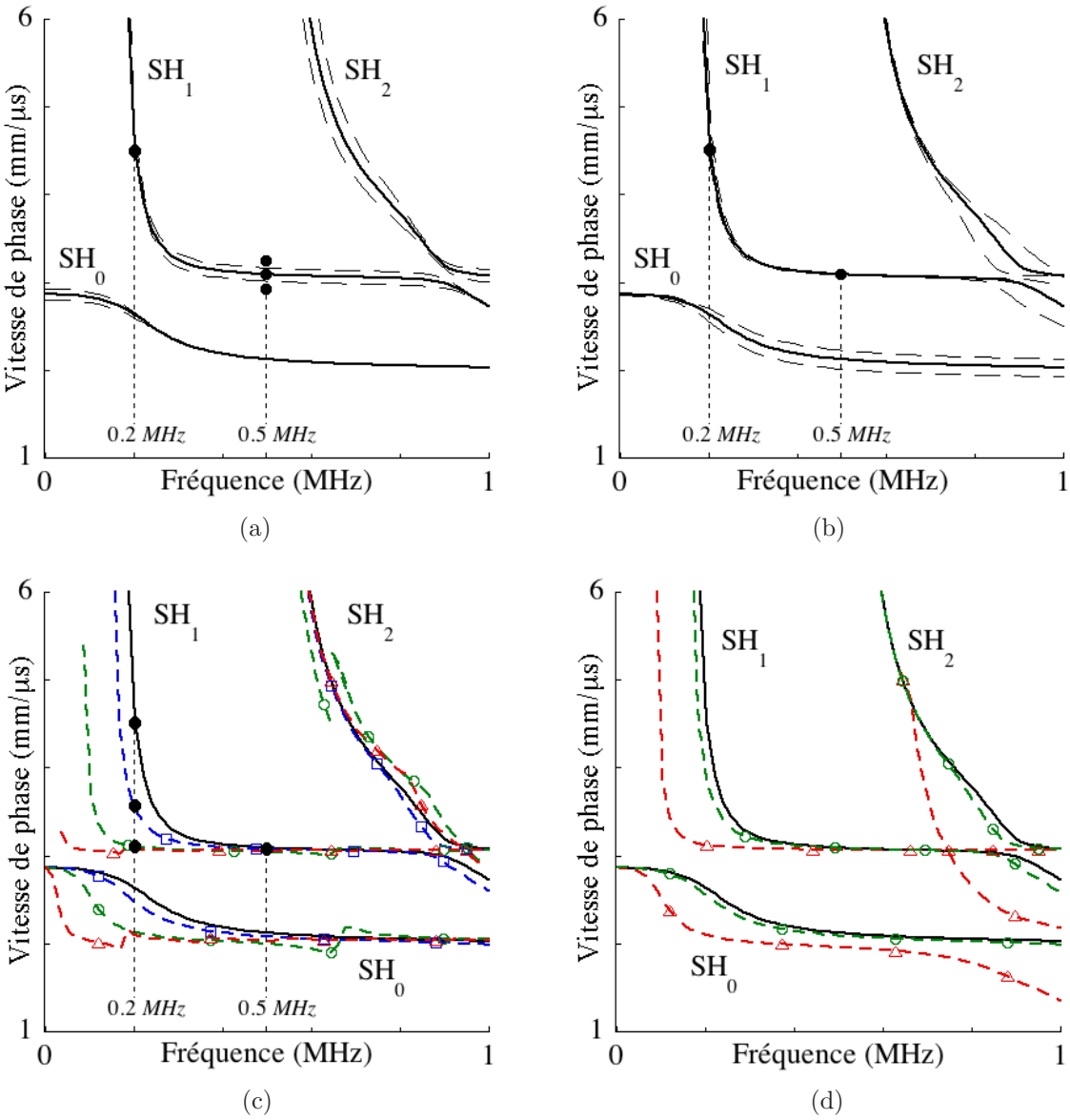


FIGURE 2.8 – Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des modes SH_0, SH_1 et SH_2 se propageant le long d'un assemblage collé à un changement de (a) $\pm 5\%$ du C_{44} de l'aluminium ($-$ $-$), (b) $\pm 10\%$ du C_{44} et du C_{55} du patch ($-$ $-$), (c) -40% ($-\square-$), -85% ($-\circ-$) et -99% ($-\triangle-$) du C_{44} de la colle et (d) -85% ($-\circ-$) et -99% ($-\triangle-$) du k_T de l'interface. Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (——).

se propageant le long d'une plaque d'une plaque de carbone époxy de 1,2 *mm* ou d'aluminium de 3 *mm*, respectivement (cf. figure 2.6). Une fois de plus, cela se traduit par une plus forte sensibilité de la vitesse de phase de ces modes aux modules de cisaillement des substrats plutôt qu'au C_{44} de la colle.

Pour les basses fréquences (en deçà et au voisinage de la fréquence de coupure du mode de type SH_1) les modes de type SH_0 et SH_1 sont, au contraire, plus sensibles à des variations du module de Coulomb de la colle qu'à celles des modules de cisaillement de l'un ou l'autre des substrats. En fait, la comparaison de la figure 2.8(c) avec les figures 2.8(a), (b) et 2.7 montre

qu'une mesure précise de la vitesse de phase des modes de type SH_0 et SH_1 à des fréquences inférieures ou de l'ordre de la fréquence de coupure du mode SH_1 permettrait de détecter une chute de 30% ou plus du C_{44} de l'adhésif.

En ce qui concerne la sensibilité de ces modes à la raideur de l'interface aluminium / colle, celle-ci s'avère largement insuffisante. La figure 2.8(d) montre en effet que même pour une interface dont la raideur est dégradée à 85%, les changements induits sont inférieurs à ceux qui seraient causés par une chute de 30% du C_{44} de la couche de colle. Les modes guidés de type SH ne permettent donc pas de quantifier les propriétés adhésives de l'interface aluminium / colle de la structure étudiée.

Sur les figures 2.8(c) et (d) les courbes de dispersion correspondant à une chute de 99% du module de Coulomb de la couche de colle ou de la raideur d'interface k_T permettent de vérifier la validité du modèle. Pour les cas où il n'existe quasiment plus de couplage entre l'aluminium et le patch ou entre l'aluminium et le bicouche colle / composite, les vitesses de phase calculées tendent bien vers celles d'une plaque d'aluminium, d'une plaque de carbone époxy ou du bicouche colle / composite. Ce point permet d'envisager la détection de larges décollements par l'intermédiaire de la mesure des vitesse de phase des modes SH_0 et SH_1, au niveau de ces zones décollées.

Comme escompté au début de cette étude de sensibilité (cf. figure 2.6), les vitesses de phase des modes de type SH_0 et SH_1 sont peu sensibles aux variations de propriétés des substrats au sein de l'intervalle de confiance de leurs modules de viscoélasticité. Le domaine des fréquences inférieures à la fréquence de coupure du mode SH_1 est de plus celui où la sensibilité aux propriétés du joint de colle est la plus forte. Ce résultat est quelque peu surprenant dans la mesure où la longueur d'onde des ultrasons doit habituellement être petite pour pouvoir, soit détecter des défauts, soit être sensible à des couches minces noyées dans un substrat. Afin de comprendre ce phénomène, la distribution des champs de déplacements et de contraintes dans l'épaisseur de l'assemblage a été étudiée à deux fréquences : 0,2 et 0,5 MHz. Les figures 2.9 et 2.10 montrent le déplacement u_3, les contraintes σ_{23} et σ_{13} créés par le mode SH_1 à 0,2 et 0,5 MHz, représenté par des points sur la figure 2.8, respectivement. Ils ont été choisis pour être représentatifs d'un cas où la sensibilité du mode est essentiellement liée aux propriétés de l'adhésif (0,2 MHz) et d'un autre pour laquelle elle est d'avantage liée aux propriétés des substrats (0,5 MHz). Ces champs ont d'abords été tracés pour un assemblage dont les propriétés sont nominales (valeurs centrales des C_{ij} mesurés dans le chapitre 1) puis en faisant varier alternativement ces propriétés. Le module de cisaillement de l'aluminium a été modifié conformément aux erreurs de mesures estimées, soit $\pm 5\%$ de sa valeur nominale. De la même manière, des variations de $\pm 10\%$ du C_{44} puis du C_{55} du patch composite ont été imposées. Les champs normalisés en puissance ainsi obtenus sont représentés sur les colonnes de gauche des figures 2.9 et 2.10. Les colonnes de droite de ces deux figures représentent quant à elles les champs normalisés en puissance pour lesquels le module de Coulomb de la colle est nominal, égal à 60% puis à 15% de cette valeur nominale.

La figure 2.9 montre que la distribution des champs dans l'épaisseur du guide est bien plus affectée par une variation du module de cisaillement du joint de colle que par la prise en compte des incertitudes sur les C_{44} et C_{55} des substrats. Ces différents profils justifient bien de la plus forte sensibilité du mode SH_1 aux modules de cisaillement de l'adhésif plutôt qu'aux propriétés des substrats, qui a été observée lors de l'analyse des vitesses de phase.

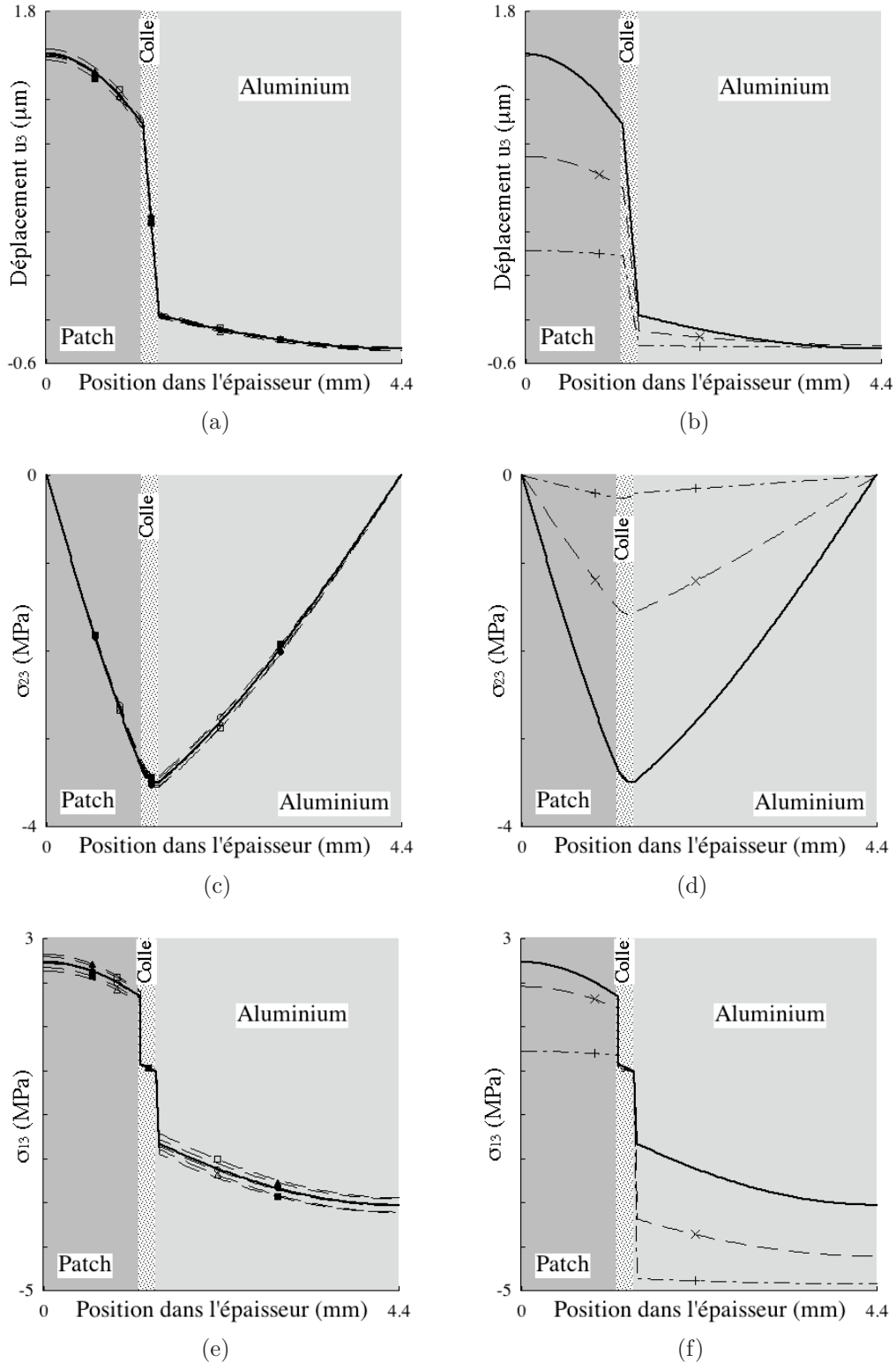


FIGURE 2.9 – Prédictions numériques de la distribution dans l'épaisseur des déplacements (a) et (b), de la contrainte σ_{23} (b) et (d), et de la contrainte σ_{13} (e) et (f), normalisés en puissance, (—) pour un assemblage de propriétés nominales ; colonne de gauche pour les variations de propriétés des substrats : +5% ($-\blacksquare-$) et −5% ($-\square-$) du C_{44} de l'aluminium, +10% ($-\blacktriangle-$) et −10% ($-\triangle-$) du C_{44} et +10% ($-\bullet-$) et −10% ($-\circ-$) du C_{55} du patch composite ; colonne de droite pour les variations de propriétés de la colle : −40% ($-\times-$) et −85% ($-+-$) du C_{44} de la colle. Mode SH_1 à 200 kHz.

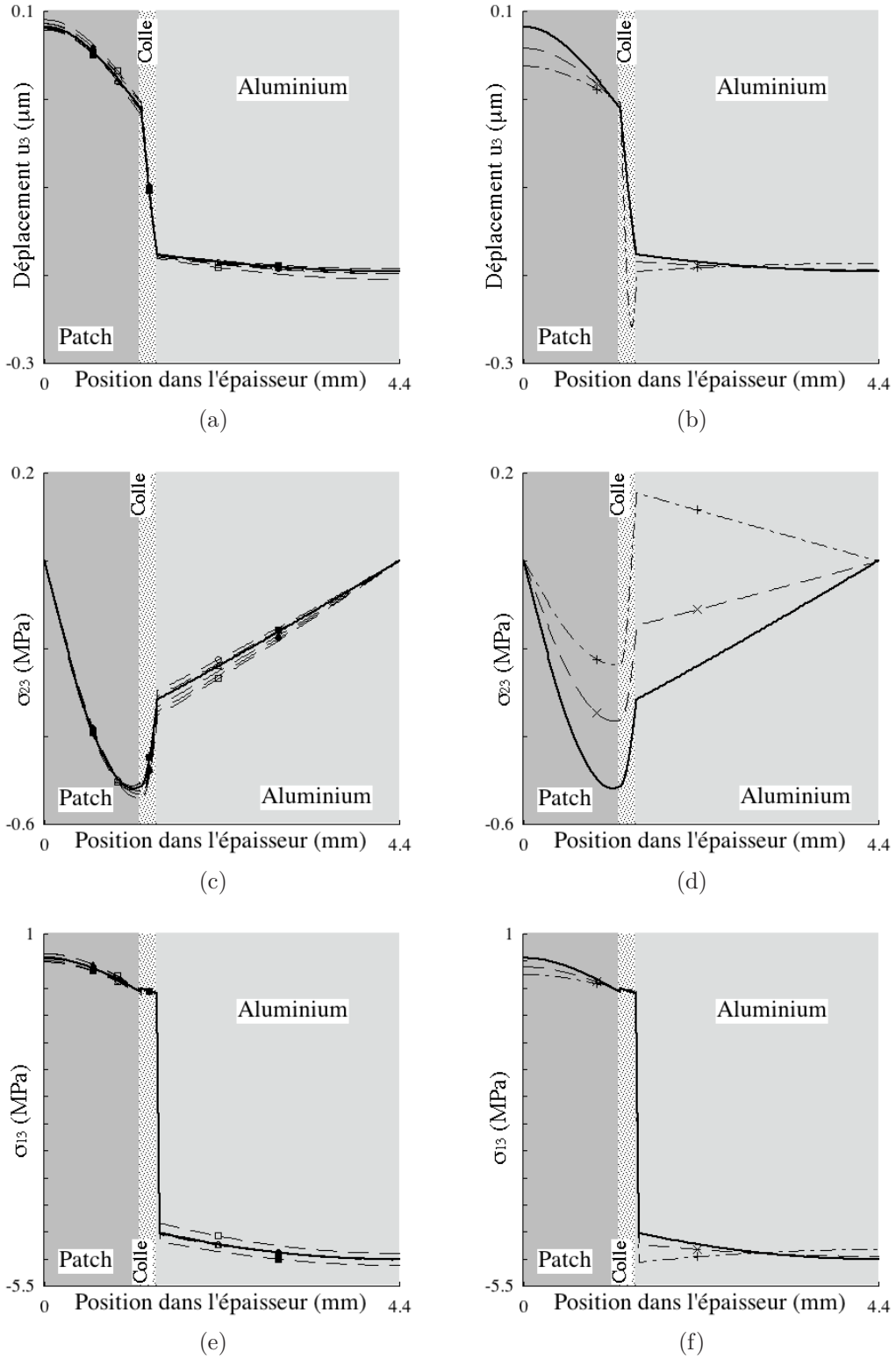


FIGURE 2.10 – Prédictions numériques de la distribution dans l'épaisseur des déplacements (a) et (b), de la contrainte σ_{23} (b) et (d), et de la contrainte σ_{13} (e) et (f), normalisés en puissance, (—) pour un assemblage de propriétés nominales ; colonne de gauche pour les variations de propriétés des substrats : +5% ($-\blacksquare-$) et −5% ($-\square-$) du C_{44} de l'aluminium, +10% ($-\blacktriangle-$) et −10% ($-\triangle-$) du C_{44} et +10% ($-\bullet-$) et −10% ($-\circ-$) du C_{55} du patch composite ; colonne de droite pour les variations de propriétés de la colle : −40% ($-\times-$) et −85% ($-+-$) du C_{44} de la colle. Mode SH_1 à 500 kHz.

La figure 2.10 est construite à l'identique de la précédente mais à 0,5 MHz. A cette fréquence le mode SH_1 est tout aussi sensible aux modules de cisaillement des substrats qu'à celui de la colle. La figure 2.10(d) fait état d'une contrainte σ_{23} plus sensible au module de Coulomb de la colle qu'à ceux des substrats. Ce résultat est à relativiser : cette contrainte est environ 10 fois plus faible que la contrainte σ_{13}. Ainsi l'ordre de magnitude de la composante σ_{23} du tenseur des contraintes n'est pas suffisamment élevé pour que sa sensibilité au C_{44} de la colle permette de justifier que la vitesse de phase du mode SH_1 soit plus sensible au joint de colle qu'aux substrats. Il est également intéressant de noter qu'à cette fréquence, même une réduction de 85% du C_{44} de la colle ne perturbe pas plus la distribution des champs, à l'exception de celle du σ_{23}, dans l'épaisseur qu'une variation de $\pm 5\%$ (respectivement $\pm 10\%$) du module de cisaillement de l'aluminium (respectivement du patch composite). Ce constat confirme donc que, pour cette fréquence, le mode SH_1 n'est pas suffisamment sensible au module de Coulomb de l'adhésif pour pouvoir envisager son utilisation pour contrôler un collage de patch.

La même analyse de la distribution des champs du mode SH_0 peut être faite à 0,2 MHz (cas où la sensibilité du mode est essentiellement liée aux propriétés de l'adhésif) et à 0,5 MHz (cas où la sensibilité du mode est d'avantage liée aux propriétés des substrats). Ces fréquences sont également représentées par des points sur la figure 2.8. Les conclusions qui peuvent être tirées de l'analyse des figures A.1 et A.2, présentées en annexe A sont similaires. Les différences entre les champs affectés par une perturbation des substrats et ceux affectés par une perturbation de l'adhésif sont tout de même moins nettes que pour le cas précédent. Cela reflète bien que la vitesse de phase du mode SH_0 est moins sensible au module de cisaillement de la colle que ne l'est la fréquence de coupure du mode SH_1 ainsi que le montre la figure 2.8(c).

Cette étude de sensibilité a donc permis d'identifier le domaine des fréquences allant jusqu'au voisinage de la fréquence de coupure du mode SH_1, comme le domaine de plus haute sensibilité de la vitesse de phase aux propriétés du joint de colle. Afin de confirmer ces prédictions numériques, des mesures expérimentales ont été réalisées. Parallèlement, cette étude de sensibilité a aussi montré que même si la fréquence de coupure du mode SH_1 était le paramètre le plus sensible aux propriétés en cisaillement du joint de colle, les vitesses d'énergie des modes SH_0 et SH_1 étaient elles aussi sensibles aux modules de viscoélasticité de l'adhésif. Les résultats sont présentés en annexe B.

2.3 Etudes numérique et expérimentale de la vitesse de phase des modes type SH_0 et SH_1

Tous les résultats précédemment présentés concernaient un assemblage de type tricouche. Désormais l'onde guidée étudiée se propagera le long d'une plaque d'aluminium (dont les dimensions sont suffisantes pour que cette plaque puisse être considérée comme infinie) sur laquelle a été collé un patch composite de dimensions latérales $200 \times 100\ mm^2$. L'étude expérimentale est réalisée en faisant l'hypothèse que la largeur du patch a un effet négligeable sur les vitesses de phase mesurées. De cette manière, il est possible de comparer les vitesses de phase mesurées à celles calculées par l'intermédiaire de la méthode SAFE où ni la largeur, ni la longueur du patch ne sont considérées.

2.3.1 Génération / détection des ondes SH

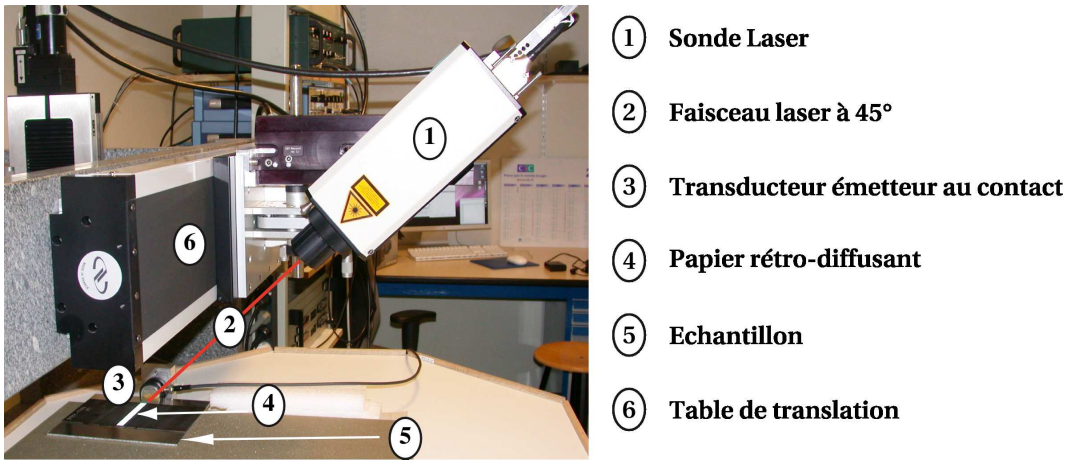


FIGURE 2.11 – Dispositif expérimental utilisé pour les mesures de vitesses de phase des ondes SH se propageant le long d'un assemblage collé.

Le dispositif expérimental utilisé pour mesurer la vitesse de phase des ondes de type SH se propageant le long d'assemblages collés est présenté sur la figure 2.11. Un transducteur piézoélectrique à ondes de cisaillement de 25 mm de diamètre (*Panametrics V152*) est mis en contact avec la tranche de l'échantillon. Le couplage est assuré par du miel. L'émetteur est un transducteur travaillant en cisaillement, il est donc orienté de manière à ce que les déplacements produits soient horizontaux (polarisation hors plan de propagation) pour générer des ondes de type SH. La fréquence d'excitation ainsi que le nombre de cycles du signal dépendent de l'échantillon testé et seront précisés le cas échéant. Pour une géométrie de type réparation par patch, l'excitation peut se faire soit sur la tranche, soit en surface du substrat métallique. Différents essais menés avec les transducteurs *Panametrics V152* ont montré qu'exciter les modes guidés SH sur la tranche de l'échantillon permettait d'obtenir un meilleur rapport signal sur bruit que lorsque le transducteur se trouvait en surface du dit échantillon. Pour ces premiers essais en laboratoire le transducteur sera donc couplé à la tranche de la plaque d'aluminium.

Un générateur de type *Agilent 33120A* et un amplificateur de puissance *Ritec GA 2500A* pouvant délivrer un signal de 400 V d'amplitude crête à crête sont utilisés pour générer un signal incident d'énergie suffisamment forte pour que le signal transmis ne soit pas trop faible (cf. figure 2.12). Les signaux mesurés sont ensuite moyennés afin améliorer le rapport signal sur bruit. Les déplacements produits par les ondes guidées de type SH sont mesurés grâce à un vélocimètre laser à effet Doppler *Polytec* dont la sensibilité est égale à 0,005 $m \cdot s^{-1}/V$.

Seule la mesure de la troisième composante u_3 du déplacement n'a d'intérêt puisque c'est la seule composante non nulle du déplacement (ondes SH classiques) ou tout du moins la composante dominante du déplacement produit par des ondes de type SH se propageant le long d'une direction non principale d'un matériau anisotrope [27]. Pour le détecter, la sonde laser devrait être inclinée à incidence rasante mais, pour des raisons pratiques évidentes, il est difficile de l'incliner à plus de 60°. Dans la pratique la sonde laser est inclinée à 45°, cet angle d'incidence étant un compromis satisfaisant entre le niveau mesuré de l'amplitude du déplacement ($u_3 \times \cos(45°)$) et la stabilité de la sonde pendant son déplacement le long du

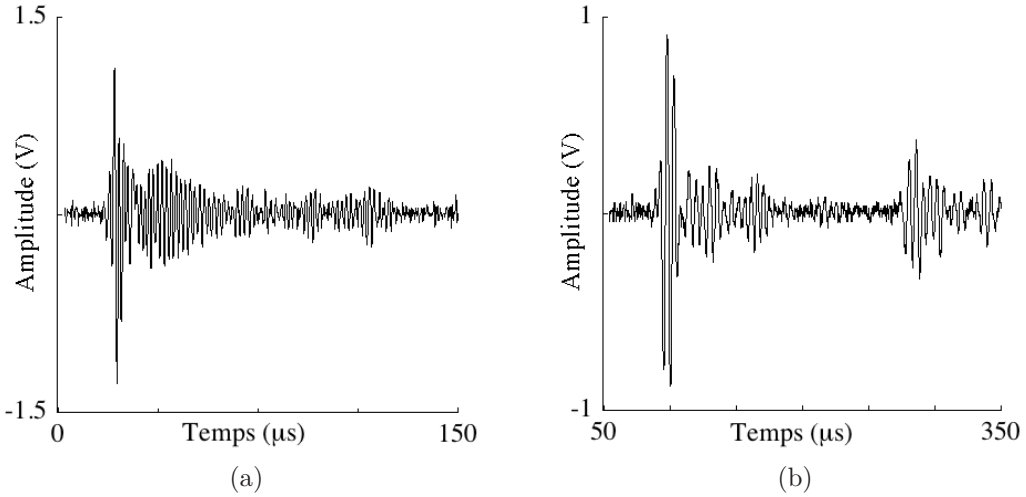


FIGURE 2.12 – Signaux (vitesse particulaire en $V/\mu s$) mesurés en temps réel à la surface d'une plaque d'aluminium (a) et du patch composite d'un assemblage collé (b) *via* le dispositif expérimental présenté figure 2.11.

chemin de propagation. Un papier rétrodiffusant est collé sur la surface de l'échantillon, le long du chemin de propagation.

Comme présentés sur la figure 2.12, les signaux mesurés en temps réel sont d'une qualité tout à fait correcte, mais chaque acquisition sera par la suite moyennée et filtrée pour améliorer encore le rapport signal sur bruit et ainsi optimiser le traitement des données.

Pour pouvoir mesurer une vitesse de phase, la sonde laser se déplace *via* une table de translation motorisée, le long du chemin de propagation sur une distance égale de une à deux fois la plus grande longueur d'onde estimée (λ_{max}), avec un incrément de déplacement égal au quart de la plus petite longueur d'onde estimée (λ_{min}), pour tout le domaine de fréquences considéré. A l'ensemble des signaux acquis est alors appliqué une double transformée de Fourier (2D FFT) afin d'évaluer la vitesse de phase de chacun des modes se propageant le long de la structure testée [81].

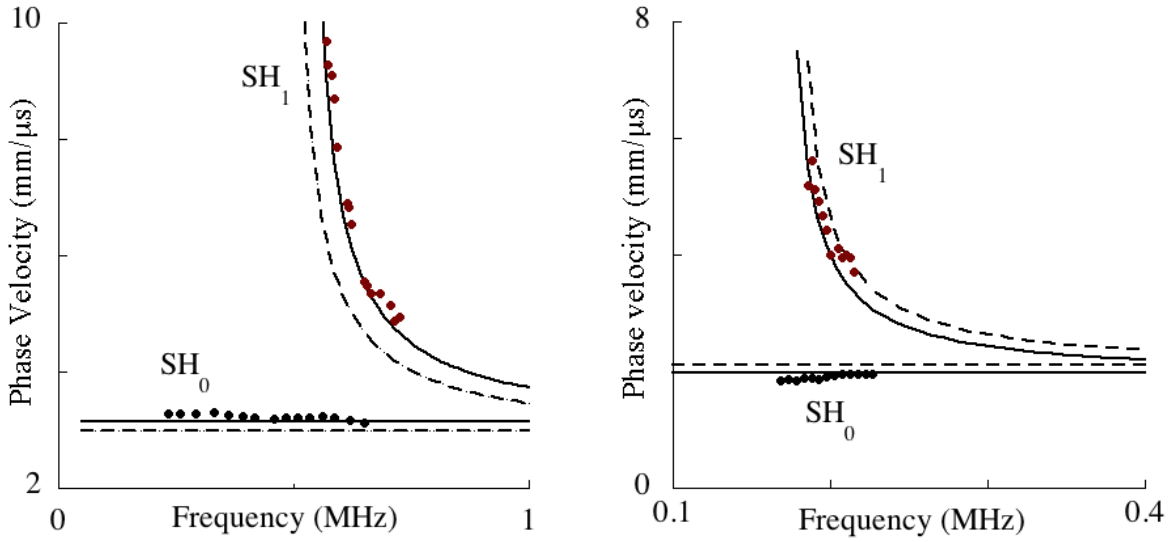
2.3.2 Mesures de la variation des vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1 en fonction des propriétés d'un joint de colle

Validation du dispositif expérimental

Afin de valider le dispositif expérimental présenté dans le paragraphe précédent, les vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1 se propageant le long d'une plaque d'aluminium de 3 mm ont été mesurées. L'excitation est un signal 4 cycles, de fréquence centrale 0,45 MHz et dont le spectre à -20 dB s'étend de 0,2 à 0,7 MHz. 64 signaux ont été acquis tous les 0,8 mm ($\approx \lambda_{min}/4$) sur une longueur égale à une fois la plus grande longueur d'onde estimée le long d'un chemin de propagation. Les résultats expérimentaux sont présentés sur la figure 2.13(a). Ils y sont comparés aux vitesses de phase calculées *via* la méthode SAFE 1D pour :

1. les propriétés de l'aluminium déterminées au chapitre 1 (cf. tableau 1.10 page 34) en pointillés ;

2. un C_{44} et un C_{55} optimisés de manière à ce que les vitesses calculées (traits pleins) correspondent au mieux aux vitesses mesurées (points). Dans ce cas ces modules sont respectivement égaux à $27{,}5^{\pm 5\%}$ et $26{,}5^{\pm 5\%}$ GPa, soit un ajustement vers le haut de 10 et 6% par rapport au C_{66} initialement mesuré. Ces écarts tiennent probablement d'une très légère anisotropie de cette plaque pouvant provenir par exemple du procédé de fabrication.



(a) (b)

FIGURE 2.13 – Vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1 se propageant le long (a) d'une plaque d'aluminium de 3 mm et (b) d'une plaque de carbone époxy de 5 mm ; prédictions numériques (modèle SAFE 1D) avec un C_{44} et un C_{55} initiaux ($- - - -$) et optimisés (———) et données expérimentales (•).

Cette nouvelle estimation des modules de cisaillement montre une légère anisotropie de l'aluminium. Elles sont également en accord avec les valeurs de C_{44} et C_{55} obtenues dans le chapitre 1 (en prenant en compte les erreurs de ±5% inhérentes à chaque méthode de mesures).

Les vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1 se propageant le long d'une plaque de carbone époxy de 5 mm ont également été mesurées. Cette fois l'excitation est un signal 5 cycles, de fréquence centrale 0,2 MHz et dont le spectre à -15 dB s'étend de 0,12 à 0,26 MHz. 46 signaux ont été acquis tous les 1,5 mm ($\approx \lambda_{min}/4$) sur 69 mm ($\approx 2 \times \lambda_{max}$). La figure 2.13(b) compare les valeurs obtenues expérimentalement (points) aux vitesses calculées avec :

1. les propriétés du composite déterminées au chapitre 1 (cf. tableau 1.10 page 34) en pointillés ;
2. un C_{44} et un C_{55} dont les parties réelles ont été optimisées de manière à ce que les vitesses calculées, en traits pleins sur la figure, correspondent au mieux aux vitesses mesurées. La partie imaginaire de ces modules de viscoélasticité optimisés est fixée à 3% de leur partie réelle. Les modules optimisés valent respectivement $4{,}75(1+I\cdot 3\%)$ et $6{,}2(1+I\cdot 3\%)$ GPa, avec une précision de ±10%.

Ces valeurs confirment celles obtenues au chapitre 1 puisque, comme le montre la figure 2.13(b), les vitesses de phase calculées avec ces deux jeux de modules sont très proches.

Ces résultats obtenus pour des matériaux pris isolément permettent non seulement de valider le dispositif expérimental de mesure de vitesse de phase d'ondes guidées SH, mais également d'ajuster avec précision (de l'ordre de $\pm 5\%$ pour l'aluminium et de $\pm 10\%$ pour le composite) les parties réelles des modules de viscoélasticité des matériaux qui vont maintenant être utilisés pour calculer les courbes de dispersion de l'assemblage collé.

Evaluation du module de Coulomb d'un joint de colle

Ce dispositif expérimental de génération au contact / détection laser a donc été testé sur un assemblage constitué d'un patch composite épais de 1,2 mm collé sur une plaque d'aluminium de 3 mm par l'intermédiaire d'un joint de colle de 0,1 mm. L'adhésif utilisé, précédemment décrit dans le paragraphe 1.3.3 page 28, a la particularité de réticuler à température ambiante sur plusieurs heures. Cette caractéristique permet d'effectuer des mesures ultrasonores pour différents niveaux de qualité du joint de colle, variant de manière continue d'un état cohésif faible (colle non réticulée) à un état dit nominal (colle réticulée). L'étude de sensibilité réalisée au paragraphe 2.2.2 a montré que la vitesse de phase du mode SH_0 et la fréquence de coupure du mode SH_1 étaient sensibles au module de Coulomb du joint de colle. Les mesures vont donc être réalisées pour des fréquences inférieures à 0,4 MHz. A ces fréquences, seul le mode SH_0 peut se propager le long de la plaque d'aluminium (cf. figure 2.6). Lorsque l'onde arrive au niveau du tricouche, elle peut se convertir en mode de type SH_0 et / ou SH_1. C'est sur la partie multicouche de l'assemblage que l'onde sera détectée, en surface du patch composite. Dans ce cas de figure, l'excitation utilisée est un signal électrique de 5 cycles, de 400 V d'amplitude crête à crête, de fréquence centrale 0,25 MHz, dont le spectre à -15 dB est compris dans le domaine de fréquences $[0{,}15 - 0{,}35]$ MHz.

Les modes se propageant le long de l'assemblage collé ont été enregistrés en relevant la composante u_3 du déplacement à la surface du patch composite tous les 0,8 mm sur 80 mm. Une double transformée de Fourier appliquée à l'ensemble des signaux permet ensuite de calculer la vitesse de phase des différents modes existants. Cette procédure est répétée pour différents états de réticulation de l'adhésif. La figure 2.14 regroupe les résultats expérimentaux (symboles) pour des temps de réticulation de la colle variant de 45 min à plusieurs jours après la réalisation du collage. Au début de la série de mesures (colle non réticulée) l'adhésif présente un aspect de pâte visqueuse pour devenir, au cours du temps de plus en plus rigide.

Les résultats obtenus montrent qu'un mode SH_0 incident dans la partie aluminium de la structure permet de générer à la fois les modes SH_0 et SH_1 dans la partie multicouche de l'assemblage. La distribution des champs de déplacements de ces modes (cf. figures A.1(b) et 2.9(b) respectivement) dans la partie aluminium de l'assemblage est relativement uniforme. D'après la relation 2.5 avec $n = 0$, elle coïncide ainsi avec la distribution du champs de déplacement produit par un mode SH_0 incident dans la plaque d'aluminium. Ce dernier peut *a priori* donc se convertir soit en mode de type SH_0, soit en mode de type SH_1 dans la partie tricouche de l'échantillon [82].

Il est également intéressant de noter que ce phénomène évolue en fonction de l'état de réticulation de la colle. Pour un adhésif encore non polymérisé, seul le mode SH_1 est détecté en surface du patch composite. Tandis qu'en fin de réticulation c'est principalement le mode de

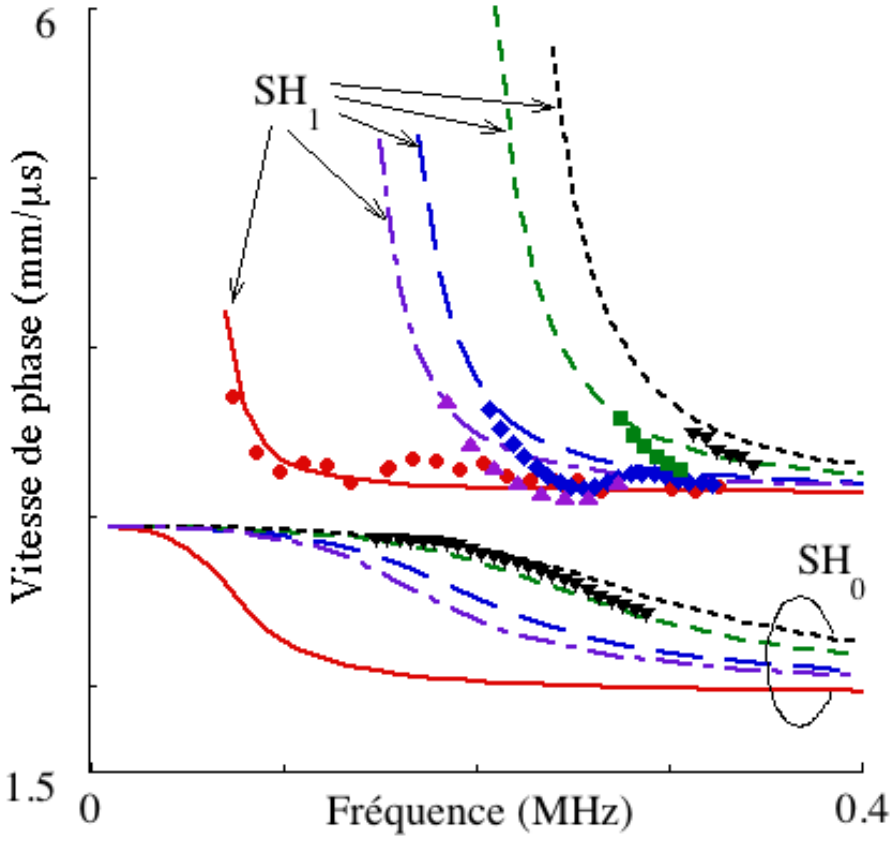


FIGURE 2.14 – Vitesses de phase des modes type SH_0 et SH_1 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch ; prédictions numériques avec un C_{44} optimisé (traits) et valeurs expérimentales (symboles) obtenues pour différents temps de réticulation : 45 *min* (— –, ●) ; 4 *h* (— - —,▲) ; 8*h*30 (— —, ♦) ; 35 *h* (– – –, ■) et après plusieurs jours de réticulation (- - - , ▼).

type SH_0 qui est mesuré. Cet état de fait est très utile pour caractériser la qualité du module de cisaillement d'un joint de colle. Si l'adhésif est mal réticulé ou bien s'il est dégradé, le mode de type SH_1 sera mesurable de manière nette en surface du patch. Au contraire, si le joint est de bonne qualité, le mode de type SH_0 sera clairement détecté en surface de l'assemblage. Ce phénomène peut être expliqué grâce à la figure 2.15.

Elle représente la distribution dans l'épaisseur de l'assemblage, de la composante P_1 du flux de puissance, calculée pour deux niveaux extrêmes de réticulation : 45 *min* et quelques jours après la réalisation du collage. Les modules de Coulomb associés à ces champs calculés sont respectivement égaux à 0,02 et 0,53 GPa (cf. tableau 2.1). Conformément à la remarque faite précédemment, la partie imaginaire de ce module est égale à 10% de sa partie réelle dans les deux cas. Les fréquences pour lesquelles ces champs ont été tracés ont également été choisies de manière à ce que les modes de type SH_0 et SH_1 puissent coexister dans l'assemblage. Elles valent 0,2 MHz pour le cas de la colle non réticulée et 0,25 MHz pour celui de la colle réticulée. Les figures 2.15(a) et (c) montrent que lorsque le niveau de réticulation de la colle est faible, le mode de type SH_0 ne produit pas de flux de puissance dans la partie aluminium du tricouche contrairement au mode de type SH_1. Ceci explique pourquoi le mode SH_0 incident depuis

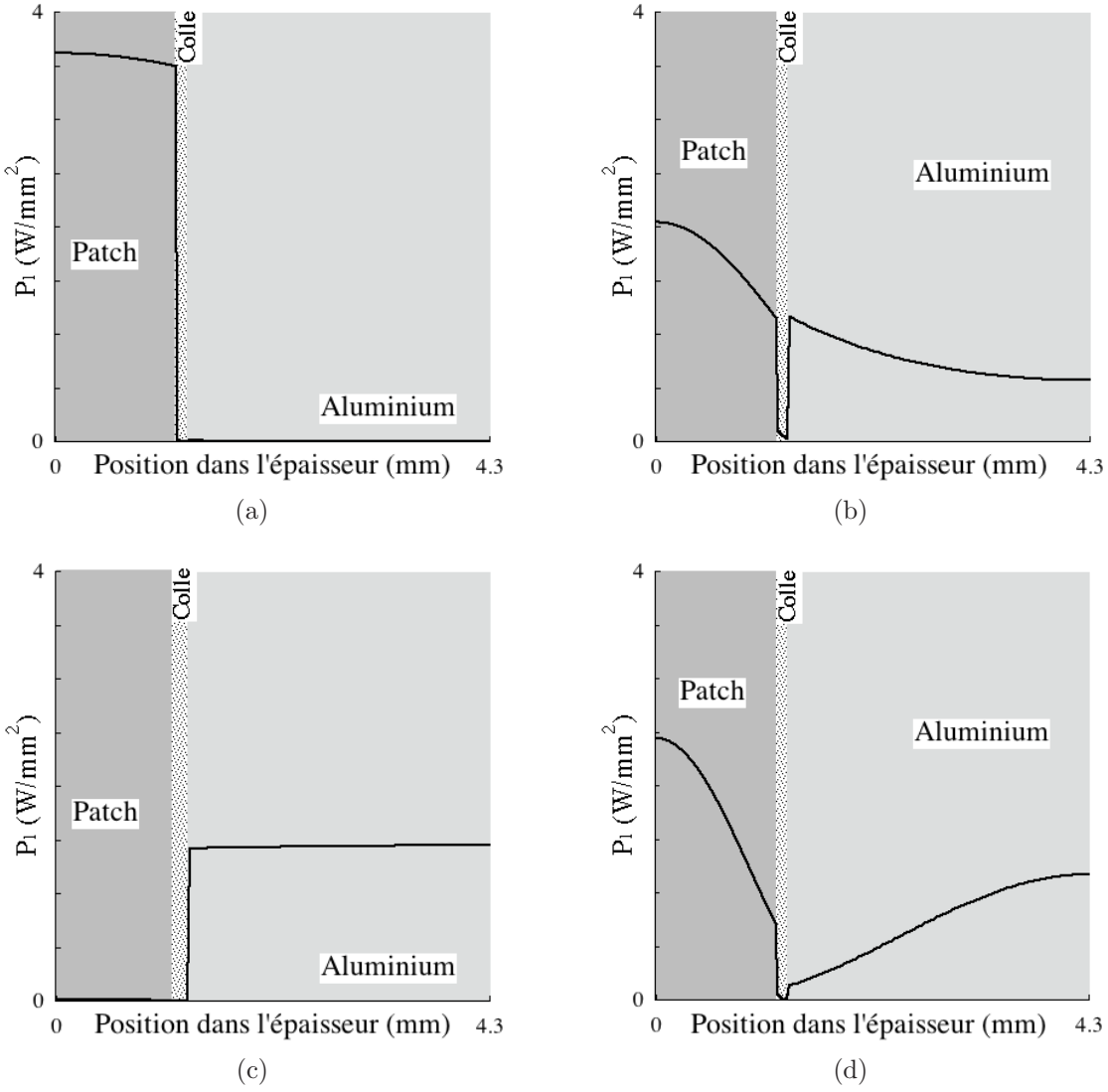


FIGURE 2.15 – Distributions dans l'épaisseur de l'assemblage aluminium / colle / patch de la composante dans le plan du flux de puissance pour (colonne de gauche) une colle non réticulée *i.e.* 45 *min* après la réalisation du collage, et pour (colonne de droite) une colle réticulée, *i.e.* plusieurs jours après la réalisation du collage. Les graphes (a) et (b) ainsi que (c) et (d) correspondent respectivement aux modes de type SH_0 et SH_1.

l'aluminium n'est pas couplé au mode de type SH_0 de l'assemblage tandis qu'il excite le mode de type SH_1. A noter que le flux de puissance de ce dernier mode est quasi nul dans la partie composite de l'assemblage. Néanmoins, son déplacement en surface du patch (cf figure 2.9(b)) ne l'est pas et suffit pour détecter le mode SH_1 en surface du composite, même si la puissance du mode est faible dans cette partie du multicouche.

En ce qui concerne la colle réticulée, les figures 2.15(b) et (d) montrent que les deux modes SH_0 et SH_1 de l'assemblage produisent de l'énergie dans la partie aluminium de l'assemblage. Le mode SH_0 incident depuis l'aluminium est donc couplé à ces deux modes. Pour comprendre pourquoi le mode de type SH_0 est plus nettement mesurable que le mode SH_1 il est nécessaire de tracer les atténuations de ces deux modes. La figure 2.16(b) montre en effet que pour des

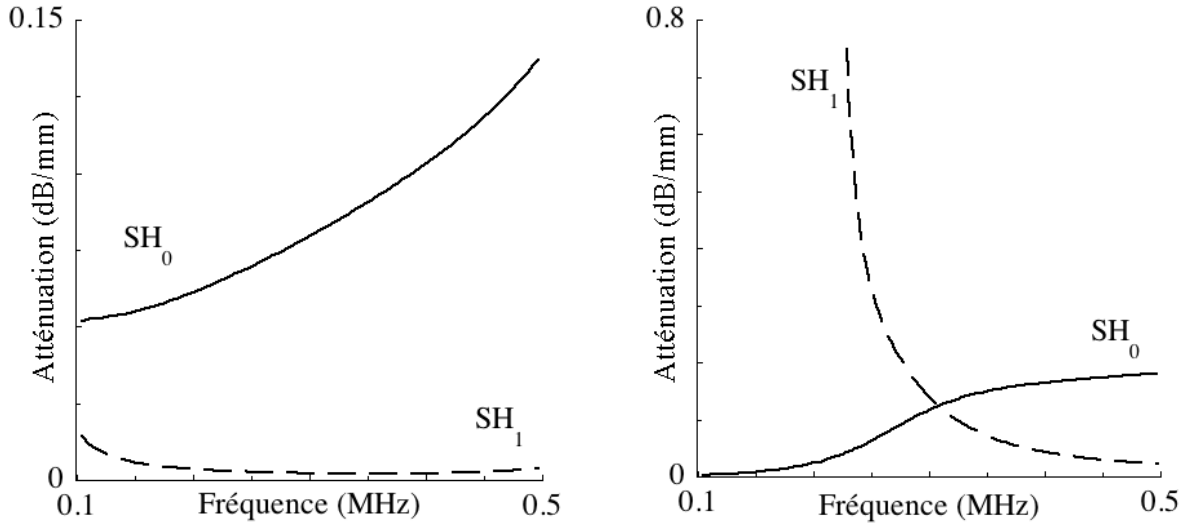


FIGURE 2.16 – Atténuation des modes SH_0 et SH_1 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch (a) pour une colle non réticulée *i.e.* 45 min après la réalisation du collage et (b) pour une colle réticulée, *i.e.* plusieurs jours après la réalisation du collage.

fréquences inférieures à 0,25 MHz l'atténuation du mode SH_1 est très forte ($\geq 4\ dB/cm$). Elle décroît ensuite jusqu'à une valeur quasi nulle au fur et à mesure que la fréquence augmente. De son côté l'atténuation du mode SH_0 est très faible jusque 0,25 MHz et augmente avec la fréquence pour atteindre un plateau de 2 dB/cm. Cette évolution des atténuations contribue donc à une meilleure détection du mode SH_0 que du SH_1 pour les basses fréquences du domaine dans lequel sont réalisées les mesures. Elle explique également pourquoi le mode SH_1 est mesuré au delà de 0,3 MHz, c'est à dire aux fréquences pour lesquelles son atténuation diminue.

L'examen de la figure 2.16(a) renforce également les conclusions faites au paragraphe précédent pour expliquer pourquoi seul le mode SH_1 est détecté lorsque la colle est mal réticulée. En effet pour un très faible module de Coulomb de l'adhésif, l'atténuation du mode SH_1 est très faible ($\leq 0{,}25\ dB/cm$) et toujours inférieure à celle du mode SH_0. Donc même si le mode de type SH_1 propage un flux d'énergie faible dans la partie composite de l'assemblage, son déplacement non nul en surface ainsi que sa faible atténuation dans tout le domaine de fréquences considéré favorisent sa détection.

La figure 2.14 montre également que la fréquence de coupure du mode SH_1 évolue de manière monotone entre 0,15 et 0,3 MHz. Les vitesses de phase mesurées expérimentalement ont donc été confrontées à celles calculées (traits) pour différents modules C_{44} optimisés de la colle dont les valeurs sont regroupées dans le tableau 2.1.

Cette phase d'optimisation du module de Coulomb consiste en fait à résoudre un problème inverse dont l'objectif est de caractériser, de manière non destructive, la raideur en cisaillement du joint de colle. Les valeurs obtenues ici sont réelles du fait que les vitesses de phase des modes SH considérés ne dépendent que très peu de la viscoélasticité des matériaux. Ces mesures ne permettent donc pas d'obtenir suffisamment d'informations pour pouvoir remonter au C''_{44}, néanmoins une partie imaginaire du module de viscoélasticité de 10% de sa partie réelle

Temps de réticulation	45 *min*	4*h*	4*h*30	35*h*	Quelques jours
C'_{44} **optimisé** (GPa)	0,02	0,13	0,18	0,35	0,53

TABLE 2.1 – Valeurs du C'_{44} du joint de colle, optimisées à partir des vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1 mesurées pour différents temps de réticulation.

est une estimation tout à fait raisonnable [**?**].

Pour pouvoir caractériser la partie imaginaire du module de Coulomb de la colle, il faudrait par exemple, mesurer l'atténuation des ondes guidées se propageant le long de l'assemblage collé. Cette atténuation mesurée serait alors porteuse d'informations, principalement concernant les parties imaginaires des modules de viscoélasticité de chacun des matériaux du multicouche, c'est à dire, pour l'assemblage concerné, le $C''_{44} = C''_{55}$ de la colle ainsi que les C''_{44} et C''_{55} du patch composite. La campagne de caractérisation des matériaux (cf. chapitre 1) a permis de déterminer les parties imaginaires des modules de viscoélasticité du composite avec une précision de ±15%. L'atténuation des modes guidés SH se propageant le long de l'assemblage collé peut alors être calculée en prenant en compte ces variations probables du C''_{44} et du C''_{55}. Pour qu'une mesure de l'atténuation du mode guidé SH_0 ou SH_1 puisse permettre de caractériser la partie imaginaire du module de Coulomb de la colle, il est nécessaire qu'une variation du C''_{44} du joint de colle induise une plus grande perturbation des courbes d'atténuation qu'une variation au sein de l'intervalle de confiance du C''_{44} et du C''_{55} du composite.

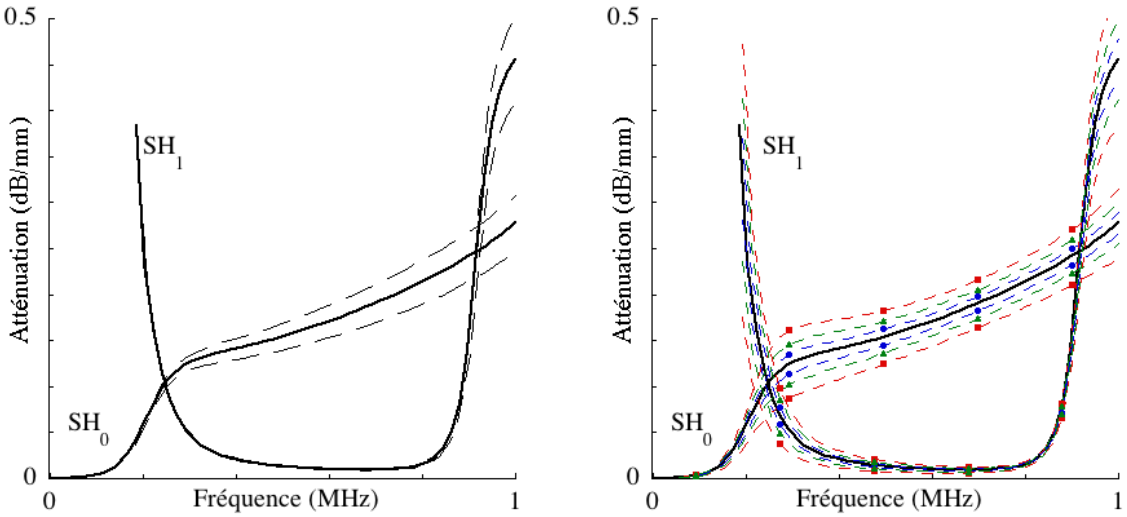


FIGURE 2.17 – Prédictions numériques de la sensibilité des atténuation des modes guidés SH_0 et SH_1 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch à un changement (a) de ±15% du C''_{44} et du C''_{55} du composite (– – –) et (b) de ±15% (– • –) ; de ±30% (– ▲ –) et ±50% (– ■ –) du $C''_{44} = C''_{55}$ de la colle. Prédictions numériques pour un assemblage de propriétés nominales (——) .

La figure 2.17 montre que cette plus forte sensibilité de l'atténuation à la viscoélasticité de la colle qu'à celle du patch existe. Une mesure précise de cette atténuation devrait donc permettre d'évaluer la viscosité de la colle, tout au moins pour un état final de la réticulation, et à condition de connaître assez précisément la viscoélasticité du patch composite. Pour vérifier qu'une mesure d'atténuation permet de déterminer la valeur de la partie imaginaire du module de Coulomb du joint de colle, quelque soit son stade de réticulation, cette étude de sensibilité devrait être menée pour différentes valeurs du module de Coulomb de la colle.

Conclusions

Dans ce chapitre les ondes SH ont été étudiées pour caractériser de manière quantitative le module de Coulomb du joint de colle d'un assemblage aluminium / adhésif / patch composite. Un modèle éléments finis semi analytique (SAFE) à une dimension et une variable d'espace, dans lequel est implémenté une condition aux limites de type densité surfacique de ressorts à l'interface aluminium / colle, a été développé pour calculer les courbes de dispersion d'un tel assemblage. Ce modèle prend en compte les propriétés viscoélastiques des différents matériaux. Les courbes de dispersion en vitesse de phase ont ainsi pu être tracées pour divers états cohésifs de la colle et niveaux d'adhésion de l'interface. Ceci a permis de simuler l'effet la variabilité des propriétés en cisaillement des substrats sur les valeurs des vitesses de phase des 3 premiers modes guidés de type SH. Cette étude de sensibilité a mis en évidence que seuls certains modes pouvaient être utilisés pour évaluer de manière quantitative l'état cohésif et/ou adhésif du joint de colle. Par exemple la vitesse de phase du mode SH_2 de l'assemblage est plus fortement influencée par une variation de ± 5 à $\pm 10\%$ du C_{44} ou du C_{55} de l'un ou l'autre des substrats que par une forte variation (de l'ordre de 85%) du C_{44} de la colle et ce pour tout le domaine d'investigation. Ce mode est donc inadapté à l'évaluation de la qualité d'un joint de colle de l'assemblage dont il est question ici. Ce n'est néanmoins pas le cas des modes de type SH_0 et SH_1, car ils se sont révélés plus sensibles à des variations vraisemblables du module de Coulomb de l'adhésif qu'à des petites variations des modules de cisaillement de l'aluminium ou du patch composite. En effet, les vitesses de phase de ces modes SH_0 et SH_1 se sont avérées plus sensibles à des chutes de 40% (dans le cas du mode SH_0) ou 25% (dans le cas du mode SH_1) du C_{44} de la colle qu'à des variations de $\pm 5\%$ ou $\pm 10\%$ (intervalles de confiance) des modules de cisaillement de l'aluminium ou du composite, respectivement. Ce phénomène est particulièrement marqué pour les fréquences basses ou proches de la fréquence de coupure du mode SH_1 de l'assemblage collé. Cette zone de fréquences correspond à un domaine où les courbes de dispersion (en vitesse de phase) du tricouche sont relativement découplées de celles d'une plaque d'aluminium ou d'une plaque de carbone époxy prises isolément. L'analyse des distributions des champs de déplacement et de contraintes dans l'épaisseur de l'assemblage permet de comprendre pourquoi ces deux premiers modes guidés du tricouche sont plus sensibles à des variations du module de Coulomb de la colle plutôt qu'à de faibles variations des modules de cisaillement des substrats.

Un dispositif expérimental a ensuite été mis en place de manière à confirmer les différents résultats numériques obtenus. Une onde guidée polarisée horizontalement a été générée au contact et détectée, après s'être propagée le long de l'assemblage, par l'intermédiaire d'une sonde laser inclinée. Dans un premier temps ce dispositif a été validé en comparant les vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1 calculées et mesurées pour un échantillon d'aluminium puis de carbone époxy. Il a ensuite été utilisé pour suivre l'évolution de la vitesse de phase de ces deux modes se

propageant le long d'un assemblage collé pendant la réticulation du joint de colle. Ces mesures ont été effectuées de 45 *min* à plusieurs jours après la réalisation du collage. Elles ont montré une très forte conversion du mode SH_0 incident dans l'aluminium en mode de type SH_1 dans le tricouche durant pratiquement toute la durée de la réticulation de l'adhésif. C'est seulement quand la colle a été en fin de polymérisation qu'il a été possible de détecter à la fois le mode SH_0 et le mode SH_1. Ce phénomène de conversion de mode a pu être expliqué grâce à l'analyse de la distribution du flux de puissance dans l'épaisseur de l'assemblage ainsi qu'à l'analyse de l'évolution de l'atténuation des modes en fonction de la fréquence, et pour des propriétés extrêmes de la colle. Enfin la forte sensibilité de la fréquence de coupure du mode SH_1 au module de Coulomb de la colle a permis de résoudre un problème inverse. Le C_{44} de l'adhésif a ainsi pu être estimé en comparant les vitesses de phase mesurées et calculées.

Cette étude a donc démontré le fort potentiel des ondes guidées SH_0 et SH_1 à évaluer de manière quantitative le module de cisaillement d'un joint de colle de 0,1 *mm* entre une plaque d'aluminium de 3 *mm* et un patch composite de 1,2 *mm*. Pour conclure cette étude il faudra aussi approfondir l'étude numérique de la sensibilité de l'atténuation des modes SH_0 et SH_1 à la viscoélasticité de la colle et du patch, et si possible, résoudre le problème inverse associé qui consisterait à évaluer la viscosité de l'adhésif. Il sera également nécessaire de confronter les résultats des essais ultrasonores à ceux d'essais mécaniques. De cette manière il sera possible (ou non) de relier le module de Coulomb estimé par l'intermédiaire des mesures de vitesse de phase à une valeur donnée de la résistance à la rupture, et de voir si cette correspondance est unique, comme cela a déjà été fait pour un autre type d'assemblage [37].

Chapitre 3

Etude des ondes guidées de type Lamb

Introduction

Le chapitre 1 a permis de définir les propriétés viscoélastiques des différents matériaux constituant la géométrie étudiée, ainsi que les intervalles de confiance de ces différentes valeurs. Il a également été montré, au chapitre 2, que les ondes guidées SH_0 et SH_1 se propageant le long de l'assemblage collé permettent de caractériser de manière quantitative et non destructive le module de Coulomb d'un joint de colle. L'objectif de ce chapitre est de trouver une (ou des) onde(s) guidée(s), de type Lamb, sensible(s) aux deux modules de viscoélasticité de la colle et non plus seulement à son module de cisaillement.

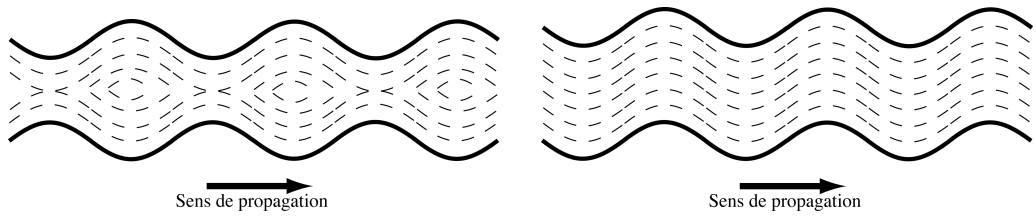
Tout d'abord une analyse des courbes de dispersion, ainsi que des champs de déplacement, de contraintes ou du flux d'énergie, des modes de Lamb se propageant le long d'un assemblage de type patch / colle / aluminium va être effectuée pour tenter de sélectionner à la fois une (ou des) onde(s), un domaine de fréquences et un paramètre (vitesse de phase, d'énergie, atténuation, etc.) plus sensibles aux propriétés de la couche de colle ou de l'interface aluminium / colle qu'à celles des substrats. L'interface de cet assemblage est modélisée par l'intermédiaire d'une condition aux limites de type ressorts [17, 44, 45, 79]. Ces conditions interfaciales seront implémentées dans la méthode SAFE (« Semi Analytical Finite Element »), permettant de modéliser la propagation d'ondes guidées le long de l'assemblage. Ce(s) mode(s) devra (devront) également être peu sensible(s) à une variation de l'épaisseur ou de la masse volumique de l'un des matériaux. Ensuite un modèle basé sur la méthode des éléments finis permettra de simuler numériquement le dispositif de mesures envisagé pour une géométrie de réparation par collage de patch. Les influences de la viscoélasticité des matériaux et de la géométrie du joint de colle seront prisent en compte. Les résultats de ces simulations numériques seront ensuite confrontés à ceux de mesures ultrasonores réalisées pour plusieurs stades de réticulation d'une colle époxy. En parallèle, une campagne d'essais destructifs sera effectuée afin de confronter les données ultrasonores à des efforts de ruine.

Deux types d'assemblages seront étudiés dans ce chapitre. Pour le premier le patch est en plexiglas, pour le second il est en composite. Travailler avec un patch en plexiglas permet dans un premier temps de simplifier l'étude. En effet, comme ce matériau est isotrope, le nombre de modules de viscoélasticité du patch à influer sur les courbes de dispersion des ondes guidées est diminué de moitié.

3.1 Rappel sur les ondes de Lamb

L'équation de Christoffel a été présentée au chapitre précédent (cf. équation 2.3 page 36). Il y a été rappelé que, dans un milieu homogène isotrope, cette équation possède trois valeurs propres correspondant à trois ondes : une onde longitudinale de vitesse $c_L = \sqrt{C_{11}/\rho}$ et de polarisation parallèle à la direction de propagation de l'onde et deux ondes transverses, notées SV et SH, de vitesse $c_T = \sqrt{C_{66}/\rho}$ et de polarisations perpendiculaires à la direction de propagation.

Lorsque le milieu de propagation est borné par deux surfaces parallèles (guide de type plaque) la superposition des ondes longitudinales et transversales SV qui se multi réfléchissent entre les surfaces permet à des ondes de type Lamb de se propager. Ces ondes, découvertes par Sir H. Lamb en 1889 [83, 84], constituent des modes de résonance de l'épaisseur du guide. Elles produisent des déplacements et des contraintes dans toute l'épaisseur de la plaque et se propagent sur de très longues distances. Suivant que le déplacement normal produit soit symétrique ou antisymétrique (cf. figure 3.1) par rapport au plan médian de la plaque, les modes sont classés en deux familles : les modes symétriques, notés S_n, et antisymétriques, notés A_n, où n varie de 0 à l'infini.



(a) (b)

FIGURE 3.1 – Type de déplacements induits par des ondes de Lamb symétriques (a) et antisymétriques (b).

Afin de caractériser ces différents modes il est nécessaire non seulement d'écrire les équations propres à la propagation mais également les conditions de contraintes imposées par le milieu environnant sur la structure, c'est à dire les conditions aux limites (ici des conditions de surfaces libres). C'est en satisfaisant simultanément ces équations que l'on obtient les équations de dispersion pour les ondes symétriques et antisymétriques. Si l'on considère un matériau homogène, isotrope, d'épaisseur h, elles s'écrivent respectivement [67] :

$$\frac{\tan(k_{2T}h/2)}{\tan(k_{2L}h/2)} = -\frac{4k_1^2 k_{2L} k_{2T}}{(k_{2T}^2 - k_1^2)^2} \tag{3.1}$$

$$\frac{\tan(k_{2T}h/2)}{\tan(k_{2L}h/2)} = -\frac{(k_{2T}^2 - k_1^2)^2}{4k_1^2 k_{2L} k_{2T}} \tag{3.2}$$

où k_1 est la composante commune du nombre d'onde, elle est portée par l'axe $\boldsymbol{x_1}$ (cf. repère de la figure 3.4), où k_{2L} et k_{2T} sont les composantes transverses des nombres d'onde de l'onde longitudinale et transversale SV. Elles sont définies de la manière suivante :

$$k_{2L}^2 = \left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - k_1^2 \quad \text{et} \quad \mathrm{k_{2T}^2} = \left(\frac{\omega}{\mathrm{c_T}}\right)^2 - \mathrm{k_1^2}$$

Dans le cas d'un matériau anisotrope 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 [55, 56, 69, 70] ou numériques [71–75] pour trouver les nombres d'ondes, les champs de déplacement, de contraintes ainsi que le flux de puissance des modes de Lamb.

A un produit fréquence×épaisseur donné il existe un nombre fini de modes guidés propagatifs et évanescents ainsi qu'un nombre infini de modes fortement atténués. Ces modes correspondent, respectivement, aux solutions à nombre d'onde réel, imaginaire pur et complexe si le guide n'est pas dissipatif, c'est à dire s'il est placé dans le vide et s'il est constitué de matériaux élastiques. Lorsque les matériaux sont viscoélastiques (ou le guide immergé dans un fluide) ces nombres d'onde sont tous complexes. Les ondes guidées peuvent quand même être classées dans l'une ou l'autre de ces trois familles d'ondes en fonction de la proportion existante entre les parties réelle et imaginaire de leur nombre d'onde. Lorsque la partie imaginaire du nombre d'onde est négligeable devant sa partie réelle, l'onde correspondante est propagative. Au contraire, lorsque c'est la partie réelle qui est négligeable devant la partie imaginaire de k_1, alors l'onde guidée correspondante est évanescente. Enfin les modes fortement atténués correspondent aux solutions dont les parties réelle et imaginaire du nombre d'onde sont du même ordre de grandeur. Au cours de cette étude, seuls les modes propagatifs sont considérés. En traçant ces solutions pour différentes fréquences on obtient les courbes de dispersion des ondes de Lamb. Celles présentées figure 3.2 sont obtenues, à titre d'exemple, pour un aluminium épais de 1 mm, de masse volumique $\rho = 2{,}67\ g/cm^3$ et de modules de rigidité $C_{11} = 103\ GPa$ et $C_{66} = 25\ GPa$. Elles sont tracées dans la bande de fréquences $[0-3]\ MHz$.

Les courbes (a) et (b) représentent l'évolution du nombre d'onde et de la vitesse de phase, $V_{ph} = \omega/k$, en fonction de la fréquence. Comme pour les ondes SH, lorsque le nombre d'onde est complexe, il est également possible de tracer sa partie imaginaire qui représente l'atténuation de l'onde. Le graphe (c) de la figure 3.2 représente l'évolution de la vitesse d'énergie, norme du vecteur vitesse d'énergie $\mathbf{V_e}$, des ondes de Lamb. Ces notions ont été définies page 37 et 38. Enfin le graphe (d) représente l'évolution de l'angle de coïncidence des modes guidés en fonction de la fréquence (si la plaque est immergée dans un fluide, par exemple de l'air dans le cas de la figure 3.2). Ce dernier correspond à l'angle nécessaire pour qu'une onde incidente dans le fluide génère, dans la plaque, le mode guidé de nombre d'onde k_n. Il est défini par la loi de Snell-Descartes [49] :

$$\theta = sin^{-1}\left(\frac{k_n}{k_{fluide}}\right)$$

où k_n et k_{fluide} définissent respectivement le nombre d'onde de l'onde guidée considérée et celui de l'onde longitudinale incidente dans le fluide. Cet angle θ représente aussi l'angle de rayonnement des ondes longitudinales diffusées dans le fluide par perte d'énergie de l'onde guidée le long de la plaque immergée.

Pour n'importe quelle solution modale (f,k) il est possible de tracer la distribution des champs de déplacements, de contraintes et du flux de puissance dans l'épaisseur de la plaque (cf. figure 3.3 pour le mode S_0 à 1 MHz).

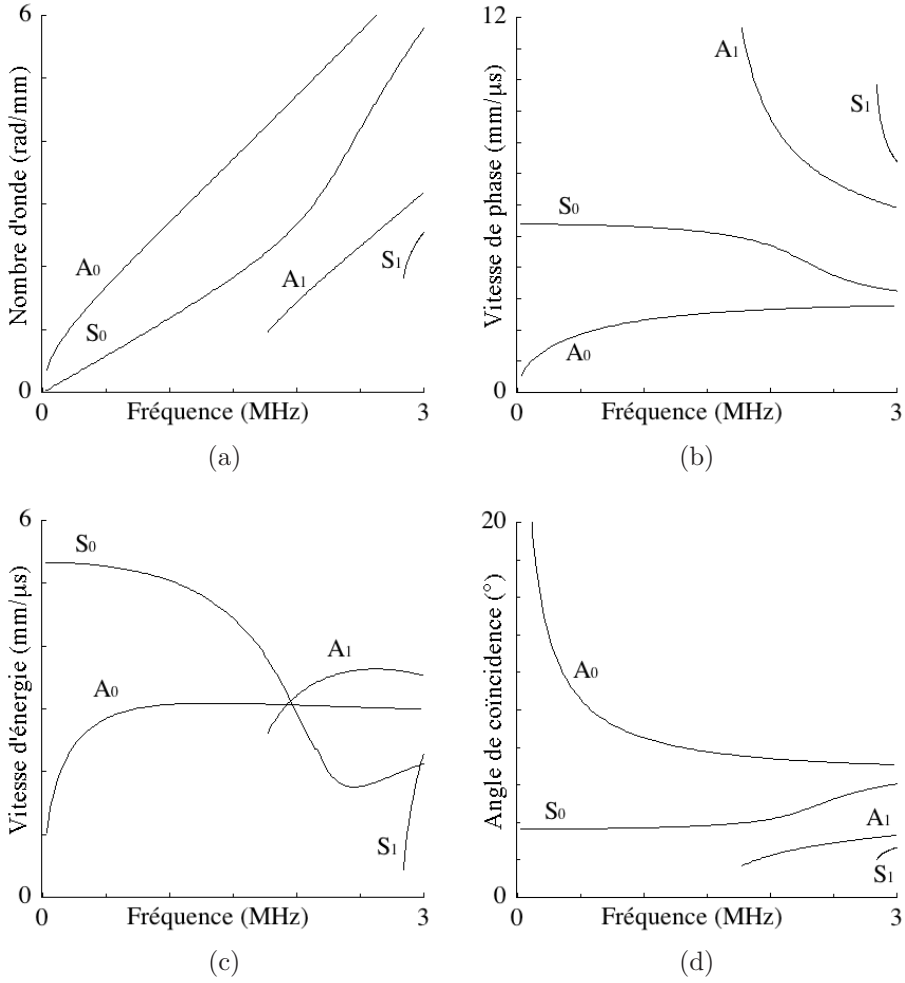


FIGURE 3.2 – Courbes de dispersion (a) en nombre d'onde, (b) en vitesse de phase, (c) en vitesse d'énergie et (d) en angle de coïncidence dans l'air des 4 premiers modes de Lamb se propageant le long d'un aluminium épais de 1 mm.

Par exemple, dans le cas d'un matériau homogène isotrope d'épaisseur h, les composantes 1 et 2 du déplacement s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{rcl} u_1 & = & -Ik_1 \left[\cos(k_{2L}x_2)\cos(k_{2T}h/2) - \dfrac{k_1^2 - k_{2T}^2}{2k_1^2} \cos(k_{2L}h/2)\cos(k_{2T}x_2) \right] e^{-Ik_1x_1} \\ u_2 & = & \left[-k_{2L}\sin(k_{2L}x_2)\cos(k_{2T}h/2) - \dfrac{k_1^2 - k_{2T}^2}{2k_{2T}} \cos(k_{2L}h/2)\sin(k_{2T}x_2) \right] e^{-Ik_1x_1} \end{array} \right. \tag{3.3}$$

pour les ondes symétriques et :

$$\left\{ \begin{array}{rcl} u_1 & = & -Ik_1 \left[\sin(k_{2L}x_2)\sin(k_{2T}h/2) - \dfrac{k_1^2 - k_{2T}^2}{2k_1^2} \sin(k_{2L}h/2)\sin(k_{2T}x_2) \right] e^{-Ik_1x_1} \\ u_2 & = & \left[k_{2L}\cos(k_{2L}x_2)\sin(k_{2T}h/2) + \dfrac{k_1^2 - k_{2T}^2}{2k_{2T}} \sin(k_{2L}h/2)\cos(k_{2T}x_2) \right] e^{-Ik_1x_1} \end{array} \right. \tag{3.4}$$

pour les ondes antisymétriques.

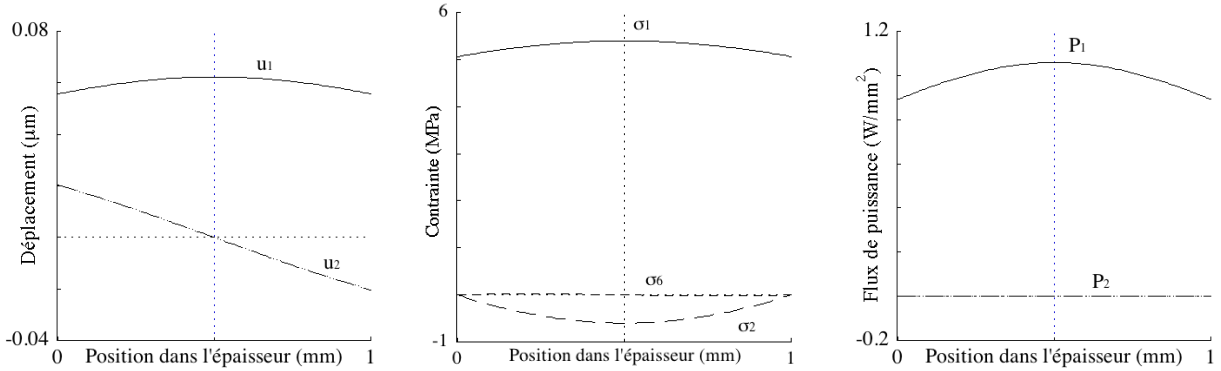


FIGURE 3.3 – Distributions dans l'épaisseur d'une plaque d'aluminium de 1 mm (a) du champ de déplacements, (b) du champ de contraintes et (c) du flux de puissance du mode S_0 à 1 MHz.

Ces distributions renseignent sur la nature du mode (symétrique ou antisymétrique par rapport au plan médian) et apportent de l'information sur la sensibilité du mode aux caractéristiques du milieu étudié [82, 85].

3.2 Etude de sensibilité

3.2.1 La méthode SAFE 1D à deux variables

Principe

Comme présenté page 39, plusieurs méthodes existent pour calculer les solutions de l'équation de dispersion. Lorsque le guide est de type plaque ou cylindre, fait de matériaux homogènes ou pas, isotropes ou anisotropes, les méthodes matricielles telles que la méthode des matrices de transfert ou la méthode des matrices d'impédance de surface permettent d'obtenir les courbes de dispersion ainsi que la distribution des champs de déplacements, de contraintes et du flux de puissance des modes guidés [56, 69, 70]. Mais elles se révèlent inadéquates lorsque le guide est de section arbitraire. C'est principalement pour cette raison que la méthode SAFE (pour« Semi Analytical Finite Element method » en anglais) a été développée [71–75]. Cette technique permet de calculer les courbes de dispersion, les champs de déplacements et de contraintes ainsi que le flux de puissance dans l'épaisseur du guide considéré, que les matériaux soient isotropes ou anisotropes, élastiques ou viscoélastiques.

Dans le cas où le guide d'ondes est de type plaque, comme c'est le cas ici, les courbes de dispersion ainsi que les champs peuvent être calculés, soit par l'intermédiaire de cette méthode, soit par l'intermédiaire d'une méthode matricielle ou encore par les équations de Rayleigh-Lamb (équations 3.1 et 3.2) si le guide est constitué d'un seul matériau. Comme au chapitre précédent, il a été choisi de travailler avec la méthode SAFE. Tout d'abord cette méthode semi analytique permet d'implémenter de manière simple une condition aux limites de type ressorts [44] pour simuler une interface dont les propriétés sont variables. Ensuite, l'avantage majeur d'un modèle basé sur la méthode des éléments finis par rapport à une méthode matricielle est qu'il permet

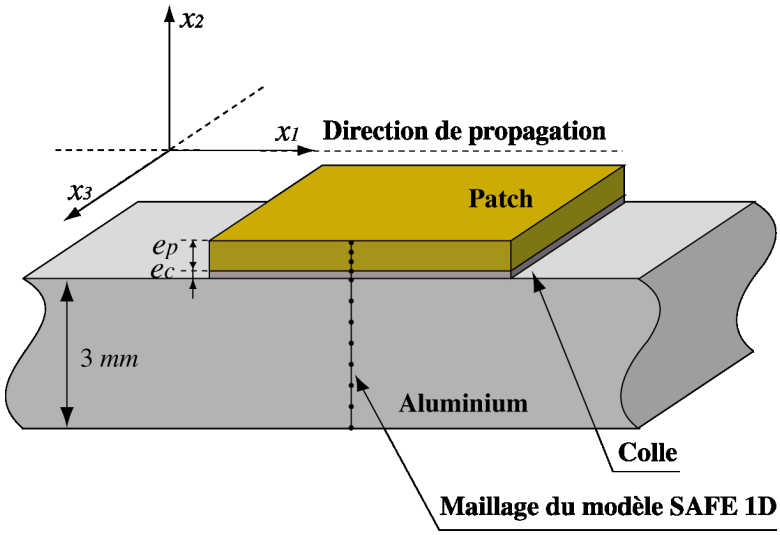


FIGURE 3.4 – Présentation en 3 dimensions d'une structure aluminium / colle / patch avec le maillage SAFE 1D représenté par une série de points dans l'épaisseur.

de modéliser facilement des variations spatiales du milieu, telles que des défauts localisés, ou des gradients de propriétés mécaniques des matériaux constituant le guide d'onde. De cette manière, cette étude pourra, par la suite, être poursuivie en considérant, par exemple, une géométrie complexe de la zone de réparation ou un assemblage collé avec un défaut localisé.

Comme dans le chapitre précédent l'onde plane considérée se propage suivant la direction 1 (cf. figure 3.4), mais cette fois la polarisation des ondes guidées est contenue dans le plan de propagation (onde de type Lamb). Le déplacement u_3 ainsi que les composantes correspondantes de contraintes ne sont donc pas autorisées dans les équations.

Le déplacement **U** s'écrit de la manière suivante :

$$\mathbf{U} = u_i(x_2)e^{I(kx_1-\omega t)} \tag{3.5}$$

où $i = 1{,}2$.

Cette manière d'écrire le déplacement et tout particulièrement le terme de propagation permet de ne considérer que la section droite du guide et donc de travailler avec un modèle à deux variables d'espace, $\boldsymbol{x_1}$ et $\boldsymbol{x_2}$. Dans tout ce travail de thèse les guides sont de type plaque, le problème est invariant par translation suivant l'axe $\boldsymbol{x_3}$ (cf. figure 3.4), un modèle 1D, suivant l'épaisseur du guide, est alors suffisant pour obtenir les courbes de dispersion de l'assemblage grâce à la méthode SAFE. Le principe consiste à résoudre l'équation d'ondes sous forme d'équation aux valeurs propres. Les solutions obtenues sont des couples (f,k) où f est la fréquence et k le nombre d'onde du mode. Tous les modes propagatifs (nombre d'onde à partie imaginaire négligeable), fortement atténués (nombre d'onde dont les parties réelle et imaginaire sont du même ordre de grandeur) et évanescents (nombre d'onde à partie réelle négligeable) existants à la fréquence f font partie de l'ensemble de solutions. Lorsque la géométrie et les propriétés mécaniques du guide sont symétriques par rapport au plan médian, l'ensemble des solutions correspond aux ondes de Lamb, sinon à des ondes qui s'apparentent aux modes de Lamb mais sans être vraiment symétriques ou antisymétriques. Ce sera le cas pour les modes guidés le long du tricouche aluminium / colle / patch étudié par la suite.

Pour des matériaux anisotropes, l'équation d'équilibre dynamique pour un problème aux valeurs propres peut être mise sous la forme suivante [73] :

$$C_{i2j2}\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_2^2} + I(C_{i1j2} + C_{i2j1})\frac{\partial (ku_j)}{\partial x_2} - kC_{i1j1}(ku_j) + \rho\omega^2\delta_{ij}u_j = 0 \tag{3.6}$$

pour $i = 1{,}2$ et avec une sommation sur l'indice $j = 1{,}2$.
δ_{ij} représente de symbole de Kronecker. Sur les frontières du domaine, la contrainte $\mathbf{T} = \bar{\bar{\boldsymbol{\sigma}}} \cdot \mathbf{n}$ s'écrit :

$$T_i = C_{i2j2}\frac{\partial u_j}{\partial x_2}n_2 + IC_{i2j1}(ku_j)n_2 \tag{3.7}$$

pour $i = 1{,}2$ et avec sommation sur l'indice $j = 1{,}2$.

Comme dans le chapitre précédent, les deux surfaces extérieures du domaine sont libre de contraintes, le vecteur $\mathbf{T}$ y est donc nul. En ce qui concerne l'interface aluminium / colle, elle est, comme précédemment, considérée comme une zone critique. Ses propriétés adhésives sont modélisées par l'intermédiaire de deux densités surfaciques de ressorts [17, 18, 44, 45, 78, 79]. Comme présenté au chapitre 2, les contraintes sont continues tandis qu'un saut de déplacement est autorisé :

$$T_1 = k_T \Delta u_1 \tag{3.8}$$
$$T_2 = k_L \Delta u_2 \tag{3.9}$$

où k_L et k_T (N/m^3) représentent deux densités surfaciques de ressorts en traction/compression et en cisaillement, respectivement, uniformes sur l'interface considérée, et où $\Delta u_{1,2} = \pm|u_{1,2}^{\text{adhésif}} - u_{1,2}^{\text{aluminium}}|$ désigne le saut de déplacement autorisé, dont le signe dépend du milieu à partir duquel cette condition est écrite. Par contre, les contraintes et les déplacements sont continus au niveau de l'interface patch / colle.

Implémentation COMSOL

Le formalisme utilisé par le logiciel COMOL pour résoudre un problème aux valeurs propres est le suivant :

$$\begin{cases} \nabla \cdot (c\nabla u + \alpha u - \gamma) - au - \beta \cdot \nabla u + d_a \lambda u - e_a \lambda^2 u = 0 & \text{dans } \Omega \\ \mathbf{n} \cdot (c\nabla u + \alpha u - \gamma) + qu = g & \text{sur } \partial\Omega \\ hu = r & \text{sur } \partial\Omega \end{cases} \tag{3.10}$$

où c,α,a,β,d_a,e_a,q et g peuvent être des coefficients scalaires, vectoriels ou matriciels, où u représente le vecteur déplacement et λ la valeur propre recherchée. Si c,γ et α sont uniformes (c'est à dire indépendants des variables d'espace), alors le système 3.10 s'écrit également de la manière suivante :

$$\begin{cases} c_{ijkl}\dfrac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l} + (\alpha_{ijk} - \beta_{ijk})\dfrac{\partial u_j}{\partial x_k} - a_{ij}u_j + \lambda d_{ij}u_j - \lambda^2 e_{ij}u_j = 0 & \text{dans } \Omega \\ c_{ijkl}\dfrac{\partial u_j}{\partial x_l}n_k + \alpha_{ijk}u_j n_k - \gamma_{ik}n_k + q_{ij}u_j = g_i & \text{sur } \partial\Omega \\ h_{ij}u_j = r_i & \text{sur } \partial\Omega \end{cases} \tag{3.11}$$

où $i = 1{,}2$ et avec la règle de sommation implicite sur les indices j, k, l.

En raison de l'expression du vecteur contrainte défini par la relation 3.7, il est nécessaire de définir la variable u sous COMSOL comme le vecteur $(u_1,u_2,v_1,v_2)^T$ avec $v_i = \lambda u_i$ pour $i = 1{,}2$. De cette manière en identifiant les équations 3.6 et 3.7 au système 3.11 il est finalement possible d'établir les expressions suivantes pour les différents coefficients de l'équation 3.10 :

$$c = \begin{pmatrix} C_{66} & C_{26} & 0 & 0 \\ C_{26} & C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \mathrm{a} = \begin{pmatrix} -\rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho\omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\rho\omega^2 \end{pmatrix}$$

$$d_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -C_{11} & -C_{16} \\ 0 & 0 & -C_{16} & -C_{66} \\ -\rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho\omega^2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \mathrm{e_a} = \gamma = 0$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -IC_{16} & -IC_{66} \\ 0 & 0 & -IC_{12} & -IC_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \beta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & IC_{16} & IC_{12} \\ 0 & 0 & IC_{66} & IC_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Les conditions aux limites sont modélisées par l'intermédiaire d'une condition de type Neumann (seconde équation du système 3.11). Au niveau de l'interface patch / colle cette condition aux limites est écrite de manière à assurer la continuité des déplacements et des contraintes entre les deux milieux. Les surfaces extérieures de l'empilement sont libres de contraintes, les termes q et g de la seconde équation du système 3.11 y sont égaux à zéro. Enfin la condition de Neumann définie au niveau de l'interface aluminium / colle est écrite de manière à ce que les contraintes soient continues et qu'un saut de déplacement soit autorisé. Dans ce cas q est nul et on a :

$$\begin{aligned} g_1 &= T_1 \\ g_2 &= T_2 \\ g_3 &= 0 \\ g_4 &= 0 \end{aligned}$$

où T_1 et T_2 sont définis par les équations 3.8 et 3.9, respectivement. A noter les dimensions 1×4 ou 4×4 des vecteurs et matrices dues aux quatre variables u_1, u_2, v_1 et v_2 initialement définies.

Classement des modes

Les calculs sont effectués à une fréquence f donnée, à laquelle le logiciel permet d'obtenir un nombre K (nombre suffisamment grand fixé par l'utilisateur) de nombres d'onde k, correspondant à l'ensemble des ondes propagatives et évanescentes, ainsi qu'à un nombre fini d'ondes

non propagatives, existantes dans le guide. Avant de pouvoir tracer les courbes de dispersion il est donc nécessaire de trier les couples solutions (f,k). Ce procédé est réalisé par l'intermédiaire du logiciel Matlab. L'objectif de cette routine de post traitement est de regrouper entre eux les modes propagatifs, les modes non propagatifs et les modes évanescents. Ensuite au sein de chaque famille, les ondes de Lamb seront classées en modes antisymétriques et symétriques le cas échéant, c'est à dire lorsque le guide est symétrique par rapport à son plan médian.

Les différentes étapes de l'algorithme peuvent être synthétisées de la sorte :

1. *Importation des solutions calculées sous COMSOL.* Pour chaque fréquence cette liste regroupe les nombres d'onde dont la partie réelle est positive (propagation dans le sens des x_1 positifs) et négative (propagation dans le sens des x_1 négatifs). Pour éviter toute répétition seuls les k dont la partie réelle est positive sont retenus.
2. *Tri des modes propagatifs.* Ces modes sont ceux dont le nombre d'onde est réel (cas des matériaux élastiques) ou à faible partie imaginaire (cas des matériaux viscoélastiques). Lorsque le guide est symétrique par rapport au plan médian, il est possible de les séparer :
   – en modes antisymétriques, ceux pour lesquels le déplacement normal u_2 est identique aux surfaces inférieure et supérieure du guide.
   – en modes symétriques, tous les modes restants de la famille considérée.
3. *Tri des modes évanescents.* Ces modes sont ceux dont la partie réelle du nombre d'onde est négligeable devant sa partie imaginaire. L'algorithme procède ensuite de la même manière que précédemment.
4. *Tri des modes fortement atténués.* Ces modes sont ceux dont le nombre d'onde est complexe avec une partie réelle et imaginaire du même ordre de grandeur. Encore une fois le processus est le même pour séparer les modes symétriques et antisymétriques.

Une fois cette classification effectuée il est possible de calculer, tracer ou exporter le nombre d'onde, l'atténuation, la vitesse de phase, la vitesse d'énergie, ainsi que la distribution dans l'épaisseur du guide du champ de déplacement, de contraintes ou du flux de puissance de chacun des modes dont l'étude fait l'objet.

Une mise en équation plus générale du problème, c'est à dire pour laquelle les trois composantes du déplacement sont autorisées dans les équations, est donnée en annexe C.)

3.2.2 Courbes de dispersion des ondes de Lamb guidées par l'assemblage collé

L'objectif de cette première partie de l'étude est de déterminer pour quel mode guidé et dans quelle zone de fréquences il est possible de quantifier la qualité d'un joint de colle (propriétés cohésives) ou de l'interface aluminium / colle (propriétés adhésives) sans être perturbé par des paramètres extérieurs comme la masse volumique et l'épaisseur des trois matériaux de l'assemblage ou encore les propriétés (visco)élastiques des substrats.

Les assemblages dont il sera question sont constitués d'une plaque de 3 mm d'aluminium sur laquelle est collé, soit un patch en plexiglas de 1 mm, soit un patch en carbone époxy épais de 1,2 mm. Dans tous les calculs, l'adhésif est épais de 0,2 mm et ses modules de viscoélasticité sont ceux présentés dans le tableau 1.10 page 34. Comme expliqué dans le chapitre 2, l'interface aluminium / colle peut être modélisée soit grâce à une condition aux limites de type ressorts,

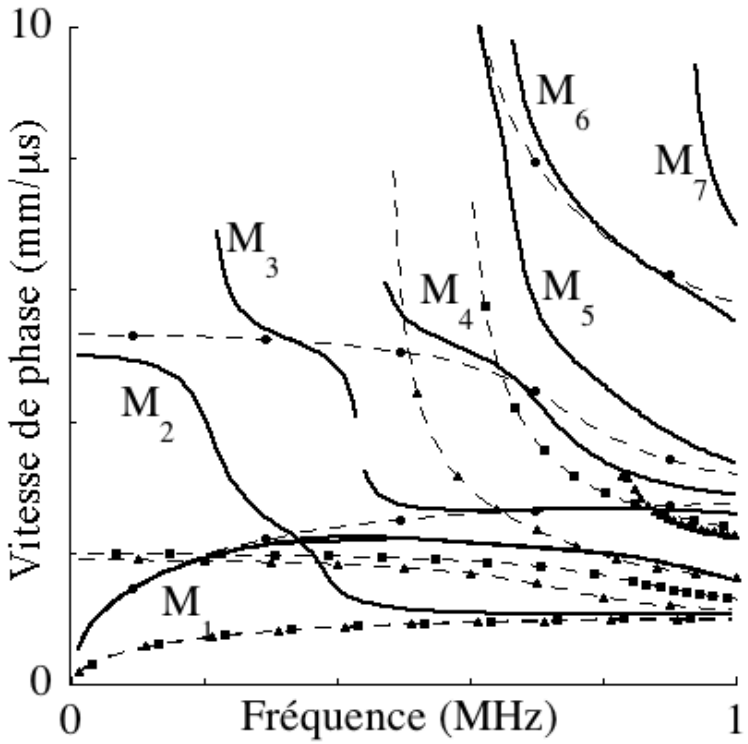
soit par une fine couche de solide [44,79], d'épaisseur $h_{\text{interface}}$, de masse volumique $\rho_{\text{interface}}$ et de modules d'élasticité $C_{11} = k_L h_{\text{interface}}$ et $C_{66} = k_T h_{\text{interface}}$. Rappelons que l'inconvénient de ce type de modélisation reste son coût en terme de degrés de liberté du maillage de la simulation numérique. Si l'épaisseur de cette fine couche solide est égale à 10 μm, comme cela a été fait dans la référence [79], et que ce sont les propriétés élastiques de la colle, présentées dans le tableau 1.10 page 34 qui lui sont attribuées, alors les densités surfaciques de ressorts k_L^{nom} et k_T^{nom} correspondantes sont égales à :

$$k_L^{nom} = 5{,}6 \cdot 10^{14}\ N/m^3$$
$$k_T^{nom} = 5{,}3 \cdot 10^{13}\ N/m^3$$

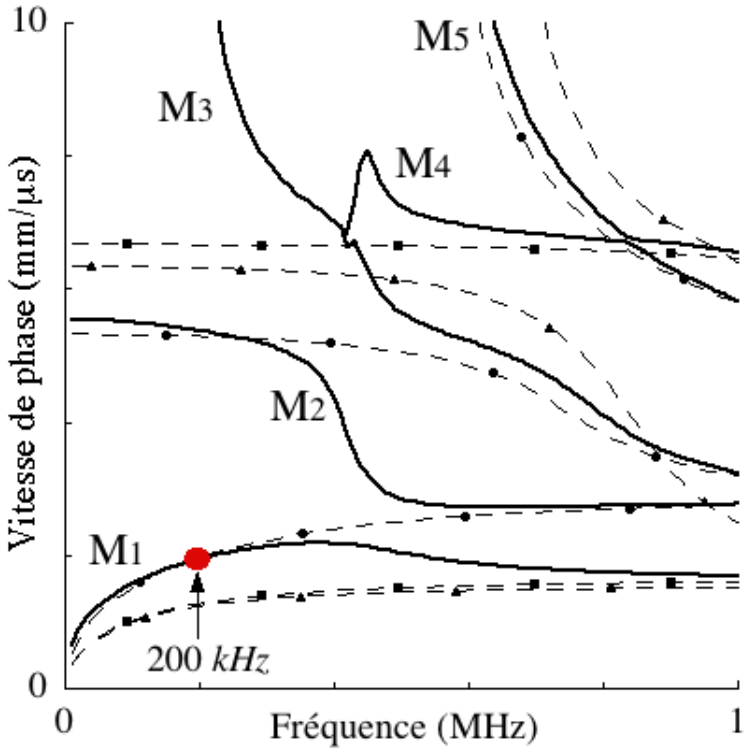
Par la suite les valeurs de k_L et k_T seront prises égales à un pourcentage (de 10 à 100%) de ces valeurs nominales afin d'assurer un couplage de qualité variable entre l'aluminium et la colle.

Contrairement à l'étude de sensibilité des ondes SH où seules les variations du C_{44} ou du C_{55} influaient sur les courbes de dispersion, pour les ondes de type Lamb ces courbes sont sensibles aux variations de 4 modules de viscoélasticité (C_{11}, C_{22}, C_{12} et C_{66}) pour un matériau orthotrope ou de 2 modules (C_{11} et C_{66}) pour un matériau isotrope. Travailler avec un patch en plexiglas permet donc de réduire le nombre de paramètres extérieurs dont une variation peut se répercuter sur les courbes de dispersion.

Les figures 3.5(a) et (b) représentent l'évolution de la vitesse de phase des 7 et 5 premiers modes de type Lamb se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas et aluminium / colle / carbone époxy respectivement (l'interface aluminium / colle assurant la continuité parfaite des déplacements et des contraintes) ainsi que celles d'une plaque libre d'aluminium, d'un patch libre et d'un bicouche colle / patch (l'interface aluminium / colle permettant cette fois une déconnexion totale de l'aluminium et du bicouche). Comme lors de l'étude des ondes SH, la superposition des courbes de dispersion de l'assemblage collé avec celles des substrats seuls permet d'identifier le matériau de l'assemblage au sein duquel la propagation des ondes guidées est dominante le long du multicouche. Par exemple à 200 kHz, la vitesse de phase du mode M_1 d'un assemblage aluminium / colle / carbone époxy est similaire à celle du mode A_0 d'une plaque d'aluminium de 3 mm. La distribution des déplacements et du flux de puissance dans l'épaisseur de l'assemblage est représentée sur la figure 3.6. Les traits pleins et pointillés représentent respectivement les distributions dans l'épaisseur de l'assemblage collé et dans l'épaisseur d'une plaque d'aluminium seule des champs, normalisés en puissance, de déplacements et du flux de puissance. Cette figure montre que, dans la partie aluminium du multicouche, la forme, et dans une moindre mesure pour le flux de puissance, l'amplitude des champs de l'assemblage collé sont très proches de ceux d'un mode A_0 de l'aluminium seul. Ces profils, de part leur forte correspondance, montrent bien qu'à cette fréquence c'est la partie aluminium de l'assemblage qui joue le rôle le plus important dans la propagation du mode guidé M_1 [82]. A noter que c'est aussi le cas pour le mode M_2 de l'assemblage avec patch en plexiglas, ou pour le mode M_3 de l'assemblage avec patch en composite, qui est fortement couplé avec le mode S_0 de l'aluminium seul aux fréquences supérieures à 0,8 MHz. La figure 3.5 montre également que le mode M_2 de l'assemblage avec patch en composite et le mode M_3 de l'assemblage avec patch en plexiglas sont fortement couplés au mode A_0 du bicouche patch / colle (et du patch seul) à ces mêmes fréquences. Au sein de telles zones fréquentielles, ce sont les propriétés de l'aluminium (ou du patch selon le cas) qui jouent un rôle majeur, c'est

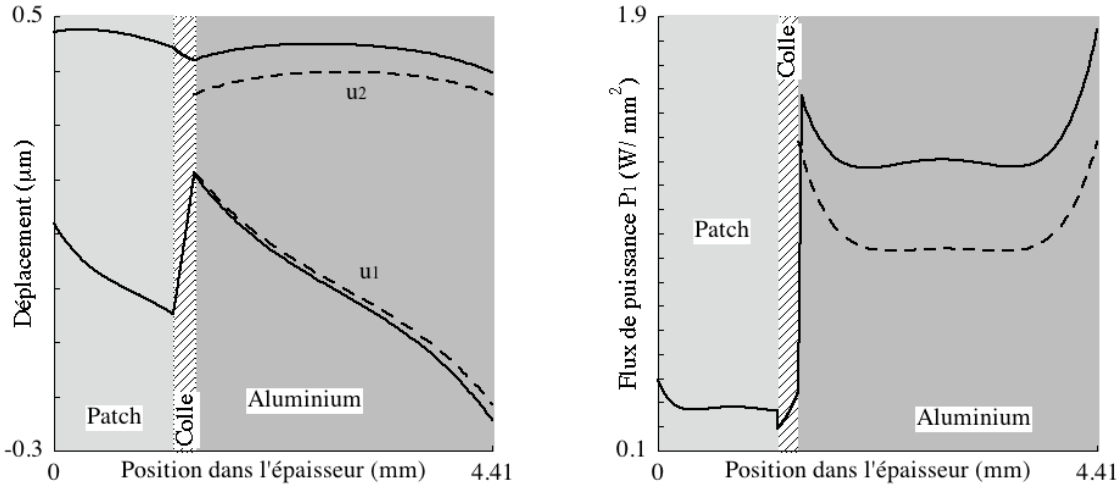


(a)



(b)

FIGURE 3.5 – Vitesse de phase des modes guidés de type Lamb se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch (——) ; d'une plaque d'aluminium seule (– • –) ; d'un patch seul (–■–) et d'un bicouche colle / patch (–▲–) (a) avec patch en plexiglas et (b) avec patch en carbone époxy.



(a) (b)

FIGURE 3.6 – Distribution dans l'épaisseur (a) des champs de déplacement et (b) du flux de puissance du mode M_1 d'un assemblage collé avec patch en composite (—-) et du mode A_0 d'une plaque d'aluminium ($- - -$) à 200 kHz.

à dire que toute modification des propriétés mécaniques ou géométriques de ce substrat risque de fortement influencer les courbes de dispersion de l'assemblage collé. Mais, si les courbes de dispersion restent plus sensibles aux propriétés, soit de la colle, soit de l'interface plutôt qu'à celles des substrats, alors le potentiel du (ou des) mode(s) en question pour évaluer la qualité du collage sera fort.

Les courbes de dispersion présentées sur la figure 3.5 permettent également de vérifier que les domaines de sensibilité des ondes de Lamb aux propriétés du joint de colle restent *a priori* les mêmes pour les deux types d'assemblage. Ces zones correspondent aux domaines de moyenne à forte dispersion des modes guidés de l'assemblage. C'est par exemple le cas du domaine de fréquences voisin de la fréquence de coupure du mode M_3. Le domaine de fréquences compris entre 0,3 et 0,6 MHz répond également à ce critère. Les vitesses de phase des modes M_2 et M_3, et dans une moindre mesure celle du mode M_1, de ces assemblages y semblent suffisamment différentes de celles des modes se propageant le long des substrats pour espérer qu'elles soient d'avantage sensibles aux propriétés de la colle qu'à celles des substrats.

Sensibilité aux densités et aux épaisseurs

Dans un premier temps ce sont les erreurs de mesures commises sur les différentes épaisseurs ($\pm 5\%$ pour les substrats et $\pm 15\%$ pour la couche d'adhésif) et densités ($\pm 3\%$) qui ont été prises en compte dans le calcul des courbes de dispersion. Les résultats concernant la vitesse de phase des modes guidés se propageant le long d'un assemblage avec patch en plexiglas sont regroupés sur la figure 3.7. La colonne de gauche correspond à l'influence d'une variation d'épaisseur et la colonne de droite à une variation de masse volumique des différents matériaux. Sur la première ligne ce sont les propriétés du patch qui ont été modifiées, sur la seconde celles du joint de colle et sur la troisième celles de la plaque d'aluminium.

Une variation de $\pm 3\%$ de la masse volumique de n'importe lequel des matériaux considérés

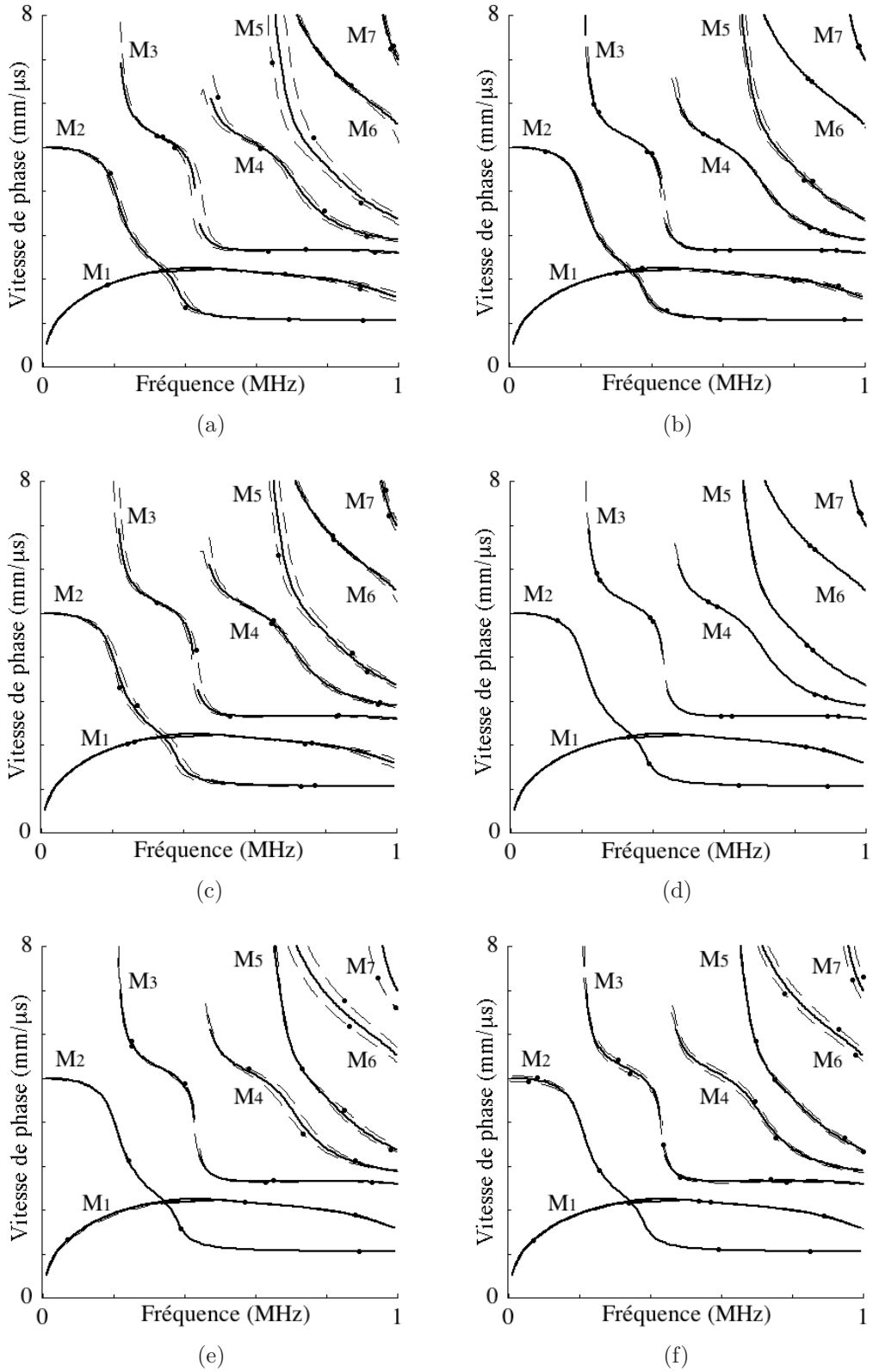


FIGURE 3.7 – Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des 7 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage collé avec patch en plexiglas à un changement de $\pm x\%$ de l'épaisseur (colonne de gauche) et de $\pm 3\%$ de la densité (colonne de droite) du patch ($x = 5$) (a) et (b), de la colle ($x = 15$) (c) et (d) et de l'aluminium ($x = 5$) (e) et (f). Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (——) et pour des propriétés modifiées ($- \bullet -$).

influence peu les vitesses de phase des modes M_1, M_2 et M_3. La vitesse de phase du mode M_4 est modifiée de 5%, et celles des modes M_6 et M_7 de 10%, par une variation de $\pm 3\%$ de la masse volumique du substrat d'aluminium. Le mode M_5 est, quant à lui, affecté par une variation de $\pm 3\%$ de la masse volumique du patch. Sa vitesse de phase varie alors de 7% au plus.

La figure 3.7(e) montre qu'une variation de $\pm 5\%$ de l'épaisseur de l'aluminium entraîne une variation du même ordre de grandeur des fréquences de coupure des modes M_6 et M_7. Une variation d'épaisseur du patch, ou dans une moindre mesure de la colle, affecte le mode M_5. La fréquence de coupure de ce mode est ainsi nettement décalée sous l'effet d'un petit changement de ces épaisseurs. La vitesse de phase du mode M_4 varie peu sous l'influence d'une variation d'épaisseur de chacun des matériaux. Cette dernière est au plus de l'ordre de $\pm 3\%$. Les modes M_2 et M_3 voient leur vitesse de phase varier de $\pm 5\%$ lorsque l'épaisseur du patch ou de la colle varie de $\pm 5\%$ ou $\pm 15\%$, respectivement.

En conclusion, les modes 5, 6 et 7 semblent inadaptés pour caractériser l'état cohésif et / ou adhésif du joint de colle d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas car ils sont trop sensibles à des changements de masse volumique ou d'épaisseur des substrats. Les modes 2, 3 et 4 feront l'objet d'une étude plus approfondie, même si leurs vitesses de phase sont influencées de l'ordre de $\pm 5\%$ par des variations d'épaisseurs des différents matériaux. Pour cet assemblage aluminium / colle / plexiglas, seule la vitesse de phase du mode M_1 est très peu modifiée lorsque soit l'épaisseur, soit la masse volumique des matériaux varie.

En ce qui concerne l'assemblage aluminium/colle/composite (cf. figure 3.8), quel que soit le matériau considéré, les modes 1 et 2 sont peu perturbés ($\leq 5\%$) par une variation soit de l'épaisseur soit de la densité. La vitesse de phase du mode 3 est perturbée de 6% approximativement par une variation de 5% de l'épaisseur de l'aluminium au delà de 0,6 MHz. La vitesse de phase du mode 4, aux fréquences supérieures à 0,8 MHz, varie de 10% lorsque l'épaisseur du substrat d'aluminium varie de $\pm 5\%$. C'est également le cas de la vitesse de phase du mode 5 aux fréquences inférieures à 0,8 MHz (voir zoom de la figure 3.8(e) en annexe D). En fait ces zones de sensibilité de la vitesse de phase à une variation de l'épaisseur ou de la masse volumique de l'aluminium coïncident avec les bandes de fréquences pour lesquelles les vitesses de phase de l'assemblage sont proches de celles d'une plaque d'aluminium de 3 mm prise isolément.

Ce sont donc les modes 1, 2 et 3 qui, du fait de leur faible sensibilité à une variation de $\pm 5\%$ de l'épaisseur des substrats, de $\pm 15\%$ de l'épaisseur du joint de colle ou de $\pm 3\%$ de la masse volumique de l'un ou l'autre des matériaux, seront retenus pour la suite de l'étude.

La sensibilité à la masse volumique et à l'épaisseur des différents matériaux de l'atténuation et de la vitesse d'énergie des cinq premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / patch composite a également été examinée. Les résultats sont présentés en annexe E. Il en ressort que seuls les modes 1 et 2 ainsi que la fréquence de coupure du mode 3 sont suffisamment peu sensibles aux propriétés des substrats pour faire l'objet d'investigations plus approfondies, en ce qui concerne leur usage pour caractériser un joint de colle.

Dans la suite de cette étude de sensibilité ce sont les résultats concernant l'assemblage avec patch en composite qui sont présentés. Une étude similaire a été réalisée pour un assemblage aluminium / colle / plexiglas. Les résultats sont présentés en annexe F.

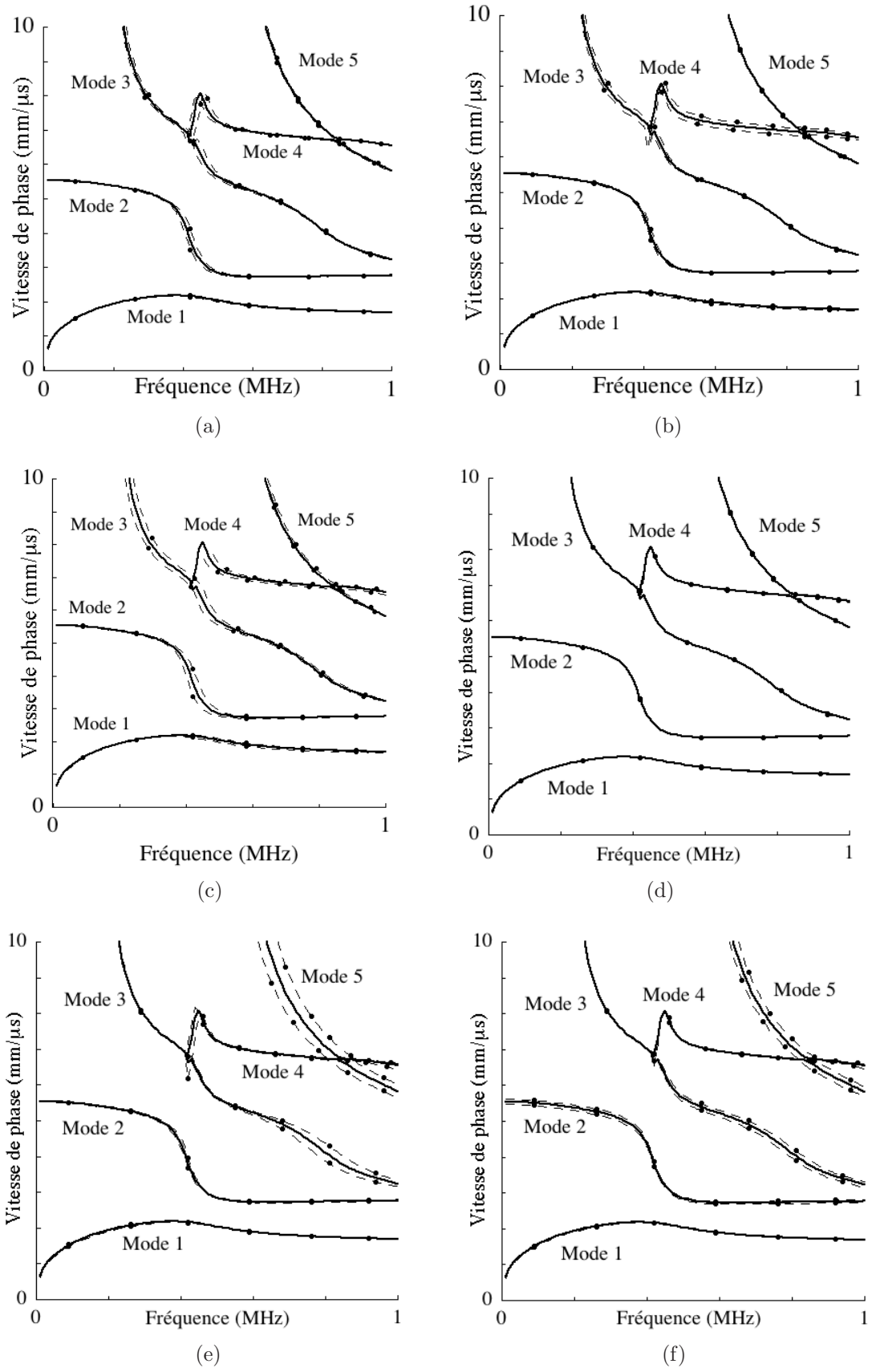


FIGURE 3.8 – Même légende que la figure 3.7 pour la vitesse de phase des modes guidés se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / composite.

Sensibilité aux propriétés (visco)élastiques des substrats, de la colle et de l'interface

Comme précisé dans le chapitre 1, les modules d'élasticité de l'aluminium et les modules de viscoélasticité du patch composite ont été évalués à ±5% et ±10% près, respectivement. Ce sont ces intervalles de confiance, obtenus lors de la caractérisation des matériaux, qui vont être pris en compte ici, afin de mettre en évidence des zones de faible sensibilité à ces paramètres. Dans cette étude les valeurs des modules de viscoélasticité (c'est à dire la partie réelle et la partie imaginaire des C_{ij}) du carbone époxy varieront de ±10% autour de leur valeur nominale. En procédant de la sorte, l'erreur de mesure commise sur la partie imaginaire du module est sous estimée (l'intervalle de confiance a été estimé à ±15% pour les C''_{ij} du carbone époxy). Néanmoins cette manière de faire n'affecte aucunement les conclusions concernant les vitesses, mais pas celles qui concernent l'atténuation des modes guidés. Si une zone de sensibilité est retenue sur les courbes d'atténuation, ce point sera donc pris en compte.

Comme le montre la figure 3.9(a) et (b), une variation des modules de viscoélasticité des substrats au sein de leur intervalle de confiance influence peu (moins de 5%) les valeurs des vitesses des modes 1 et 2. La vitesse de phase du mode 3 varie quant à elle de ±5 à ±6% pour une variation de ±5 ou ±10% des C_{ij} de l'aluminium ou du composite, respectivement. Par contre la fréquence de coupure de ce mode est peu sensible aux variations des propriétés (visco)élastiques des substrats. Les modes 1 et 2 ainsi que la fréquence de coupure du mode 3 sont donc suffisamment peu sensibles aux propriétés des substrats pour pouvoir envisager une évaluation de la qualité de l'adhésif ou de l'interface aluminium / colle par l'intermédiaire d'une mesure de vitesse de phase. Néanmoins, la figure 3.9(c) montre que, même si ces modes guidés sont sensibles à une chute des propriétés de la colle, la vitesse de phase des modes 1 et 2 varie faiblement. En effet, une chute de 50% des C_{ij} de l'adhésif n'affecte leurs vitesses de phase que de 5% au plus. Une telle sensibilité s'avère insuffisante pour caractériser de manière quantitative la qualité d'un joint de colle dans la mesure où elle permet d'identifier uniquement les assemblages dont les adhésifs sont fortement, voire très fortement, dégradés, mais cela peut être intéressant pour détecter des collages très endommagés. La fréquence de coupure du mode 3 est une meilleure candidate pour des mesures plus fines des propriétés élastiques du joint de colle. Ainsi une chute de 50% des modules de viscoélasticité de l'adhésif entraîne un décalage de 22% de la fréquence de coupure de ce mode guidé. Ce dernier peut donc être exploité pour réaliser des mesures ultrasonores du même type que celles mises en place pour le mode SH_1 et SH_0.

Ce résultat a été obtenu en faisant varier à la fois le C_{11} et le C_{66} du joint de colle. Si une chute de 50% est imposée uniquement au C_{11} puis uniquement au C_{66}, alors il apparaît que seul le module de Coulomb (soit le C_{66}) a une influence sur la fréquence de coupure du mode M_3. Or, le C'_{66} a déjà pu être évalué par l'intermédiaire des mesures de vitesses de phase des modes SH_1 et SH_0, au chapitre précédent. Il est donc nécessaire de trouver un autre paramètre sensible au C_{11} du joint de colle et / ou aux k_L et k_T de l'interface aluminium / colle.

Comme les vitesses de phase des 5 premiers modes de type Lamb pouvant se propager le long de l'assemblage collé n'ont pas permis de mettre en évidence un domaine de fréquences au sein duquel il aurait été possible de caractériser intégralement (C_{11} et C_{66}) la qualité du joint de colle, c'est l'atténuation qui va être examinée. La figure 3.10(a), (b) et (c) montre que l'atténuation de ces trois modes guidés est bien évidemment très peu sensible à une variation de

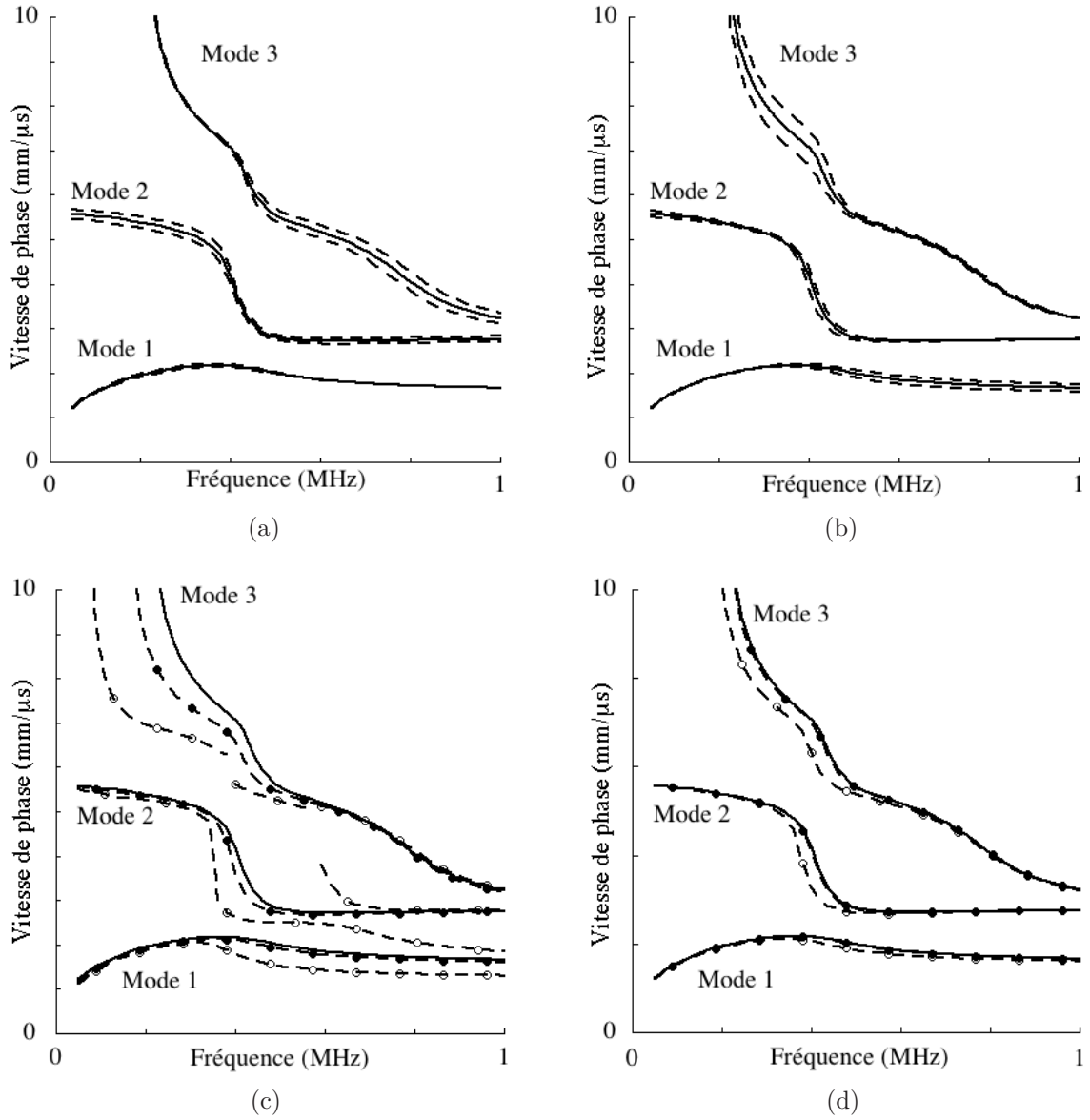


FIGURE 3.9 – Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des 3 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / composite à une variation de (a) ±5% (− − −) des C_{ij} de l'aluminium ; (b) ±10% (− − −) des C_{ij} du patch composite ; à une chute de 50% (− • −) et 90% (− ∘ −) (c) des C_{ij} de la couche de colle ou (d) des k_L et k_T de l'interface. (——) Vitesses de phase d'un assemblage aux propriétés nominales.

±5% des modules d'élasticité de l'aluminium. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où ce matériau est considéré comme purement élastique. Ce n'est pas le cas du patch composite et lorsque l'ensemble de ses modules complexes C_{ij} est modifié de ±10%, cela entraîne une variation de ±10%, ±5% et ±15% de l'atténuation des modes 1, 2 et 3, respectivement. Néanmoins cette sensibilité reste inférieure à celle qu'il est possible d'observer lorsque les propriétés de l'adhésif chutent de 20%, ou plus, pour des fréquences supérieures à 0,35 MHz et inférieures à 0,55 MHz pour le mode M_1 et entre 0,35 et 0,45 MHz pour les modes M_2 et M_3. A noter que les atténuations de ces modes guidés M_1, M_2 et M_3 peuvent prendre des valeurs assez élevées.

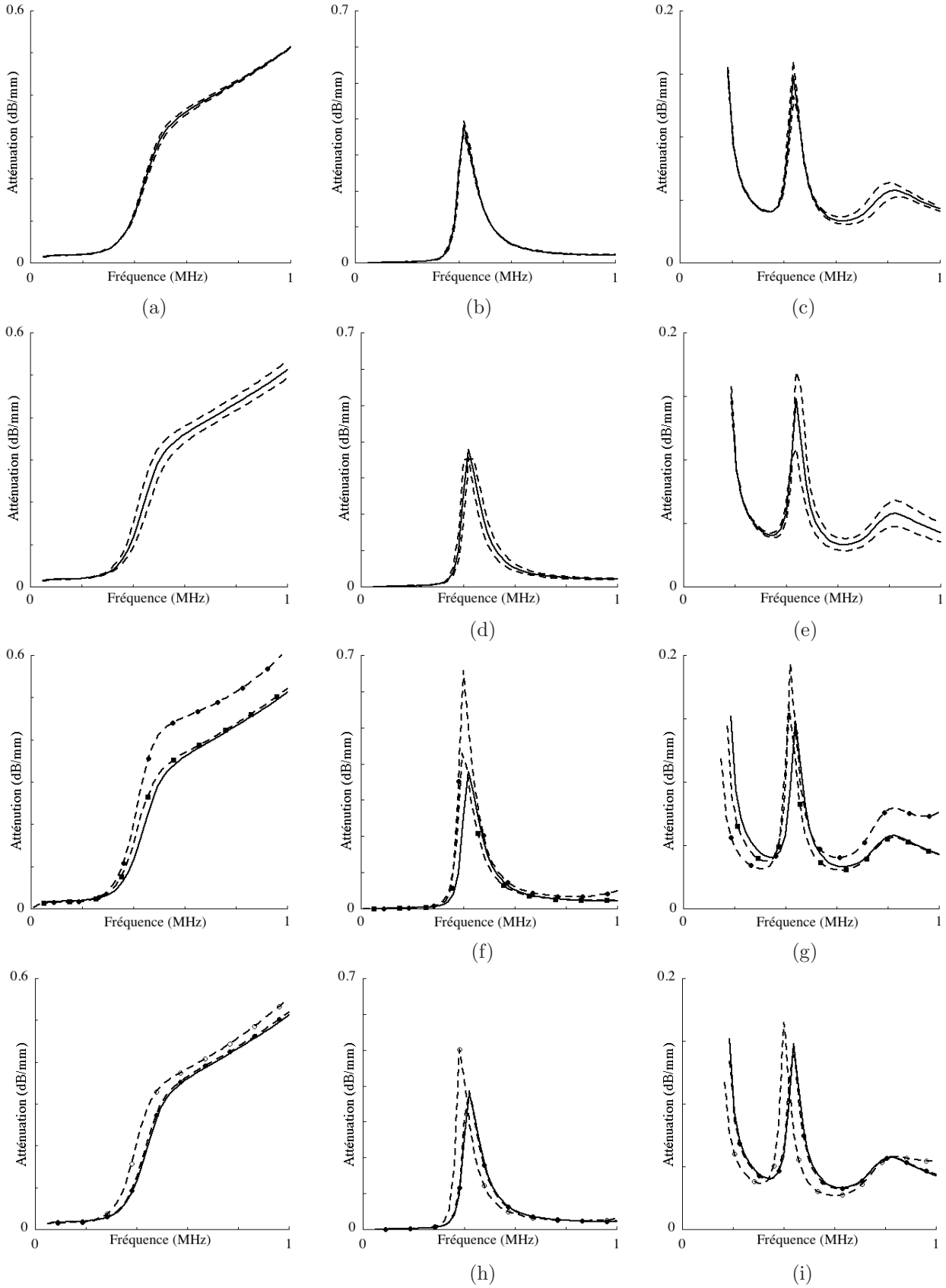


FIGURE 3.10 – Prédictions numériques de la sensibilité de l'atténuation des modes M_1 (gauche), M_2 (milieu) et M_3 (droite) se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / composite à une variation de $\pm 5\%$ ($- - -$) des C_{ij} de l'aluminium (1re ligne) ; $\pm 10\%$ ($- - -$) des C_{ij} du patch composite (2e ligne) ; à une chute de -20% ($-\blacksquare-$) et -50% ($- \bullet -$) des C_{ij} de la couche de colle (3e ligne) et de -50% ($- \bullet -$) et -90% ($- \circ -$) des k_L et k_T de l'interface (4e ligne). (———) Atténuations d'un assemblage aux propriétés nominales.

L'onde guidée recherchée doit pouvoir se propager sur 100 mm (longueur du patch) et encore posséder suffisamment d'énergie pour pouvoir être mesurée. Par exemple, si l'atténuation de cette onde est égale à 0,6 dB/mm, le rapport des amplitudes des déplacements mesurés en entrée et en sortie de patch sera égal à 1‰. Pour une atténuation de 0,4 dB/mm ou 0,3 dB/mm ce rapport s'élève à 1% ou 3%, respectivement. Dans le cadre de mesures expérimentales de vitesses de phase effectuées dans le chapitre précédent, le rapport signal sur bruit était de l'ordre de 100 pour un signal moyenné. Si l'atténuation de l'onde considérée dépasse 0,4 dB/mm, le signal que l'on souhaite ne pourra vraisemblablement pas être distingué du bruit. Or l'atténuation du mode M_1, calculée avec des valeurs nominales des C_{ij} de la colle, dépasse les 3,5 dB/cm pour les fréquences supérieures à 0,6 MHz rendant ainsi sa détection difficile. Le mode M_2 est, quant à lui, plus sensible aux propriétés de la colle qu'à celles des substrats entre 0,35 et 0,45 MHz. Mais lorsque les C_{ij} du joint de colle chutent de plus de 20%, le pic d'atténuation de ce mode dépasse les 3,5 dB/cm, rendant ainsi la détection de ce mode difficile pour certaines fréquences de ce domaine. Enfin, l'atténuation du mode M_3 reste relativement faible (c'est à dire inférieure au seuil de 0,4 dB/mm) dans tout le domaine de fréquences considéré. Néanmoins, au delà de 0,45 MHz l'atténuation de ce mode est plus sensible aux propriétés mécaniques du patch composite qu'à celles de l'adhésif.

Il est donc envisageable d'utiliser ces modes pour évaluer la qualité du joint de colle mais seulement entre 0,35 et 0,55 MHz, puisque ce domaine de fréquences parait être un bon compromis entre la sensibilité de leurs atténuations respectives aux propriétés du collage et la possibilité de détection de ces modes après 10 cm de propagation le long de la zone réparée.

Comme précisé au début de cette étude de sensibilité, lorsque les courbes de dispersion sont calculées c'est l'ensemble des C_{ij} qui varie de p% (où p dépend du matériau considéré et est égal à ± 10 pour le patch), mais l'intervalle de confiance évalué lors de la caractérisation des C''_{ij} du carbone époxy n'était pas de ± 10% mais de ± 15%. Une variation de ± 15% des parties imaginaires seules, puis de ± 10% des parties réelles seules, des modules de viscoélasticité du patch composite a donc été considérée afin de déterminer laquelle perturbait le plus les courbes d'atténuation. Il s'avère que ce sont effectivement les parties réelles des C_{ij} du composite qui influencent le plus les valeurs prises par les atténuations de ces trois modes guidés. L'erreur commise en sous estimant l'intervalle de confiance des C''_{ij} du composite dans les calculs précédents est donc négligeable et ne modifie pas la conclusion précédente concernant la possibilité de travailler avec l'atténuation du mode guidé M_1 dans le domaine de fréquences $[0{,}35 - 0{,}55]$ MHz, ainsi qu'avec celles des modes guidés M_2 et M_3 entre 0,35 et 0,45 MHz, pour caractériser les propriétés élastiques du collage.

En ce qui concerne la sensibilité de ces modes guidés aux propriétés de l'interface, elle se révèle inférieure à celle qu'il est possible d'observer pour des variations des propriétés des substrats ou de la colle. Finalement, que ce soit pour l'assemblage avec patch en composite ou avec patch en plexiglas (cf. annexe F), ce sont les atténuations des modes guidés référencés M_1, M_2 et M_3 entre 0,35 et 0,55 MHz qui s'avèrent être les paramètres les plus prometteurs pour caractériser de manière quantitative les propriétés viscoélastiques d'un joint de colle (essentiellement ses propriétés cohésives).

3.3 Transmission d'une onde de Lamb par une zone réparée avec patch collé

Les études de sensibilité réalisées dans le paragraphe précédent ainsi que dans les annexes E et F, ont montré que le paramètre *a priori* le plus sensible aux propriétés du collage était l'atténuation des trois premiers modes guidés se propageant le long de l'assemblage collé. Il a également été montré que, pour pouvoir être mesurées, ces atténuations ne doivent pas prendre des valeurs trop élevées. Il a donc été choisi d'étudier ce paramètre dans le domaine de fréquences $[0{,}35 - 0{,}6]\ MHz$.

Malheureusement l'atténuation est relativement difficile à mesurer expérimentalement car le mode doit être parfaitement pur (seul) pour que la décroissance de son amplitude au cours de sa propagation soit correctement suivie. Une onde de Lamb générée dans la partie aluminium de la structure se propage d'abord le long du substrat puis se convertit généralement en plusieurs modes guidés propres à la partie multicouche de la structure, ce qui rend difficile, voire impossible, la mesure d'une atténuation. Par contre, pendant que ces ondes guidées se propagent le long du collage, elles y dissipent de l'énergie avant de se convertir à nouveau en mode de Lamb guidé le long du substrat d'aluminium. L'amplitude de ce mode de Lamb dépendra de la quantité d'énergie dissipée dans la zone de collage, autrement dit de l'atténuation des ondes guidées se propageant le long du multicouche. Plutôt que l'atténuation de ces ondes se propageant le long de l'assemblage collé, c'est donc le coefficient de transmission d'un mode de Lamb se propageant le long de la plaque d'aluminium qui va être mesuré. Ce coefficient désigne le rapport entre l'amplitude du mode transmis par la zone tricouche et se propageant le long de l'aluminium et l'amplitude du mode incident depuis l'aluminium, avant le patch. Il est donc directement lié aux atténuations des modes du tricouche et permet d'éviter leur mesure très difficile.

Pour sélectionner ce mode de Lamb incident en fonction du (ou des) mode(s) guidé(s) se propageant le long de la partie tricouche de l'assemblage, il est nécessaire d'examiner la distribution dans l'épaisseur des champs de déplacements des différentes ondes. En travaillant sur une structure de type joint à simple recouvrement, Lowe et al. [82] ont en effet montré que pour qu'un mode de Lamb se propageant le long du substrat se convertisse en un mode guidé se propageant le long de la partie tricouche d'un assemblage, il est nécessaire que la distribution de leurs champs de déplacements respectifs coïncident dans l'épaisseur du substrat. La figure 3.11 représente ainsi la superposition des distributions des champs de déplacements des modes M_1, M_2 et M_3 avec celles des modes A_0 ou S_0 se propageant le long d'une plaque de 3 mm d'aluminium. Elle montre que le mode M_1 aurait tendance à se propager grâce à la conversion d'un mode incident A_0 tandis que les modes M_2 et M_3 seraient plutôt issus de la conversion d'un mode incident S_0. Choisir le mode A_0 comme mode incident permettrait donc d'étudier essentiellement l'influence du collage sur le seul mode M_1, tandis que choisir de travailler avec un mode S_0 incident signifierait étudier surtout l'influence simultanée des deux modes M_2 et M_3 (ce qui permettrait probablement d'obtenir plus d'informations sur la qualité du collage). Néanmoins, comme le montre la figure 3.11, la correspondance entre les champs de déplacements des modes M_1 et A_0 est bien plus forte que celle qui existe entre les modes M_2 ou M_3 et le mode S_0. Il semble donc légitime de supposer que le mode M_1 soit plus facile à générer par conversion de mode que les modes M_2 ou M_3. Ainsi c'est la propagation des modes A_0 et M_1 qui a d'abord été étudiée dans la suite, celles des modes S_0, M_2 et M_3 venant ultérieurement.

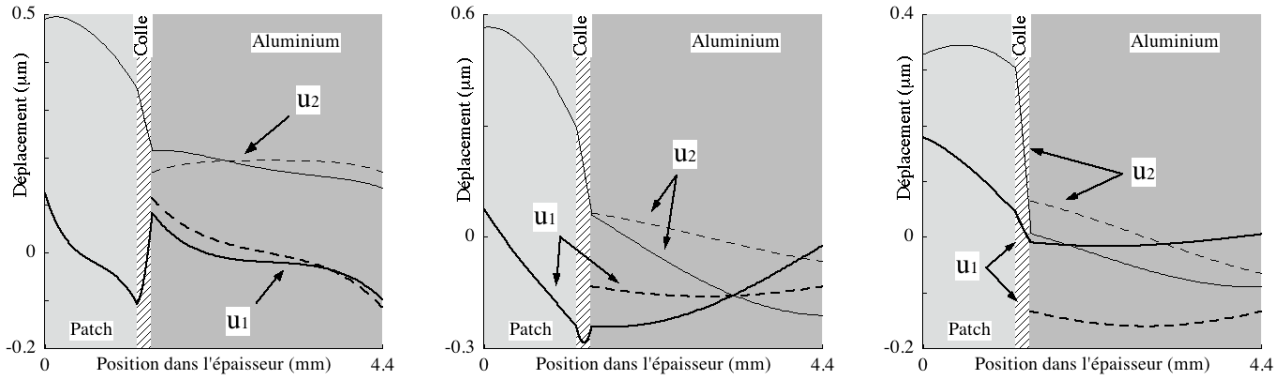


FIGURE 3.11 – Superposition de la distribution des champs de déplacement, (a) des modes M_1 et A_0, (b) des modes M_2 et S_0, et (c) des modes M_3 et S_0 se propageant respectivement le long d'un assemblage collé avec patch en composite (——) et le long d'une plaque d'aluminium de 3 mm ($- - -$) à 400 kHz.

Il a été vérifié que les mêmes conclusions restaient valables pour l'assemblage avec patch en plexiglas. A noter que pour cet assemblage il est peu vraisemblable que le mode M_2 puisse être généré au sein du domaine de fréquences considéré. Contrairement aux modes M_1 et M_3, le mode M_2 concentre son énergie au niveau de la colle et du patch. Un mode incident qui se propage le long de l'aluminium ne sera vraisemblablement pas couplé à ce mode M_2 et ne permettra donc pas de le générer par conversion de mode. Dans ce cas, travailler avec un mode S_0 incident permet d'étudier la sensibilité du mode M_3 uniquement.

3.3.1 Modèle éléments finis de propagation des ondes guidées

Présentation du modèle

Le modèle utilisé pour simuler numériquement la propagation des ondes guidées le long d'un assemblage collé est de type éléments finis. Comme pour les calculs faisant appel à la méthode SAFE, c'est le logiciel commercial COMSOL qui est utilisé, et comme lors de l'étude portant sur les ondes SH, la largeur du patch (200 mm) est supposée avoir un effet négligeable sur la propagation des ondes guidées étudiées. La géométrie considérée dans les simulations aux éléments finis est donc en deux dimensions d'espace (cf. figure 3.12).

Il est possible de choisir de travailler soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel. La première possibilité présente l'avantage d'une interprétation identique à celle faite sur des signaux mesurés. D'un autre côté ce type de simulation numérique est très lourd en terme de maillage (toute la longueur de la plaque d'aluminium, soit 600 mm pour reproduire les conditions expérimentales, est prise en compte dans les calculs) et de nombre d'itérations temporelles, donc de temps de calcul. La seconde possibilité permet de réduire le coût du maillage et le nombre d'itérations. De plus, pour l'assemblage collé étudié la longueur de la plaque d'aluminium est grande comparée aux longueurs d'ondes des ondes guidées envisagées aux fréquences sélectionnées ($\lambda_{max} \approx 20\ mm$) ; les échos réfléchis en bout de plaque ne se superposent donc pas à l'écho incident et il est ainsi possible d'assimiler la longueur du substrat

d'aluminium à une longueur infinie. L'utilisation d'un modèle numérique dans le domaine des fréquences permet, dans ce cas, de réduire la longueur modélisée du substrat d'aluminium grâce à l'adjonction de deux régions absorbantes [86–88]. Ces zones permettent de s'affranchir des réflexions en bout de plaque. Le domaine en fréquences permet surtout de prendre en compte correctement la viscoélasticité des matériaux [89, 90]. Il sera d'ailleurs montré plus loin que ce point est fondamental pour l'étude des assemblages collés considérés ici.

Les simulations de propagation d'ondes guidées le long d'un assemblage collé seront donc effectuées *via* un modèle fréquentiel. Dans ce cas l'équation de propagation des ondes 2.2 (cf. page 36) est numériquement résolue dans le domaine de Fourier :

$$C_{ijkl}\frac{\partial^2 \hat{u}_j}{\partial x_k \partial x_l} + \rho\omega^2 \hat{u}_i = 0 \tag{3.12}$$

où $i = 1{,}2$, avec une sommation implicite sur les indices $j,k,l = 1{,}2$ et où $\hat{u}_{i=1,2}$ est la transformée de Fourier des composantes $u_{i=1,2}$ du déplacement.

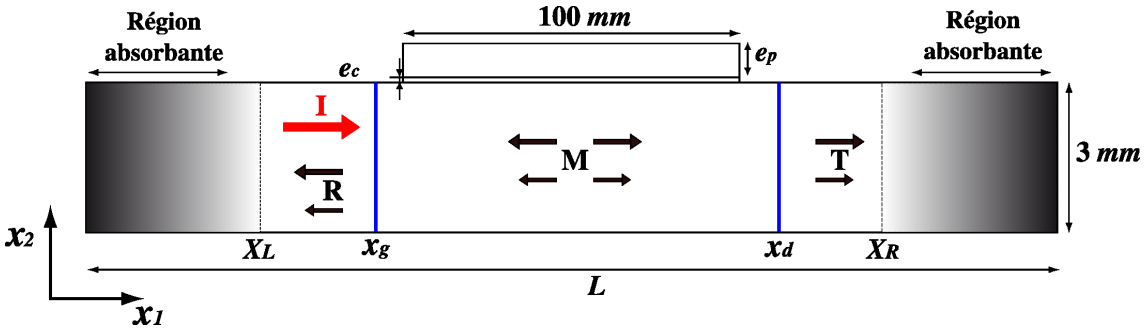


FIGURE 3.12 – Schéma de la géométrie 2D simulée par éléments finis sous COMSOL.

La géométrie du modèle est présentée sur la figure 3.12, elle est constituée d'une plaque d'aluminium épaisse de 3 *mm* sur laquelle est collé un patch d'épaisseur e_p et de 100 *mm* de long, par l'intermédiaire d'un joint d'adhésif d'épaisseur e_c .

De manière à éviter des réflexions non désirées en bout de plaque, deux régions absorbantes sont créées [80, 86, 88]. Les matériaux y sont artificiellement rendus de plus en plus viscoélastiques à l'approche des extrémités de la géométrie. La masse volumique ainsi que les propriétés élastiques, c'est à dire les C'_{ij}, des matériaux restent inchangées mais la partie imaginaire des C_{ij} augmente selon une loi cubique. La nouvelle valeur du module de viscoélasticité est alors régie par la loi suivante :

$$C^a_{ij} = C'_{ij}\left(1 + I\alpha\frac{(X_L - x_1)^3 + (x_1 - X_R)^3}{L_a^3}\right) + IC''_{ij} \tag{3.13}$$

où $C_{ij} = C'_{ij} + IC''_{ij}$ sont les modules de viscoélasticité du matériau dans la zone de propagation, C^a_{ij} les modules dans les régions absorbantes, x_1 est la position courante suivant la direction 1, L_a la largeur des deux régions absorbantes, X_L et X_R sont les abscisses des débuts des absorbeurs gauche et droit, respectivement, et enfin α désigne un coefficient qui fixe le niveau maximum de viscoélasticité du matériau (relativement à sa raideur) aux extrémités extérieures

des régions absorbantes. Ce coefficient est optimisé de manière à minimiser les réflexions en bout de plaque ainsi que de manière à éviter de trop fortes ruptures d'impédance acoustique entre la région absorbante et le reste de la plaque (ce qui entraînerait de la réflexion). Pour toutes les simulations présentées dans ce chapitre, il varie entre 1,5 et 2. La longueur des absorbeurs est quant à elle fixée en fonction de la plus grande longueur d'onde, λ_{max}, des ondes guidées pouvant se propager le long de la structure pour les fréquences de calcul. Elle est en général comprise entre 2 et $3\lambda_{max}$ [80, 88].

En ce qui concerne le maillage, le nombre de degrés de liberté d'un modèle dépend de plusieurs paramètres comme la plus petite longueur d'onde, λ_{min}, des ondes se propageant le long de la structure, de l'épaisseur e_c du joint de colle, ainsi que du ratio entre ces deux valeurs. Afin de modéliser avec suffisamment de précision les phénomènes de propagation d'onde, il est nécessaire de discrétiser la géométrie avec des éléments d'ordre 2 ou plus, au moins quatre fois plus petits que la plus petite longueur d'onde [87, 91]. Enfin la taille des éléments ne doit pas varier trop brutalement sous peine de provoquer des phénomènes de diffraction numérique [80] et le maillage de la géométrie doit être suffisamment fin pour que les distributions dans l'épaisseur de l'assemblage des champs de déplacements, de contraintes et du flux de puissance soit correctement calculées (soit au moins deux éléments pour discrétiser l'épaisseur de chacune des différentes couches de l'assemblage). Pour toutes ces raisons, le maillage réalisé sera constitué d'éléments de Lagrange rectangulaires d'ordre 3, de largeur 0,25 mm, hauts de 0,5, 0,6, et 0,1 mm dans l'aluminium, le patch et la colle, respectivement. Ce maillage est alors constitué de 7211 éléments avec 120 062 degrés de liberté lorsque la plaque d'aluminium est longue de $L = 200$ mm.

Un mode incident, noté I sur la figure 3.12, est excité depuis la partie gauche du substrat, là où le guide d'ondes est constitué d'un seul matériau. Ce mode incident se propage suivant l'axe x_1 et lorsqu'il arrive au niveau de la zone tricouche du guide il est d'une part réfléchi en modes de Lamb se propageant dans le sens des x_1 négatifs le long de l'aluminium (modes R) et d'autre part converti en modes guidés de l'assemblage (modes M) se propageant dans le sens des x_1 positifs. Après s'être propagés le long du tricouche les modes guidés M sont à leur tour réfléchis ou convertis en modes de Lamb, notés T, se propageant le long de l'aluminium. Le mode de Lamb incident I et les modes de Lamb réfléchis R sont inclus dans le champ ultrasonore qui sera référencé par la lettre g (champ à gauche du patch). Le champ regroupant la superposition de tous les modes de Lamb transmis, modes T sur la figure 3.12, sera quant à lui référencé par la lettre d (champ à droite du patch). Leur vecteur déplacement et leur tenseur des contraintes seront respectivement notés :

$$\mathbf{u^g} = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i^g \tilde{\mathbf{u}}_i^g \quad \text{et} \quad \boldsymbol{\sigma^g} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\infty} \alpha_{\mathrm{i}}^{\mathrm{g}} \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{g}} \tag{3.14}$$

pour le champ ultrasonore à gauche du patch et :

$$\mathbf{u}^{\mathrm{d}} = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i^d \tilde{\mathbf{u}}_i^d \quad \text{et} \quad \boldsymbol{\sigma^d} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\infty} \alpha_{\mathrm{i}}^{\mathrm{d}} \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{d}} \tag{3.15}$$

pour le champ ultrasonore à droite du patch et où $\alpha_i^{g,d}$ est l'amplitude complexe du mode i. D'un point de vue général, on peut considérer que le nombre de modes dont est composé le champ ultrasonore (à gauche et à droite) est infini. Il regroupe les modes propagatifs, fortement

atténués et évanescents, progressifs ou rétrogrades, avec des amplitudes variables d'un mode à l'autre.

Post traitement par relation d'orthogonalité

Afin d'analyser les résultats en terme de vitesses ou d'amplitudes de modes guidés, la méthode la plus classique consiste à effectuer une transformée de Fourier de l'une des composantes du déplacement simulé [81]. L'inconvénient majeur de cette méthode est son coût en terme de degrés de liberté du modèle éléments finis. Par exemple pour calculer un coefficient de transmission, il est nécessaire d'effectuer une transformée de Fourier à gauche du patch pour obtenir l'amplitude du mode incident (ainsi que celle des modes réfléchis) et une seconde transformée à droite du collage pour obtenir l'amplitude des modes transmis. Par exemple, à 0,4 MHz la longueur d'onde maximale des ondes guidées se propageant le long d'une plaque de 3 mm d'aluminium est celle du mode S_0 ($\lambda_{max} \simeq 13$ mm). Chacune des transformées de Fourier est effectuée sur une longueur égale à au moins deux fois cette plus grande longueur d'onde. Lors de la création de la géométrie du modèle, la longueur de la plaque d'aluminium est estimée en fonction de la longueur du patch (100 mm), de la longueur des régions absorbantes (≈ 40 mm chacune à 0,4 MHz), d'une distance avant et après le collage pour permettre à l'onde guidée d'être générée et de se propager après la zone de réparation. A cela il faut ajouter les deux zones nécessaires au post traitement par transformée de Fourier, soit une longueur de deux fois 26 mm. Ce type de traitement impose aussi une condition d'échantillonnage : le déplacement créé par le champ acoustique doit être relevé avec une résolution spatiale ΔX égale à $\lambda_{min}/4$ [92]. Cela amène à discrétiser la géométrie par l'intermédiaire d'un maillage à 143 774 degrés de liberté.

D'autre part le post-traitement par relation d'orthogonalité ne nécessite pas un tel espace. Seules deux lignes dans l'épaisseur de l'assemblage sont nécessaires pour pouvoir obtenir les amplitudes de chacune des ondes se propageant le long de la structure [91]. Ces deux sections sont représentées sur la figure 3.12 aux abscisses x_g et x_d. Dans ce cas le maillage, précédemment décris page 83, est constitué de 120 062 degrés de libertés, soit un gain de 20% lorsque le post traitement est effectué par application d'une relation d'orthogonalité. C'est donc ce type de traitement qui va être choisi pour la suite de l'étude.

La notion d'orthogonalité stipule que chaque onde est orthogonale à une autre au sens d'un produit scalaire faisant intervenir les champs de contraintes et de déplacements de ces ondes [49, 67, 91]. De cette manière il est possible de décomposer le champ total dans un guide d'ondes en la somme des champs de chacun des modes de Lamb qui constituent une base complète dans l'espace à deux dimensions [93]. La relation d'orthogonalité utilisée pour le post-traitement des modèles éléments finis est la suivante [91] :

$$\int_0^h \big(- \sigma_{11}^n U_1^m - \sigma_{11}^m U_1^n + \sigma_{12}^n U_2^m + \sigma_{12}^m U_2^n \big) dx_2 = A(n)\delta_{mn} \tag{3.16}$$

où h est l'épaisseur du guide considéré, δ_{mn} est le symbole de Kronecker, qui vaut 1 si $m = n$ et 0 sinon, $\sigma_{11}^{m,n}$, $\sigma_{12}^{m,n}$, $U_1^{m,n}$ et $U_2^{m,n}$ sont les composantes du tenseur de contraintes et du vecteur déplacement des modes m et n respectivement, et $A(n)$ est la valeur de l'intégrale. Cette relation d'orthogonalité va être appliquée aux champs ultrasonores dont les déplacements et les contraintes sont définis par les équations 3.14 et 3.15, et relevés à droite et à gauche du patch, afin d'identifier et de calculer les amplitudes $\alpha_i^{d,g}$ de chacun des modes de Lamb propagatifs qui

les composent.

Par exemple, pour déterminer l'amplitude d'un mode guidé n composante du champ total à gauche (ou à droite), la relation d'orthogonalité 3.16 est appliquée entre ce champ total défini par la relation 3.14 (ou la relation 3.15) et calculé par éléments finis, et les champs normalisés en puissance du mode n, obtenus par un calcul annexe utilisant la méthode SAFE (comme par exemple le champ de déplacements du mode A_0, présentés sur la figure 3.11). Il est alors possible d'obtenir l'amplitude α_n de ce mode dans le champ total [91] :

$$\alpha_n = \frac{A(n)}{2\int_0^h \big(-\tilde{\sigma}_{11}^n \tilde{U}_1^n + \tilde{\sigma}_{12}^n \tilde{U}_2^n\big) dx_2} \tag{3.17}$$

Lorsque l'amplitude complexe du mode incident α^I, l'amplitude complexe α_n^R de tout mode n du champ réfléchi et l'amplitude complexe α_n^T de tout mode n du champ transmis sont déterminées grâce à l'équation 3.17, il est possible de définir des coefficients de réflexion et de transmission en amplitude :

$$r_n = \frac{\alpha_n^R}{\alpha^I} \qquad \text{et} \qquad \mathrm{t_n} = \frac{\alpha_\mathrm{n}^\mathrm{T}}{\alpha^\mathrm{I}} \tag{3.18}$$

ou en énergie en élevant au carré ces rapports [49].

Dans la suite t_{A_0} et t_{S_0} désigneront respectivement les coefficients de transmission définis ci-dessous :

$$t_{A_0} = \frac{\alpha_{A_0}^T}{\alpha^{A_0}} \qquad \text{et} \qquad \mathrm{t_{S_0}} = \frac{\alpha_{\mathrm{S_0}}^\mathrm{T}}{\alpha^{\mathrm{S_0}}} \tag{3.19}$$

où α^{A_0} et α^{S_0} sont les amplitudes des modes incidents, A_0 dans le premier cas et S_0 dans le second cas, et où $\alpha_{A_0}^T$ et $\alpha_{S_0}^T$ sont les amplitudes des modes A_0 et S_0 transmis, respectivement.

Implémentation COMSOL

Le formalisme COMSOL a déjà permis de résoudre un problème aux valeurs propres (cf. équations 3.10 et 3.11). Pour résoudre un problème de propagation d'ondes, le formalisme est le suivant :

$$\begin{cases} \nabla \cdot (c\nabla u + \alpha u - \gamma) - au - \beta \cdot \nabla u = f & \text{dans } \Omega \\ \mathbf{n} \cdot (c\nabla u + \alpha u - \gamma) + qu = g & \text{sur } \partial\Omega \\ hu = r & \text{sur } \partial\Omega \end{cases} \tag{3.20}$$

pour la forme vectorielle et :

$$\begin{cases} c_{ijkl}\dfrac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l} + (\alpha_{ijk} - \beta_{ijk})\dfrac{\partial u_j}{\partial x_k} - a_{ij}u_j = f_i & \text{dans } \Omega \\ c_{ijkl}\dfrac{\partial u_j}{\partial x_l}n_k + \alpha_{ijk}u_j n_k - \gamma_{ik}n_k + q_{ij}u_j = g_i & \text{sur } \partial\Omega \\ h_{ij}u_j = r_i & \text{sur } \partial\Omega \end{cases} \tag{3.21}$$

pour la forme indicielle, où $i = 1, 2$ et avec sommation sur les indices j, k, $l = 1, 2$. Les coefficients c, α, β, a, f, γ, q, g, h et r sont, comme précédemment, des coefficients pouvant prendre diverses significations physiques selon le problème traité. Ils peuvent prendre la forme de matrices, de vecteurs ou de scalaires.

Le problème physique de propagation d'ondes, dans le domaine des fréquences, se met lui sous la forme suivante :

$$\begin{cases} C_{ijkl}\dfrac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} + \rho\omega^2 u_i = 0 & \text{dans } \Omega \\ C_{ijkl}\dfrac{\partial u_k}{\partial x_l} n_j = T_i & \text{dans } \partial\Omega \end{cases} \tag{3.22}$$

avec $i = 1, 2$ et sommation sur les indices j, k, $l = 1, 2$ et où ρ et $\mathbf{C} = (C_{ijkl})_{i,j,k,l=1,2}$ désignent respectivement la masse volumique et le tenseur des rigidités du matériau considéré, où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation et f la fréquence, où $\mathbf{n} = (n_i)_{i=1,2}$ est le vecteur unitaire définissant la normale sortante au domaine considéré, où $\mathbf{T} = (T_i)_{i=1,2}$ est le vecteur contrainte.

Une première comparaison des systèmes 3.21 et 3.22 permet d'identifier certains coefficients du formalisme COMSOL :

$$\begin{cases} \alpha = \beta = 0 \\ f = 0 \\ \gamma = q = 0 \\ g_i = T_i \end{cases}$$

et :

$$a = \begin{pmatrix} -\rho\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho\omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho\omega^2 \end{pmatrix}$$

De son côté le coefficient c peut être mis sous la forme suivante [90] :

$$c = \begin{pmatrix} C_{1111} & 0 & 0 & C_{1122} \\ 0 & C_{1212} & C_{1212} & 0 \\ 0 & C_{1212} & C_{1212} & 0 \\ C_{1122} & 0 & 0 & C_{2222} \end{pmatrix}$$

Soit, en utilisant la forme contractée pour les composantes du tenseur des rigidités :

$$c = \begin{pmatrix} C_{11} & 0 & 0 & C_{12} \\ 0 & C_{66} & C_{66} & 0 \\ 0 & C_{66} & C_{66} & 0 \\ C_{12} & 0 & 0 & C_{22} \end{pmatrix}$$

où les C_{ij} sont les modules de viscoélasticité du matériau, définis selon la relation 3.13.

Les surfaces extérieures de l'empilement sont libres de contraintes, le vecteur $\mathbf{T} = \bar{\bar{\sigma}} \cdot \mathbf{n}$ y est donc nul. Au niveau des frontières internes, la continuité des déplacements et des contraintes est assurée. C'est également le cas pour l'interface aluminium/colle dans la mesure où l'étude de sensibilité a montré qu'elle influait peu sur les valeurs des atténuations des modes guidés du multicouche.

Le mode incident est généré grâce à une force de volume localisée qui est appliquée sur une largeur de 1 mm dans toute l'épaisseur de la plaque d'aluminium. Chacune des composantes de cette force est modélisée de manière à correspondre à la distribution dans l'épaisseur de l'aluminium de la composante correspondante du champ de contraintes du mode de Lamb incident (A_0 ou S_0 selon le cas).

3.3.2 Simulations numériques de la transmission d'un mode guidé

Rappelons que l'étude de sensibilité des ondes guidées de type Lamb aux propriétés d'un collage a montré qu'un paramètre *a priori* porteur d'informations sur les propriétés cohésives d'un joint de colle était l'atténuation des modes M_1, M_2 ou M_3. Malheureusement ce paramètre est difficile à mesurer expérimentalement. Une manière indirecte d'étudier l'évolution de l'atténuation de ces modes guidés est de mesurer le coefficient de transmission d'un mode de Lamb (A_0 ou S_0) se propageant le long de la plaque d'aluminium et étant transmis par la zone sur laquelle est collée le patch. Il est également possible d'étudier l'évolution du coefficient de réflexion de ce même mode de Lamb, ou alors les phénomènes de conversion de modes, à une fréquence donnée et pour différents niveaux de cohésion de la colle. Par exemple, pour un mode A_0 incident depuis la plaque d'aluminium, l'application de la relation d'orthogonalité 3.16 en x_g, puis en x_d, permet de calculer l'amplitude α^{A_0} du mode incident et les amplitudes $\alpha^R_{A_0}$ et $\alpha^R_{S_0}$ des modes A_0 et S_0 réfléchis d'une part, ainsi que les amplitudes $\alpha^T_{A_0}$ et $\alpha^T_{S_0}$ des modes A_0 et S_0 transmis d'autre part. Des calculs ont montré que les amplitudes des modes réfléchis, ainsi que celle du mode S_0 transmis, si le mode incident est A_0, étaient très faibles, et n'apportaient pas plus d'informations concernant le collage, que l'amplitude du mode A_0 transmis. Par exemple, à 0,4 MHz, l'amplitude du mode A_0 transmis augmente 5 fois plus que toutes les autres amplitudes, au cours du processus de réticulation du joint de colle d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas. De plus, les ordres de grandeur des modes A_0 et S_0 réfléchis ainsi que du S_0 transmis laissent présager que les signaux correspondants obtenus lors d'expériences seraient noyés dans le bruit, particulièrement au début du processus de réticulation du joint de colle. Par conséquent, parmi toutes ces amplitudes, seules celles du mode A_0 incident et transmis seront investiguées. De manière similaire, lorsque le mode S_0 sera incident, seules son amplitude et celle du mode S_0 transmis seront analysées.

De la même manière que pour l'étude de sensibilité, différents paramètres peuvent influer sur la valeur du coefficient de transmission : les modules de viscoélasticité des différents matériaux, leurs épaisseurs et densités respectives, et la géométrie du joint du colle. Un premier point va consister à montrer que la prise en compte des parties imaginaires des modules de viscoélasticité des matériaux est indispensable pour pouvoir établir une stratégie d'évaluation non destructive et quantitative de la qualité d'un collage. Ensuite, comme le domaine de fréquences [0,35 − 0,6] MHz a été choisi pour que les ondes guidées sélectionnées soient peu sensibles à des variations de ±5%, ± 3% et ± p% de l'épaisseur, la masse volumique et des modules de viscoélasticité des substrats ($p = 5$ dans le cas l'aluminium et du plexiglas et $p = 10$ dans le cas du composite) respectivement, ces grandeurs seront invariantes dans toute la suite de l'étude. Dans les calculs ce seront les propriétés du joint de colle qui seront variables. Les modules de viscoélasticité de l'adhésif suivront les lois d'évolution mises en évidence au chapitre 1 (cf. figure 1.13 page 31) de manière à modéliser ses propriétés mécaniques au cours du processus de réticulation. Différentes géométries du joint seront alors considérées pour mettre en évidence l'influence de sa forme sur la mesure du coefficient de transmission d'un mode de Lamb le long d'une plaque d'aluminium sur laquelle est collé un patch.

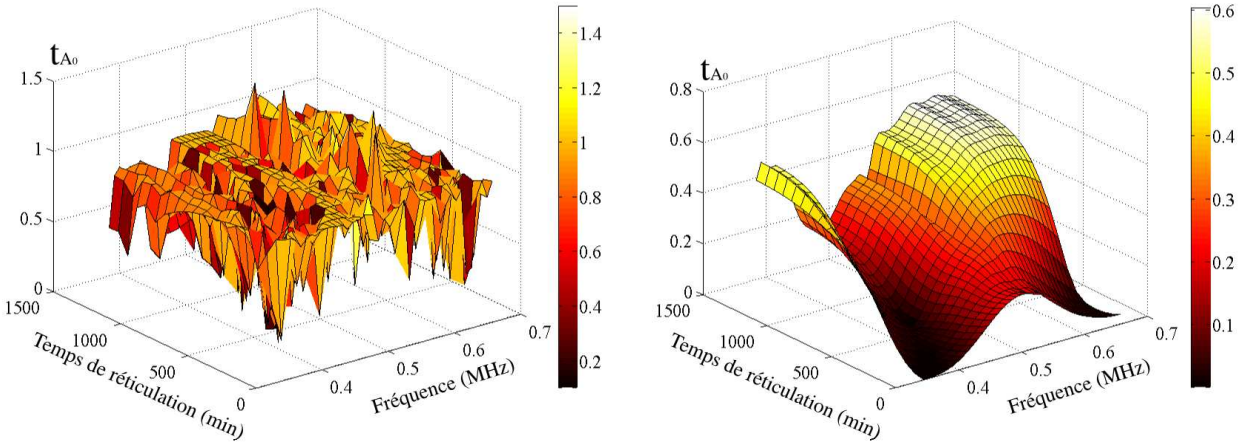
Importance de la viscoélasticité

Dans la littérature du contrôle ou de l'évaluation par ondes guidées de structures collées, la viscoélasticité des matériaux est presque toujours négligée dans les modèles de simulations

numériques [18, 33, 34, 36, 39, 40, 45, 48, 82, 94]. Afin de vérifier les conséquences de cette hypothèse simplificatrice, deux études numériques ont été menées sur un assemblage de type aluminium / colle / patch en plexiglas. Un mode guidé pur, en l'occurrence A_0, est généré dans la partie aluminium de l'assemblage. Ce mode se propage le long du substrat métallique puis, au niveau du collage, il est converti en modes guidés du tricouche. Ces modes se propagent à leur tour le long de l'assemblage collé puis ils sont de nouveau convertis en mode de Lamb dans l'aluminium. C'est à ce niveau de la structure, c'est à dire à droite du patch, que l'amplitude du mode A_0 transmis est relevée puis divisée par celle du mode incident, relevée à gauche du patch, pour obtenir un coefficient de transmission. Ce calcul est effectué pour des fréquences allant de 0,3 à 0,6 MHz (autour de la fréquence de coupure du mode A_1). Ils ont également été menés pour différents niveaux de cohésion de l'adhésif, niveaux simulés par l'intermédiaire des lois présentées sur la figure 1.13 page 31.

Dans un premier temps, tous les matériaux ont été supposés élastiques. Les résultats sont présentés sur la figure 3.13(a). Cette représentation en trois dimensions montre qu'à état cohésif fixe et fréquence variable (ou inversement) le coefficient de transmission varie, mais jamais de manière monotone ce qui ne permet pas d'envisager de solution au contrôle de la qualité du collage grâce à une mesure du coefficient de transmission du mode A_0. Si maintenant une nouvelle série de simulations numériques est effectuée en prenant en compte la viscoélasticité de la colle et celle du patch, les résultats, cf. figure 3.13(b), présentent un aspect tout à fait différent. Cette fois, si la fréquence est fixée, le coefficient de transmission du mode A_0 évolue de manière monotone en fonction du niveau de cohésion de l'adhésif. Ce type d'évolution permet donc d'envisager de caractériser de manière non destructive les propriétés cohésives du joint de colle puisqu'il est possible de trouver des fréquences où, à un état cohésif du joint correspond un et un seul niveau de transmission du mode guidé A_0. Des résultats similaires sont obtenus lorsque le mode guidé A_0 incident est remplacé par un mode S_0 (cf. figure 3.14).

Ces résultats montrent l'importance et la nécessité de prendre en compte les propriétés viscoélastiques des différents matériaux constituant l'assemblage, dans les modèles de propagation.



(a) (b)

FIGURE 3.13 – Evolution du coefficient de transmission du mode guidé A_0 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas (a) élastique et (b) viscoélastique, pendant la réticulation du joint de colle et pour des fréquences variant de 0,3 à 0,6 MHz.

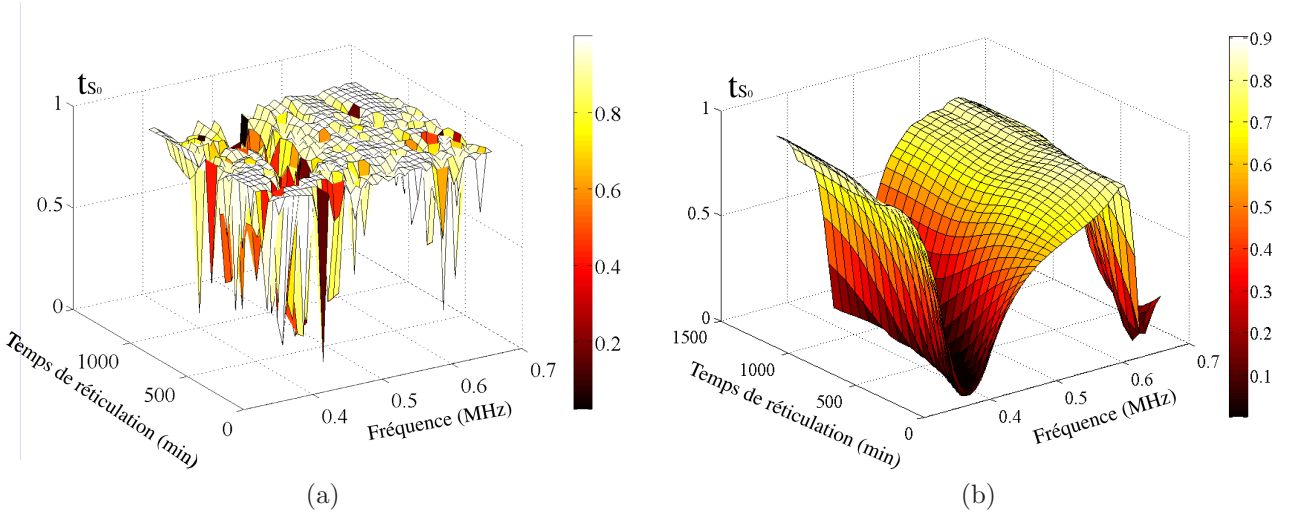


FIGURE 3.14 – Evolution du coefficient de transmission du mode guidé S_0 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas (a) élastique et (b) viscoélastique, pendant la réticulation du joint de colle et pour des fréquences variant de 0,3 à 0,6 MHz.

Sans considérer cette véritable nature des matériaux, les simulations numériques sont erronées et l'on passe à côté de solutions possibles pour le contrôle du collage.

Prédictions numériques pour plusieurs épaisseurs de colle

Des simulations numériques de la propagation des modes A_0, puis S_0, le long d'une plaque d'aluminium sur laquelle est collé un patch plexiglas ont été réalisées à 0,4 MHz. Cette fréquence a été choisie dans le domaine de fréquences $[0{,}35 - 0{,}55]$ MHz au sein duquel les atténuations des modes M_1, M_2 et M_3 sont plus sensibles aux propriétés mécaniques du joint de colle qu'à celles des substrats. Elles ont été menées pour diverses épaisseurs de l'adhésif. Lorsque l'étude de sensibilité des ondes guidées à l'épaisseur de l'adhésif a été réalisée, une variation de $\pm 15\%$ de ce paramètre a été considérée. Cet ordre de grandeur fait référence à l'intervalle de confiance sur la mesure *in fine* de l'épaisseur du joint de colle. Maîtriser l'épaisseur du joint de colle au moment de sa réalisation est une chose moins aisée. La quantité de colle nécessaire pour réaliser un joint donné est calculée puis préparée (avec un supplément pour prendre en compte les pertes). Cette colle est appliquée de la manière la plus homogène possible sur les deux surfaces à encoller et ces dernières sont assemblées. Une masse est ensuite appliquée de manière à ce que l'épaisseur du joint de colle s'homogénéise le plus possible. L'épaisseur de la couche d'adhésif est mesurée au mieux à $\pm 15\%$ près lorsque le processus de réticulation est achevé. Avec ce protocole il est possible d'obtenir des collages pour lesquels le joint est plus ou moins épais (sur l'ensemble des échantillons réalisés au cours de cette thèse, cette épaisseur varie de 0,1 à 0,7 mm). Afin de vérifier l'influence que ce paramètre peut avoir sur l'évolution du coefficient de transmission d'un mode de Lamb, des simulations numériques ont été réalisées. Les résultats concernant le mode guidé A_0 sont présentés sur la figure 3.15.

Les coefficients de transmission du mode A_0 tracés sur cette figure sont obtenus pour des épaisseurs de joint de colle variant de $\pm 25\%$ autour de d'une valeur centrale de 0,2 mm. Ces

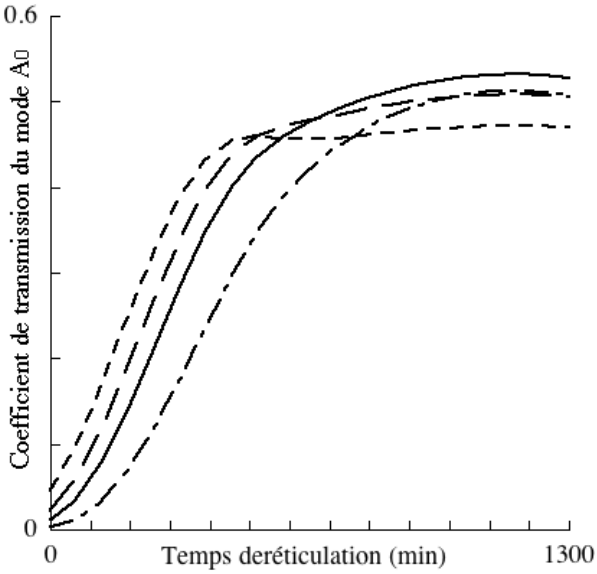


FIGURE 3.15 – Prédictions numériques de l'évolution du coefficient de transmission du mode A_0 au cours du processus de réticulation d'un joint de colle épais de 0,15 mm (— —), de 0,175 mm (− − −), de 0,2 mm (——) et de 0,25 mm (—- —), à 0,4 MHz.

résultats montrent que l'épaisseur de la couche d'adhésif a une influence non négligeable sur le coefficient de transmission du mode A_0. Une augmentation de 25%, ou une chute de 12,5% de l'épaisseur du joint, entraîne une baisse de 6% du niveau du coefficient de transmission atteint en fin de polymérisation de l'adhésif. D'un autre côté plus l'épaisseur de l'adhésif est faible, plus l'augmentation du coefficient de transmission est précoce. Enfin une chute de 25% de l'épaisseur du joint de colle entraîne un tout autre type d'évolution que les précédentes. L'augmentation de la valeur du coefficient de transmission débute plus tôt que pour un joint de 0,2 mm, atteint un maximum après 500 min de réticulation puis diminue pour atteindre un niveau seuil de 13% inférieur à celui atteint pour un joint de colle épais de 0,2 mm.

La figure 3.16 présente quant à elle les coefficients de transmission calculés avec un mode S_0 incident. Il est intéressant de noter que l'évolution du coefficient de transmission de mode S_0 n'est pas monotone à 0,4 MHz. Ce coefficient, non nul initialement, commence par chuter jusqu'à une transmission quasi nulle puis augmente jusqu'à se stabiliser. Il semblerait donc que lorsque la colle est en début de réticulation, l'atténuation de l'onde guidée M_3 se propageant le long du multicouche commence par augmenter jusqu'à une valeur maximale, atteinte aux alentours de 200 min, avant de diminuer lentement au fur et à mesure que le processus de polymérisation de l'adhésif avance.

Sur cette figure il est également possible de voir que, au delà de 400 min de réticulation, le niveau du coefficient de transmission du mode S_0 varie de manière monotone en fonction de l'épaisseur du joint de colle. Elle montre également que la position dans le temps du creux de transmission dépend, elle aussi de manière monotone, de l'épaisseur du joint de colle. Ainsi une diminution de 25% de l'épaisseur du joint de colle entraîne, d'une part une augmentation de 27% du niveau final de transmission du mode S_0, et d'autre part un réajustement dans le temps (approximativement 150 min de décalage) du creux de transmission. Ce dernier apparaît

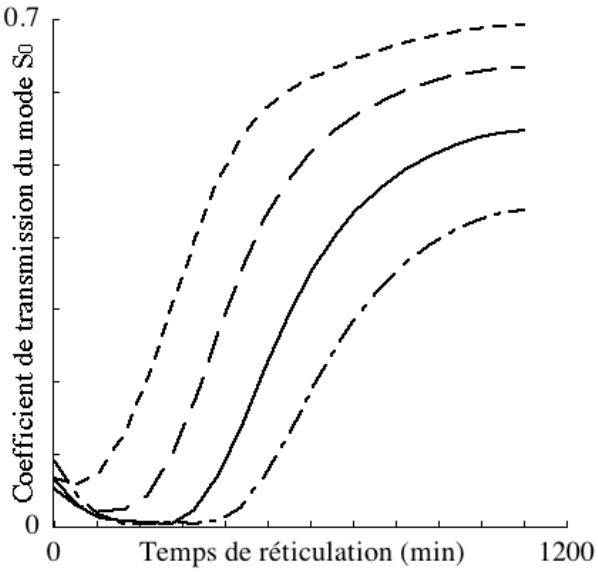


FIGURE 3.16 – Prédictions numériques de l'évolution du coefficient de transmission du mode S_0 au cours du processus de réticulation d'un joint de colle épais de 0,15 mm (− − −), de 0,175 mm (— —), de 0,2 mm (——) et de 0,22 mm (—- —).

d'autant plus tôt lors du processus de réticulation, et la valeur de ce minimum de transmission est d'autant plus élevée, que l'épaisseur du joint est faible.

Ces quelques simulations montrent que si l'épaisseur du joint de colle est connue avec une précision de ±15%, alors les coefficients de transmission des modes A_0 et S_0 pourront être évalués avec un intervalle de confiance de ±6% et ±19%, respectivement. Ces simulations montrent également qu'à la fréquence de travail, 0,4 MHz, il n'est pas possible de déterminer l'épaisseur du joint de colle par une mesure du coefficient de transmission du mode A_0. Ce paramètre y est certes sensible, mais il n'évolue pas (sauf pour les temps de réticulation inférieurs à 450 min) de manière monotone, contrairement au cas du coefficient de transmission du mode S_0 pour des temps supérieurs à 400 min après le début de la réticulation.

Elles montrent également que les niveaux des coefficients de transmission des modes A_0 et S_0 ne se stabilisent pas pour les mêmes temps de réticulation. Ces coefficients atteignent des valeurs stabilisées pour approximativement 600 min et 1000 min, pour les modes A_0 et S_0, respectivement, après que le collage ait été réalisé. Ces temps sont à comparer avec ceux pour lesquels les valeurs des modules d'élasticité de l'adhésif se stabilisent (cf. figure 1.13, page 31). Lors de cette étape de caractérisation des matériaux, l'évaluation des C'_{ij} avait révélé que le C'_{11} continuait d'augmenter durant 1080 min, tandis que la valeur du C'_{66} augmente pendant 780 min approximativement. Il semblerait donc que la transmission du mode A_0 soit plutôt corrélée aux variations du C'_{66} de la colle, et la transmission du mode S_0 plutôt au C'_{11}. Il en résulte que, si l'épaisseur du joint de colle est connue avec précision, ainsi que les caractéristiques mécaniques et géométriques des substrats, une mesure du coefficient de transmission du mode A_0 devrait permettre d'évaluer le C'_{66}, et celle du coefficient de transmission du mode S_0 devrait permettre d'évaluer le C'_{11}.

L'épaisseur du joint de colle reste néanmoins un paramètre critique pour remonter aux

propriétés élastiques d'un adhésif par l'intermédiaire du coefficient de transmission des modes guidés A_0 et S_0. Il sera donc indispensable de la connaître précisément avant de tenter de caractériser un collage par ondes guidées ultrasonores.

Influence de la géométrie du joint de colle

L'objectif de ce paragraphe est de mettre en évidence l'influence de la géométrie du joint de colle sur la transmission des modes A_0 et S_0. Deux géométries ont été simulées. La première fait intervenir des « bourrelets » de colle, représentatifs d'un écoulement de l'adhésif lors de la réalisation du collage, la seconde une épaisseur non uniforme du joint de colle (cf. figure 3.17(a) et (b) respectivement).



FIGURE 3.17 – Schématisation des modifications de géométrie apportées au joint de colle : (a) joint avec bourrelets de colle et (b) joint d'épaisseur non uniforme.

Différents cas de figure ont été simulés. Ils sont tous constitués d'une plaque d'aluminium de 3 mm sur laquelle est collé un patch de plexiglas de 1 mm. Tout d'abord deux assemblages dont le joint de colle « déborde » ont été considérés, ces bourrelets correspondent à des écoulement de colle sur 1 puis 5 mm. Ensuite, un assemblage pour lequel l'épaisseur du joint de colle n'est plus uniforme a été modélisé. Elle varie linéairement de $e_c^1 = 0{,}15$ à $e_c^2 = 0{,}2$ mm. Enfin, deux assemblages de références, pour lesquels le joint de colle est épais de 0,2 mm ou de 0,175 mm, sont simulés. Le premier assemblage servira de référence pour les géométries avec bourrelets de colle et le second pour l'assemblage dont l'épaisseur de joint est non uniforme. Les prédictions numériques de l'évolution du coefficient de transmission du mode A_0 en fonction du niveau de réticulation de l'adhésif pour ces configurations géométriques sont présentées sur la figure 3.18.

La figure 3.18(a) montre que la présence de bourrelets de colle influence l'évolution du coefficient de transmission du mode A_0 en abaissant de 11% son niveau final. Cette figure montre également que pour deux tailles de bourrelets distinctes, 1 et 5 mm de débordement de colle, l'évolution du coefficient de transmission est identique à moins de 1% près. On peut donc considérer que, quelque soit leur taille, les bourrelets de colle ont le même effet sur la transmission du mode A_0 pour l'assemblage étudié : un chute du niveau de transmission pour les temps de réticulation supérieurs à 400 min. De son côté la figure 3.18(b) montre qu'une épaisseur non constante du joint de colle n'entraîne aucun changement notable du coefficient de transmission du mode A_0 par rapport au cas où c'est l'épaisseur moyenne du joint de colle qui est prise en compte.

Ces mêmes simulations numériques ont été effectuées pour un mode S_0 incident (cf. figure 3.19). La figure 3.19(a) montre que la présence de bourrelets de colle induit cette fois des changements tout à fait minimes du coefficient de transmission du mode S_0 (inférieurs à 2% même lorsque les bourrelets de colle font 5 mm de long). Ensuite une épaisseur non uniforme

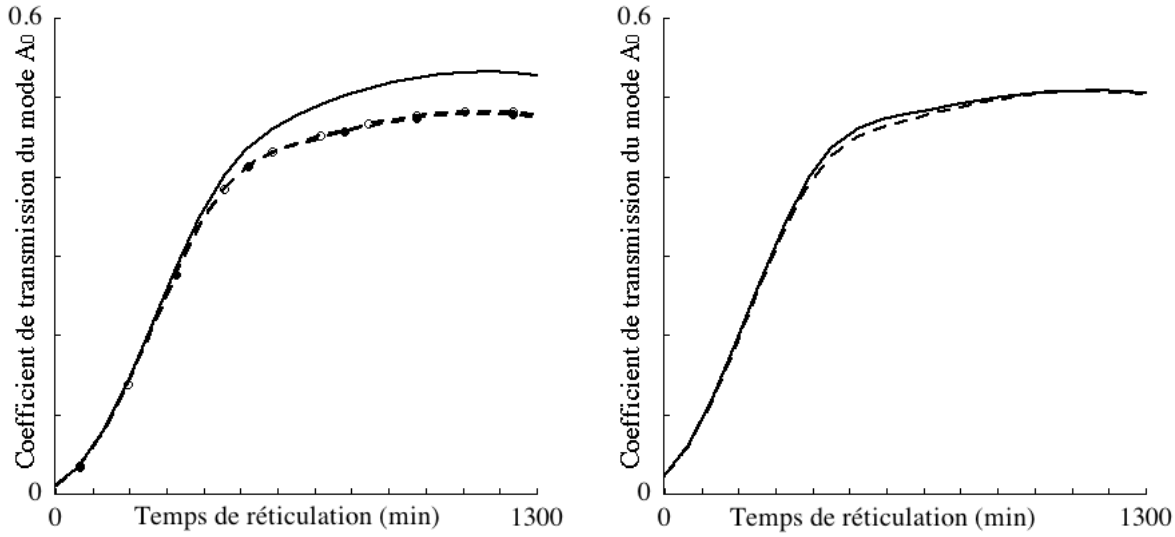


FIGURE 3.18 – Prédictions numériques de l'évolution du coefficient de transmission du mode A_0 à 0,4 MHz au cours du processus de réticulation d'un joint de colle (a) épais de 0,2 mm (———) et avec des bourrelets larges de 1 mm (- • -) et 5 mm (- ∘ -) et (b) épais de 0,175 mm (———) et dont l'épaisseur varie linéairement de $e_c^1 = 0{,}15\ mm$ à $e_c^2 = 0{,}2\ mm$ (– – –).

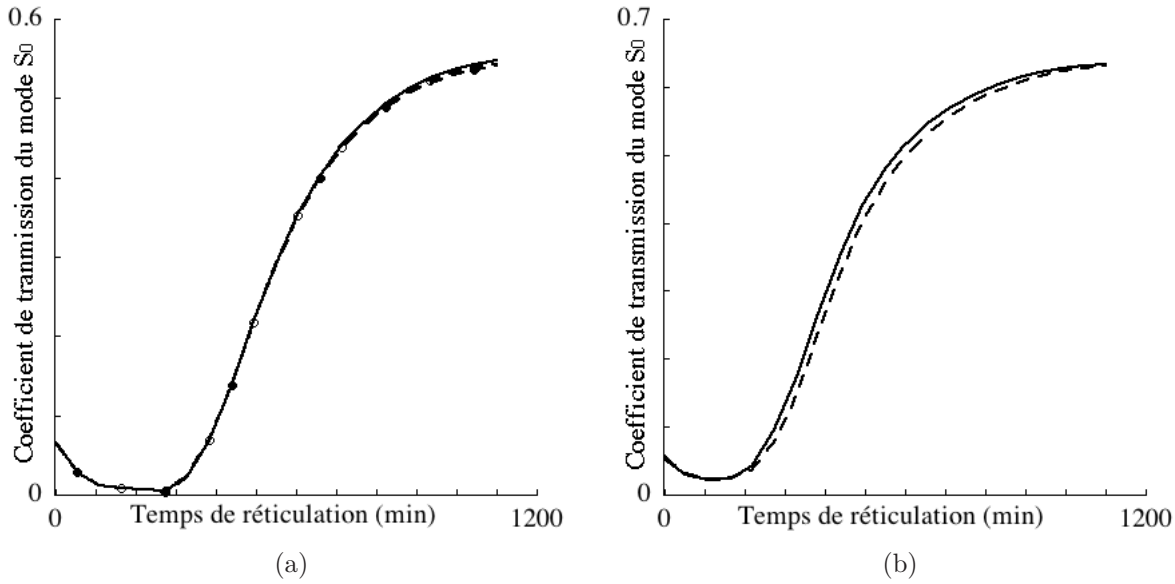


FIGURE 3.19 – Prédictions numériques de l'évolution du coefficient de transmission du mode S_0 à 0,4 MHz au cours du processus de réticulation d'un joint de colle (a) épais de 0,2 mm (———) et avec des bourrelets larges de 1 mm (- • -) et 5 mm (- ∘ -) et (b) épais de 0,175 mm (———) et dont l'épaisseur varie linéairement de $e_c^1 = 0{,}15\ mm$ à $e_c^2 = 0{,}2\ mm$ (– – –).

du joint de colle (3.19(b)) n'entraîne pas de modification notable ($\leq 5\%$) par rapport au cas où c'est l'épaisseur moyenne du joint de colle qui est prise en compte.

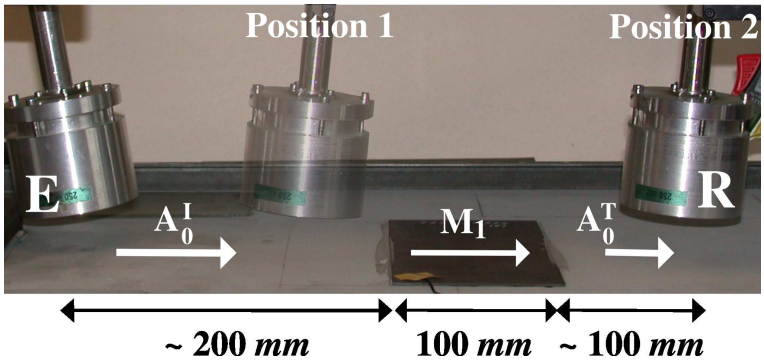


FIGURE 3.20 – Dispositif expériemental à accès uni-latéral et couplage par air utilisé pour la mesure de la transmission des ondes de Lamb.

Ces prédictions montrent que la présence de bourrelets de colle autour du joint est un paramètre à considérer lors de la simulation de la propagation des ondes guidées A_0 et M_1 le long du substrat en aluminium et de l'assemblage collé, mais pas dans le cas des modes S_0 et M_3 (ou M_2 et M_3 selon le patch). Pour pouvoir mettre à profit ces résultats dans le cadre d'une évaluation des propriétés cohésives du collage, il est donc nécessaire de connaître avec précision non seulement l'épaisseur moyenne du joint de colle, mais également l'éventuelle présence de bourrelets de colle, si c'est le mode A_0 qui est incident depuis l'aluminium.

3.3.3 Génération et détection expérimentales d'un mode guidé

Afin d'anticiper sur une future demande industrielle, un système de mesures à accès uni-latéral et sans contact a été utilisé. Il est représenté sur la figure 3.20. L'émetteur (symbole E) et le récepteur (symbole R) sont deux transducteurs ultrasonores à couplage par air, circulaires, avec une surface active de 45 mm de diamètre, de fréquence centrale 250 kHz approximativement et de bande passante à -6 dB de 100%. Ils fonctionnent sur le principe d'un condensateur dont l'une des armatures est une membrane métallisée et l'autre une plaque d'aluminium rendue rugueuse par sablage [95]. Le diamètre de ces transducteurs est très grand devant les longueurs d'ondes des ondes acoustiques générées dans l'air (de l'ordre du mm). Cela permet de réduire fortement leur ouverture angulaire et ainsi générer des modes purs dans la plaque [92]. Les transducteurs sont inclinés suivant un angle d'incidence choisi égal à l'angle de coïncidence du mode guidé à générer ou à détecter (cf. page 63). L'angle que forme le récepteur avec la direction normale à la plaque peut être soit positif soit négatif selon que l'on souhaite détecter une onde réfléchie ou transmise. Le transducteur récepteur est monté sur une table de translation. Il est ainsi possible de relever les signaux transmis le long du chemin de propagation lorsque le post traitement des données se fait par transformée de Fourier, par exemple pour vérifier que le mode guidé incident est pur [96].

Aux fréquences de travail ($f < 0{,}6$ MHz), seuls deux modes de Lamb peuvent se propager le long du substrat d'aluminium et il a été choisi de travailler avec un mode incident pur, que ce soit un mode A_0 ou S_0. Lorsque ce mode incident est le mode A_0 (ou S_0), pour vérifier que l'émetteur ne génère pas un mode guidé S_0 (ou A_0 respectivement) non désiré, ce transducteur émetteur est incliné à l'angle de coïncidence du mode A_0 (ou S_0) tandis que le récepteur est réglé à l'angle de coïncidence du mode S_0 (ou A_0). Le mode A_0 (ou S_0) incident est considéré comme

pur si, dans cette configuration du montage, aucun signal acoustique ne peut être distingué du bruit.

Les résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre ont été obtenus de la manière suivante : un mode incident pur se propage le long de la plaque d'aluminium sur laquelle sera ensuite collé un patch. Les transducteurs (émetteur et récepteur en position 2 sur la figure 3.20) sont réglés à une position fixe pendant toute la durée de l'expérimentation. Le signal de l'onde incidente est d'abord moyenné et enregistré en l'absence de patch. Ce dernier (qu'il soit en plexiglas ou en composite) est alors collé au moyen d'un adhésif à réticulation lente (le même que celui déjà caractérisé au chapitre 1) et le signal transmis est enregistré pour différents temps tout au long du processus de réticulation. Afin d'obtenir le coefficient de transmission du mode de Lamb considéré à une fréquence donnée f_{mes}, les spectres de chacun des signaux mesurés sont calculés. Ensuite, pour chaque niveau de réticulation, l'amplitude spectrale du signal transmis à la fréquence f_{mes} est divisée par celle du signal incident à la même fréquence f_{mes}.

Le protocole de collage est le suivant : les surfaces à assembler sont nettoyées, à l'acétone pour l'aluminium et à l'éthanol pour les patchs. La surface d'aluminium est ensuite poncée, puis, de nouveau nettoyée à l'acétone. Le matériau est alors mis en place sur le banc de mesures. La distance imposée entre l'émetteur et le récepteur est fixée de manière à ce l'onde guidée étudiée puisse se propager sur approximativement 40 cm ($\sim$ 20 cm avant le patch, 10 cm le long du collage puis $\sim$ 10 cm après le patch). Dans un premier temps la plaque d'aluminium est mise en place sur le banc de mesures, les transducteurs sont espacés d'approximativement 15 cm (position 1 du récepteur sur la figure 3.20) et les réglages sont effectués de manière à émettre un mode guidé incident pur. L'amplitude de ce mode est relevée, et servira, en fin de mesures, à vérifier que le signal incident n'a pas été modifié pendant le temps que dure le processus de réticulation de la colle (plusieurs heures). Le récepteur est alors placé à la position 2 (cf. figure 3.20) et l'amplitude du mode incident y est relevée. C'est cette amplitude qui servira par la suite à calculer le coefficient de transmission. La colle époxy à réticulation lente est appliquée sur les deux surfaces à encoller et l'assemblage du substrat métallique avec le patch est effectué. Après un délai d'approximativement 15 min où l'assemblage est laissé sous une masse de 3 kg, l'amplitude du mode A_0 transmis est relevée tous les quarts d'heures à toutes les heures. En fin de mesures, soit après $20h$, le récepteur est de nouveau placé à la position 1. L'amplitude du mode incident y est relevée et comparée à celle qui avait été obtenue lors de la phase de réglages, afin de vérifier que le signal incident n'ait subi aucune perturbation.

3.3.4 Coefficients de transmission

Ce paragraphe présente l'ensemble des coefficients de transmission mesurés suivant le protocole expérimental précédemment présenté, pour des assemblages aluminium / colle / patch, où ce dernier est, soit en plexiglas (épais de 1 ou 3,46 mm), soit en carbone époxy (épais de 1,2 mm). Deux modes incidents ont alternativement été étudiés : d'abord le mode guidé A_0, puis le mode guidé S_0. A chaque fois l'excitation est un signal 5 cycles, de fréquence centrale 350 kHz.

Cas du mode A_0 incident pour l'assemblage avec patch en plexiglas

La figure 3.21 présente les résultats obtenus pour le mode A_0 incident, à 0,4 MHz, le patch étant en plexiglas épais de 1 mm. Les points sur le graphe (a) représentent l'évolution du coefficient de transmission du mode A_0 guidé le long de cet assemblage dont le joint de colle est épais de 0,2 mm et pour lequel la surface d'aluminium est sablée. Les carrés sur le graphe

(b) représentent l'évolution du même mode guidé se propageant le long d'un assemblage dont le joint est épais de 0,35 mm et pour lequel la surface métallique a uniquement été nettoyée.

Au démarrage l'adhésif est fortement visqueux, l'énergie du mode guidé A_0 incident, convertie en mode guidé M_1 se dissipe alors fortement dans la partie tricouche de l'assemblage, et le coefficient de transmission du mode A_0 est (très) faible. Au fur et à mesure que le processus de polymérisation de la colle avance, l'atténuation du mode M_1 diminue car la colle perd en viscosité. Ce mode dissipe de moins en moins d'énergie dans la partie aluminium/colle/patch et par conséquent le coefficient de transmission du mode A_0 augmente jusqu'à atteindre un plateau, qui permet d'identifier, *a priori*, à partir de quel moment les propriétés viscoélastiques du joint cessent d'évoluer.

Ensuite, chacune de ces mesures expérimentales du coefficient de transmission du mode A_0 a été confrontée aux prédictions numériques de son évolution. Les traits pleins représentent les prédictions numériques de la transmission du mode A_0 le long de l'assemblage collé, pour la même épaisseur de colle que celle mesurée expérimentalement. Les lois de variations du C_{11} et du C_{66} de cet adhésif, établies au chapitre 1 (page 31), servent de données d'entrée à ces simulations numériques. Les traits pointillés représentent quant à eux les coefficients de transmission du mode A_0 calculés avec des propriétés du joint de colle (C_{11}, C_{66} et l'épaisseur e_c) légèrement modifiées au sein de leurs intervalles de confiance respectifs, définis lors de la phase de caractérisation présentée au chapitre 1. La loi d'évolution du C'_{66}, présentée page 31, a été abaissée de 10%, et les proportions C''_{11}/C'_{11} et C''_{66}/C'_{66} sont passées de 10 à 5%. L'épaisseur du joint adhésif à également été diminuée, de 0,2 à 0,175 mm ou de 0,35 à 0,32 mm pour les graphes (a) ou (b), respectivement. Ces ajustements des caractéristiques mécaniques et géométriques du joint de colle permettent aux coefficients de transmission du mode A_0 calculés de bien approcher

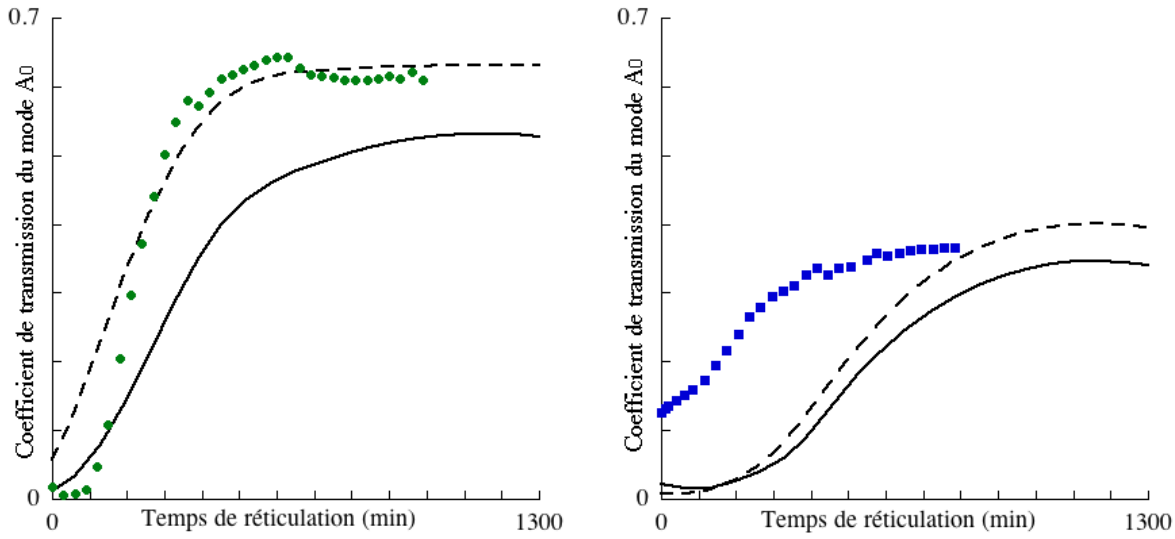


FIGURE 3.21 – Mesures (symboles) et simulation (trait), à 0,4 MHz, du coefficient de transmission du mode A_0 se propageant le long d'une plaque d'aluminium sur laquelle est collé un patch de 1 mm de plexiglas, (a) avec sablage de l'aluminium, pour un joint épais de 0,2 mm (● et ——) et 0,175 mm avec des propriétés ajustées (– – –) et (b) sans sablage de l'aluminium, pour un joint épais de 0,35 mm (■ et ——) et 0,32 mm (– – –).

ceux mesurés, au moins dans le cas du joint le plus mince (figure 3.21(a)). Dans le cas du joint plus épais (figure 3.21(b)), il reste des écarts significatifs entre les coefficients mesurés et calculés. Ceci vient très probablement du fait que ce collage ait été le premier à être réalisé durant cette thèse. Il est tout à fait vraisemblable que le nettoyage de la plaque d'aluminium ait été moins rigoureux, pour ce tout premier assemblage, que pour n'importe lequel de ceux réalisés par la suite. En plus de l'absence de sablage, la surface du substrat métallique peut ainsi être considérée comme polluée. D'une part, l'absence de sablage ne permet pas *a priori* d'assurer une bonne continuité des déplacements et contraintes à l'interface aluminium / colle, ce qui est l'une des hypothèses du modèle employé pour le calcul du coefficient de transmission. Et d'autre part, le nettoyage insuffisant de la surface de l'aluminium, contribue aux désaccords observés entre les coefficients calculés et mesurés. Cet interface de mauvaise qualité a pour effet de piéger l'énergie acoustique du mode incident dans le substrat métallique, d'où un coefficient de transmission mesuré plus élevé que celui prédit, surtout au début de la réticulation où la colle, très visqueuse, ne peut pas jouer son rôle de dissipateur d'énergie ultrasonore comme lorsque l'aluminium a été sablé et la surface correctement nettoyée. Le mode A_0, propagé le long de cette plaque en aluminium, ne « voit » donc pas le processus de réticulation de la colle tel qu'il se produit, et ainsi, le coefficient mesuré ne correspond pas à celui calculé, quelles que soient les valeurs attribuées aux paramètres de cette colle.

Approximativement 200 min après que le collage ait été réalisé les deux courbes expérimentales se croisent. Outre la préparation de la surface de l'aluminium, le principal paramètre à varier entre les deux échantillons est l'épaisseur moyenne du joint. Elle augmente de 75% tandis que le niveau du coefficient de transmission atteint en fin de réticulation baisse de 34%. D'après les simulations réalisées pour ces mêmes épaisseurs de colle, la différence d'épaisseur entre les deux joints explique cette chute du niveau de transmission, puisque entre les deux résultats de calculs la chute du niveau de transmission est également estimée à 34%. Ces observations semblent donc indiquer que la préparation de surface, ici le sablage et le nettoyage du substrat, a une forte influence sur le niveau de transmission du mode A_0 lorsque la colle est en début de réticulation, et que, très vite l'épaisseur du joint de colle devient le paramètre dominant à influer sur le niveau de transmission.

Ce même type de mesures ultrasonores a été réalisé pour un assemblage dont le patch en plexiglas est désormais épais de 3,46 mm. Cette épaisseur a été choisie de manière à ce que les résultats de mesures ultrasonores puissent être confrontés à ceux d'essais de traction uni axiale (essais qui, pour des raisons pratiques n'ont pas pu être réalisés avec le plexiglas épais de 1 mm). Les résultats sont présentés sur la figure 3.22. Le coefficient de transmission du mode guidé A_0 est tracé à 0,4 MHz pour des assemblages dont le joint de colle est épais de $0{,}25^{\pm 0{,}05}$ mm. La plaque d'aluminium est sablée (carrés) ou juste poncée (ronds). Tout d'abord les niveaux maxima du coefficient de transmission du mode A_0 de ces assemblages sont tous les deux atteints après approximativement 600 min de réticulation, ce qui est conforme aux résultats de mesures obtenus avec le patch de 1 mm présentés sur la figure 3.21.

Ensuite le coefficient de transmission du mode A_0 a été enregistré sur un temps largement plus long que pour les mesures précédentes : 2 jours et 2 h (soit 3000 min) contre 23h (soit 1380 min). Il est ainsi possible de vérifier que la réticulation de la colle ne se poursuit pas au delà de 24 heures.

De plus, les niveaux atteints *in fine* par ce coefficient de transmission diffèrent entre eux de 17% approximativement. Cet écart est sans doute imputable à de légères différences entre les

épaisseurs des joints de colle, au fait que l'une des plaques d'aluminium ait été sablée et l'autre non, ou encore aux erreurs de mesures propres au dispositif expérimental. Cependant, les deux coefficients de transmission mesurés correspondent assez bien.

Il est également possible de voir que le niveau maximum du coefficient de transmission est plus faible lorsque le patch est plus épais : il passe de 0,62 pour un patch de 1 mm à $0{,}45^{\pm 0{,}05}$ pour un patch de 3,46 mm, soit une chute de 20 à 35%. Cela peut être dû au fait que, lorsque le patch est épais, les ondes partielles longitudinales et transversales qui y sont générées par rayonnement des ondes guidées provenant de l'aluminium s'y propagent sur une plus grande distance et y dissipent donc plus d'énergie que dans le cas d'un assemblage avec patch mince, induisant ainsi une baisse du coefficient de transmission.

Contrairement aux résultats présentés pour un assemblage aluminium / colle / plexiglas de 1 mm, l'absence de sablage de la plaque d'aluminium ne semble pas augmenter fortement le niveau de transmission du mode guidé A_0 pour les temps de réticulation faibles. La différence par rapport au cas précédent de la figure 3.21(b) est que pour cet assemblage avec patch de 3,46 mm et aluminium non sablé, la surface d'aluminium a été rigoureusement nettoyée. L'influence du sablage est donc plus faible que l'effet induit par une pollution de la surface d'aluminium.

Cas du mode A_0 incident pour l'assemblage avec patch en composite

Il a été précisé dans l'introduction de ce chapitre que deux types d'assemblages seraient étudiés. Dans un premier temps il a été question d'un collage entre un substrat en aluminium et un patch en plexiglas. Ce paragraphe présente les résultats des essais ultrasonores qui ont été obtenus pour un assemblage de type aluminium / colle / composite. Le patch est constitué de plis de carbone époxy avec comme séquence d'empilement $[0°/90°]_{2s}$ et est épais de 1,2 mm. Le coefficient de transmission du mode guidé A_0 a été mesuré suivant le même le protocole que

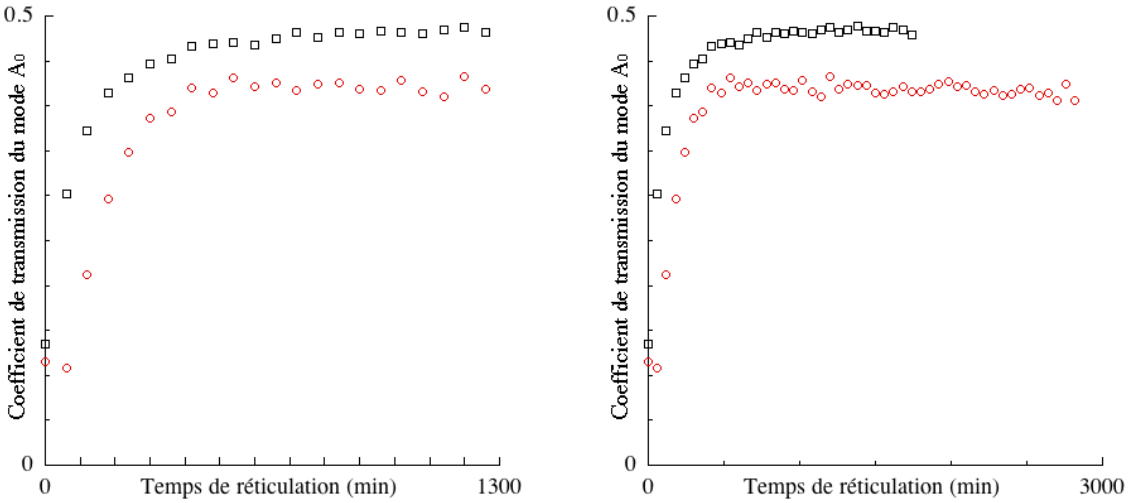


FIGURE 3.22 – Coefficient de transmission du mode A_0 mesuré expérimentalement à 0,4 MHz au cours du processus de réticulation d'un joint épais de $0{,}25^{\pm 0{,}05}$ mm collant une plaque d'aluminium sablée (□) ou juste poncée (○) et un patch de 3,46 mm de plexiglas, (a) entre 0 et 1300 min et (b) entre 0 et 2 jours.

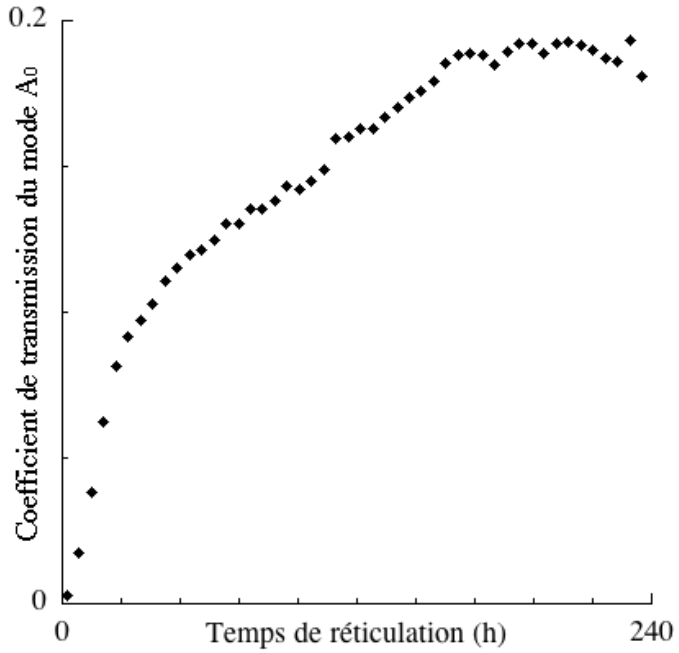


FIGURE 3.23 – Coefficient de transmission du mode A_0 mesuré expérimentalement à 0,34 MHz au cours du processus de réticulation d'un joint épais de 0,2 mm collant une plaque d'aluminium et un patch de 1,2 mm de composite.

pour les assemblages pour lesquels le patch est en plexiglas et décrit au paragraphe 3.3.3. La figure 3.23 représente l'évolution de ce coefficient à 0,34 MHz et pour un collage dont la couche d'adhésif est épaisse de 0,2 mm.

L'évolution du coefficient de transmission du mode guidé A_0 le long de cet assemblage collé est régie par les mêmes phénomènes que ceux mis en jeu pour un assemblage avec patch en plexiglas (cf. page 96). Mais, pour ces mesures, l'échelle des temps pendant laquelle le coefficient de transmission varie est radicalement différente de celle observée avec les assemblages aluminium / colle / plexiglas. Ce coefficient n'atteint pas son niveau maximum avant 7 jours. Une seconde série de mesures, réalisées pour un assemblage avec patch en composite et non présentée ici, a confirmé que le coefficient de transmission du mode A_0 continuait bien d'augmenter pendant plusieurs jours, et non pas durant une dizaine d'heures. La première hypothèse émise pour expliquer cette différence considère que les propriétés de l'adhésif se sont altérées avec le temps. Ce n'est malheureusement pas le cas. Les mesures ultrasonores effectuées sur les assemblages aluminium / colle / composite ont effectivement été réalisées plusieurs mois après celles effectuées sur les assemblages aluminium / colle / plexiglas mince mais un mois avant celles effectuées sur les assemblages aluminium / colle / plexiglas épais. Or tous les résultats de mesure de coefficient de transmission concernant un assemblage avec patch plexiglas montrent que ce coefficient atteint une valeur stable au bout de $10h$ environ (soit 600 min).

Une seconde hypothèse est que la colle époxy étudiée est photosensible. Dans ce cas, la réticulation serait plus rapide pour les assemblages aluminium / colle / plexiglas du fait de la transparence du patch. Cette supposition n'explique pas non plus la différence de temps de réticulation observée avec les deux types d'assemblages car lorsqu'un échantillon est réalisé avec un patch en composite, les bourrelets de colle aux extrémités du patch restent visqueux et

collants au toucher pendant plusieurs jours.

Il est donc envisagé qu'une réaction chimique se produise entre la colle et le patch, et que celle-ci soit favorisée par l'imprégnation de la colle dans le composite qui est assez poreux (surtout en comparaison d'un plexiglas). Une fraction de l'adhésif s'y diffuserait ce qui ralentirait le processus de réticulation de la colle. C'est cette hypothèse qui est retenue pour expliquer la différence de durée du processus de réticulation de l'adhésif entre les assemblages avec patch en plexiglas ou en composite. De ce fait, les lois établies au chapitre 1 (cf. figure 1.13, page 31) pour décrire l'évolution des propriétés mécaniques en fonction du temps de réticulation, ne sont plus valables. Aucune simulation numérique de la transmission d'un mode A_0 le long d'un assemblage aluminium / colle / patch en composite n'a pu être réalisée. Pour ces raisons, la transmission du mode S_0 ne sera pas étudiée dans le cas de l'assemblage avec patch composite.

Cas du mode S_0 incident pour l'assemblage avec patch en plexiglas

L'étude de sensibilité a montré que non seulement l'atténuation du mode M_1, mais également celles des modes M_2 et M_3 se propageant le long d'un assemblage collé étaient sensibles aux propriétés cohésives de l'adhésif. Il a été montré que le mode A_0 incident depuis l'aluminium permet de générer le mode M_1, tandis que le mode S_0 incident depuis l'aluminium permet de générer les modes M_2 et M_3, par conversion modale au niveau de la zone tricouche de l'assemblage. De plus, les composantes du champ de déplacements du mode M_2 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas sont très faibles dans la partie aluminium du multicouche. Cela signifie que, *a priori*, pour cet assemblage seul le mode M_3 est généré par conversion du mode S_0 incident depuis l'aluminium.

La propagation du mode S_0 le long d'une plaque d'aluminium sur laquelle est collé un patch en plexiglas épais de 1 mm a donc été mesurée et simulée à 0,4 MHz pour différents stades de réticulation de la colle. Les résultats sont présentés sur la figure 3.24. Les mesures (points) et les prédictions numériques (traits) suivent le même type d'évolution au cours du processus de réticulation de la colle. Il est intéressant de noter que l'évolution du coefficient de transmission de mode S_0 n'est pas monotone à 0,4 MHz. Ce coefficient, non nul initialement, commence par chuter jusqu'à une transmission quasi nulle puis augmente jusqu'à se stabiliser. C'est également ce qui est prédit par le modèle numérique. Il semblerait donc que lorsque la colle est en début de réticulation l'atténuation de l'onde guidé M_3 se propageant le long du multicouche commence par augmenter jusqu'à une valeur maximale, avant de diminuer au fur et à mesure que le processus de polymérisation de l'adhésif avance. Unwin et Challis [97] ont d'ailleurs mesuré ce même type d'évolution pour l'atténuation d'une onde de cisaillement se propageant au sein d'une colle époxy (différente de celle utilisée ici).

La figure 3.24 montre également quelques différences entre le modèle numérique et les mesures, pour un joint de colle de 0.2 mm : le niveau maximum de transmission atteint est 25% plus faible pour les résultats expérimentaux par rapport aux prédictions numériques. Cet écart peut être réduit si les lois d'évolution du C_{11} de la colle, présentées au chapitre 1 page 31, chutent de 10%. Mais dans ce cas, les courbes expérimentale et calculée sont décalées l'une par rapport à l'autre. Il sera donc nécessaire de réaliser de nouvelles mesures, pour un joint de colle de 0.2 mm afin d'estimer l'erreur de mesure sur le coefficient de transmission du mode S_0 et ainsi permettre un meilleur ajustement des propriétés du joint adhésif.

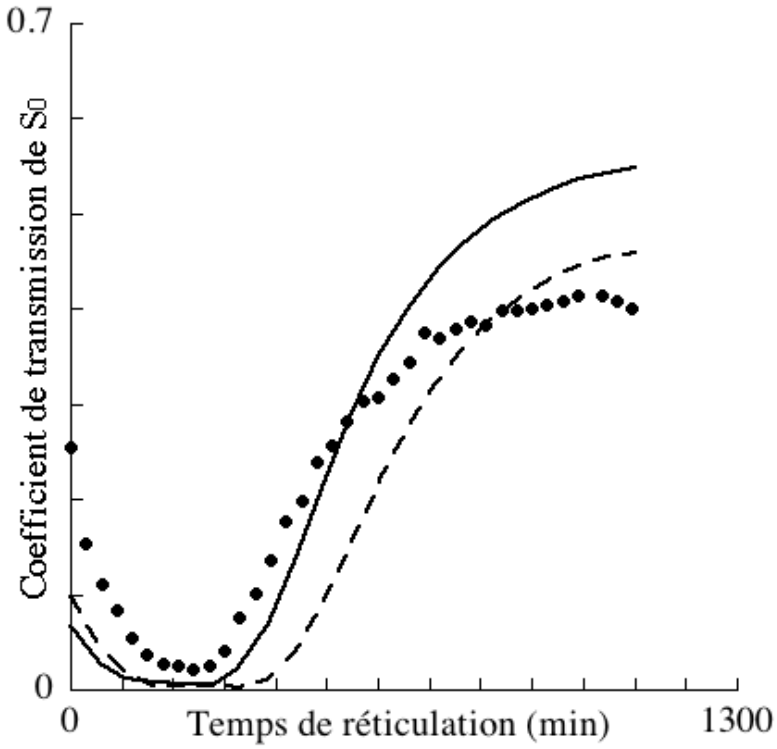


FIGURE 3.24 – Coefficient de transmission d'un mode S_0 se propageant le long d'une plaque d'aluminium sur laquelle est collé un patch en plexiglas de 1 mm, à 0,4 MHz, (•) mesuré lorsque l'aluminium est sablé et le joint de colle épais de 0,2 mm, ainsi que prédit numériquement pour un joint de colle épais de 0,2 mm (——) et pour un joint de colle épais de 0,175 mm dont la loi d'évolution du C_{11} varie de -10% par rapport à celle présentée au chapitre 1 ($-$ $-$ $-$).

3.4 Confrontation des mesures ultrasonores à des essais de traction uni axiale

Les mesures ultrasonores réalisées jusqu'à présent ont permis de mettre en évidence le potentiel et les limites des ondes guidées pour quantifier les modules d'élasticité du joint de colle. Néanmoins ces grandeurs ne renseignent pas sur la résistance à la rupture de l'assemblage, qui constitue la problématique essentielle de l'industriel, en matière de collage. Pour remonter à cette grandeur il est nécessaire de corréler les résultats obtenus par essais ultrasonores à ceux obtenus grâce à des essais mécaniques. En parallèle des mesures ultrasonores qui ont montré que le coefficient de transmission d'un mode A_0 ou S_0 était lié aux C_{ij} de l'adhésif, une campagne d'essais mécaniques, de type traction uni axiale, a été réalisée. Ces essais ont été menés pour deux types d'assemblages : aluminium / colle / plexiglas et aluminium / colle / composite. Dans ce dernier cas, les essais mécaniques permettront de confirmer que le processus de réticulation de la colle se poursuit sur approximativement 7 jours.

3.4.1 Cas d'un assemblage aluminium / colle / plexiglas

Pour des raisons pratiques, les essais de traction ont nécessité d'utiliser un substrat de plexiglas épais (3,46 mm). Les résultats des essais de traction seront donc confrontés aux résultats de mesures ultrasonores présentés sur la figure 3.22.

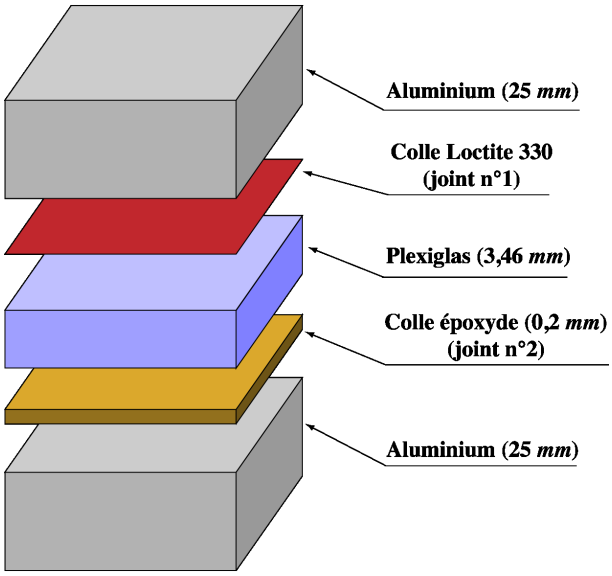


FIGURE 3.25 – Eprouvette de traction utilisée pour les essais mécaniques.

Les essais de traction uni axiale ont été réalisés au CEAT. Les échantillons sont présentés sur la figure 3.25. Ils sont constitués, d'une part d'un bloc d'aluminium de $50 \times 50 \times 25$ mm^3 collé, par l'intermédiaire d'un adhésif époxy « Loctite » (joint de colle n°1 sur la figure 3.25), à une pièce de plexiglas de $50 \times 50 \times 3{,}46$ mm^3, et d'autre part d'un second bloc d'aluminium. Ces deux blocs sont assemblés grâce à la colle époxy à réticulation lente dont les propriétés ont été précédemment étudiées (joint de colle n°2). Afin de relier la force d'arrachement issue des essais destructifs aux propriétés mécaniques du joint de colle mesurées grâce à des essais non destructifs, il est nécessaire que ce soit effectivement le joint de colle n°2 et non pas le joint n°1 qui soit sollicité. La colle Loctite 330 présente l'avantage d'être plus résistante à la traction que celle utilisée au niveau du joint n°2, ce qui répond bien au critère énoncé ci-dessus.

Dix-huit échantillons ont été réalisés en même temps et suivant le même mode opératoire. Les deux blocs d'aluminium ont été nettoyés à l'acétone puis, les faces à encoller ont été émerisées et de nouveau nettoyées. Le bloc de plexiglas a été nettoyé avec de l'alcool éthylique dénaturé, émerisé et de nouveau nettoyé. Le collage n°1 a ensuite été réalisé de la manière suivante : application d'un activateur sur l'une des faces et de la colle Loctite sur l'autre. Les deux faces ont été mises en contact et l'assemblage est laissé pendant $24h$ sous une masse de 250 g. Après ce délai le collage n°2 est à son tour réalisé. Une légère couche de colle époxy est appliquée sur chacune des faces à encoller et ces dernières sont mises en contact. Une masse de 250 g est posé sur l'assemblage pendant 15 min. Les forces d'arrachements ont ensuite été mesurées sur une machine de traction F SCH 25-01 équipée d'un capteur d'effort $10kN$. Les dix-huit éprouvettes ont été testées deux à deux pour les temps de réticulation suivants : 15, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800 et 1200 min.

Les résultats sont présentés sur la figure 3.26. Les forces d'arrachement mesurées s'éche-

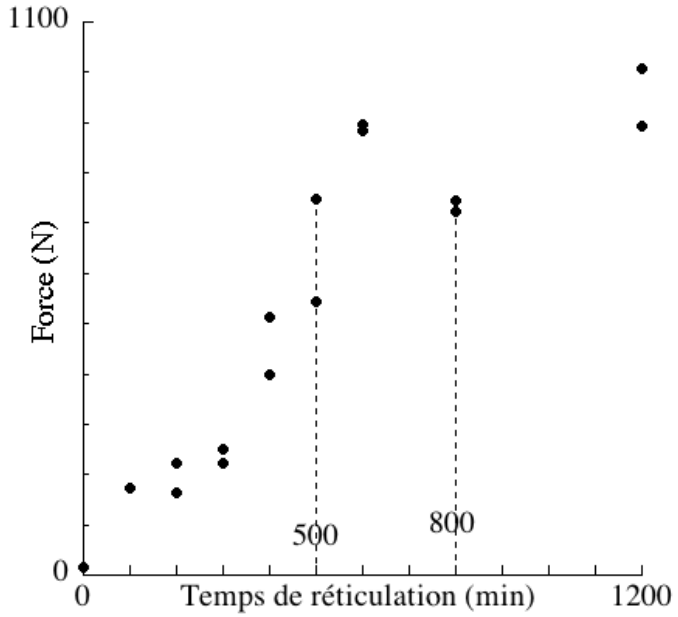


FIGURE 3.26 – Forces d'arrachement obtenues lors d'essais de traction uni-axiale sur un assemblage aluminium / joint n°1 / plexiglas / joint n°2 / aluminium, pour différents temps de réticulation du joint de colle n°2 des éprouvettes présentées sur la figure 3.25.

lonnent entre 17 et $1006N$ avec une bonne reproductibilité entre les deux mesures faites aux différents instants, sauf au temps $t = 500\ min$ où un écart de $201N$ a été obtenu. De plus, il semblerait que les échantillons testés à $t = 800\ min$ aient été défectueux dans la mesure où la force d'arrachement mesurée pour ce temps ($723N$) soit plus faible que celle mesurée 600 min après la réalisation du collage.

Les résultats de ces essais ont été confrontés à ceux des mesures ultrasonores de coefficient de transmission réalisées sur l'assemblage aluminium / colle / plexiglas avec un joint de colle de 0,2 mm et un patch plexiglas épais de 3,46 mm (cf. figure 3.22). Le résultat est présenté sur la figure 3.27. Pour chaque temps de réticulation entre 15 et 1200 min, la force d'arrachement est mise en correspondance avec le coefficient de transmission du mode A_0 mesuré pour ce même temps. La figure 3.27 montre que, entre le temps $t = 300\ min$ et la fin des mesures, la force d'arrachement augmente significativement (82% de la progression totale) alors que le coefficient de transmission du mode A_0 ne varie quasiment plus (11% de la progression totale). Par contre, pendant les 300 premières minutes de la réticulation, le coefficient de transmission varie très fortement alors que la force d'arrachement reste a peu près constante. De ce fait il n'est possible de distinguer que deux zones sur ce graphe. Une première pour laquelle la force d'arrachement est faible et le coefficient de transmission du mode A_0 augmente fortement, elle correspond à un collage de faible à très faible qualité, et une seconde zone pour laquelle c'est l'inverse : elle correspond cette fois à un collage de moyenne à bonne qualité (où le terme « bonne qualité » du joint est à relativiser compte tenu du niveau faible atteint par la force d'arrachement, qui est équivalente à une masse de 400 kg répartie sur la surface du collage). Ces résultats sont donc insuffisants pour pouvoir envisager la mesure ultrasonore du coefficient de transmission

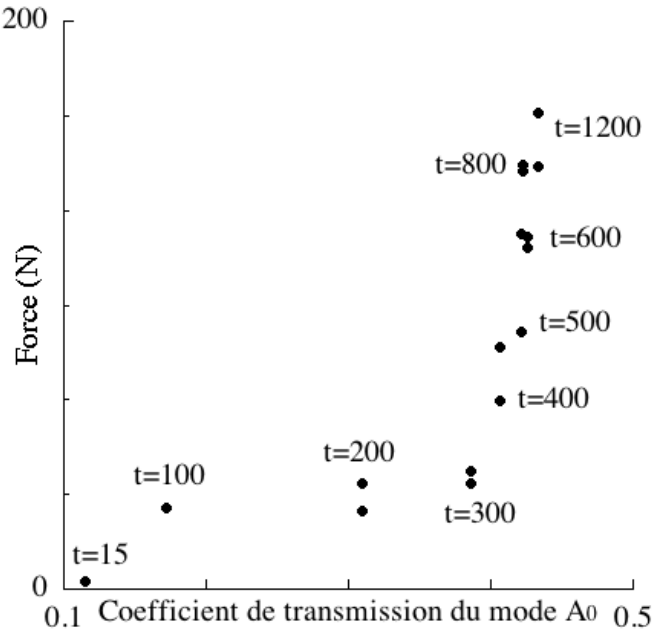


FIGURE 3.27 – Confrontation entre les résultats des essais de traction uni-axiale et des mesures ultrasonores (A_0 incident à 0,4 MHz) réalisés sur un assemblage aluminium / colle / plexiglas de 3,46 mm.

du mode A_0 à 400 kHz comme une technique non destructive d'évaluation quantitative de la tenue mécanique du joint de colle de l'assemblage aluminium / colle / plexiglas.

3.4.2 Cas d'un assemblage aluminium / colle / composite

Cette campagne d'essais mécaniques a été menée avec un assemblage aluminium / colle / composite. Il a, dans un premier temps, permis de vérifier que les propriétés de la colle à réticulation lente évoluent effectivement pendant au moins 7 jours comme semblaient l'indiquer les mesures ultrasonores (cf. figure 3.23). Les échantillons testés sont du même type que les précédents mais en remplaçant le bloc de plexiglas par un bloc de carbone époxy $[0°/90°]_{2s}$ épais de 1,2 mm. Les essais mécaniques ont été réalisés pour les temps suivants : 15, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800 min et 11 jours. Les résultats sont présentés sur la figure 3.28 . Tout d'abord la figure 3.28(a) montre que la force d'arrachement continue d'augmenter jusqu'au 11^e jour. Ce résultat confirme donc ceux obtenus par mesures ultrasonores, à savoir que le contact entre la colle utilisée et ce composite en carbone époxy entraîne un ralentissement très significatif de la réticulation de la colle. Ensuite, l'évolution de cet effort de ruine sur les 20 premières heures de réticulation du joint n°2 est beaucoup plus linéaire que celle obtenue pour l'assemblage précédent (cf. figures 3.26 et 3.28(b)).

Hormis un problème sur l'une des deux mesures effectuées au temps $t = 800$ min, les résultats de ces essais sont très reproductibles, si chaque paire des mesures, accomplies aux différents instants, est considérée. Le niveau maximal, atteint après 11 jours de réticulation, est de l'ordre de $6500N$, soit environ 6 fois plus élevé qu'avec le patch en plexiglas. Ceci pourrait s'expliquer par la diffusion de la colle dans le composite, créant une meilleure accroche au niveau du joint.

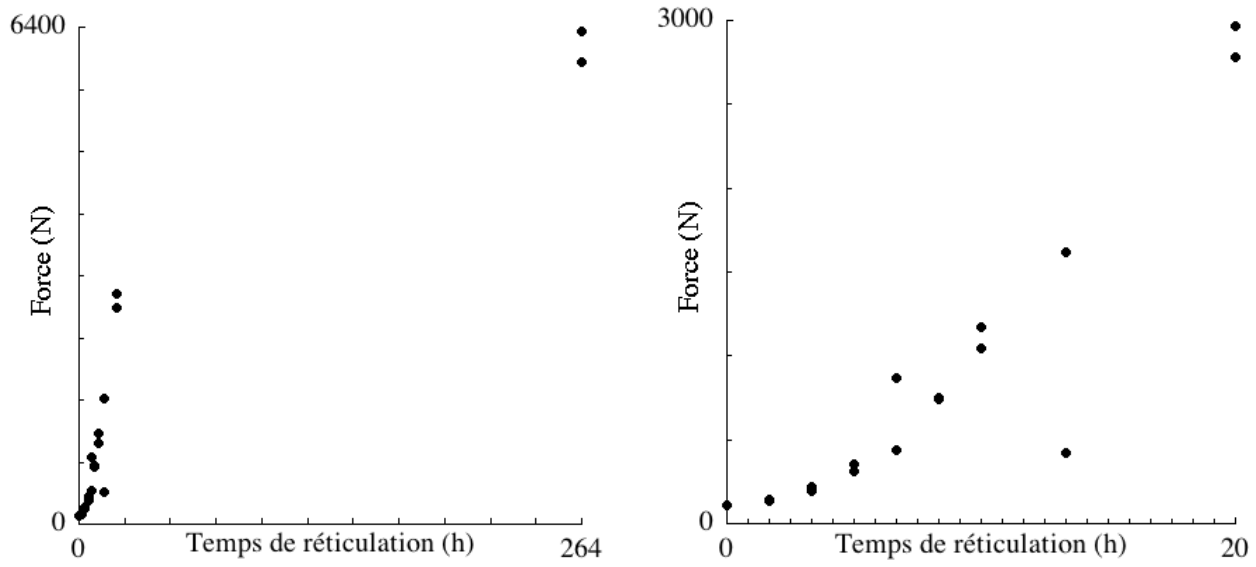
Enfin, lorsque ces résultats d'essais mécaniques sont mis en correspondance avec ceux des essais ultrasonores présentés sur la figure 3.23, l'évolution de la force d'arrachement en fonction du coefficient de transmission du mode A_0 s'avère être linéaire (cf. figure 3.29). Ce résultat indique que la mesure du coefficient de transmission du mode A_0 pourrait éventuellement permettre de quantifier la tenue mécanique (à la traction) d'un collage puisque à un niveau de transmission correspond une seule force d'arrachement (aux erreurs de mesures près). Toutefois, des campagnes supplémentaires seront nécessaires pour confirmer cette tendance et affiner, voire fiabiliser, la correspondance observée ici entre les résultats des mesures destructives et non destructives.

Conclusions

Dans ce chapitre les ondes guidées de type Lamb ont été étudiées. Leur lien avec les propriétés cohésives de deux types de d'assemblages : un premier pour lequel le patch est en plexiglas et un second pour lequel il est en composite, a été mis en évidence par le biais de prédictions numériques et de mesures expérimentales. Dans un premier temps un modèle éléments finis semi analytique à une dimension (SAFE 1D) a permis d'en calculer les courbes de dispersion. En faisant varier les modules de (visco)élasticité, les épaisseurs ainsi que les densités des différents matériaux, il a été possible de choisir à la fois une grandeur ultrasonore et un domaine de fréquences *a priori* propices à une mesure quantitative des propriétés élastiques du joint de colle. Cette étude de sensibilité a permis d'identifier, qu'entre 0,35 et 0,55 MHz, les atténuations des modes guidés M_1, M_2 et M_3 se propageant le long de l'assemblage collé étaient sensibles aux propriétés cohésives de l'adhésif et peu sensibles aux propriétés (visco)élastiques et géométriques des substrats.

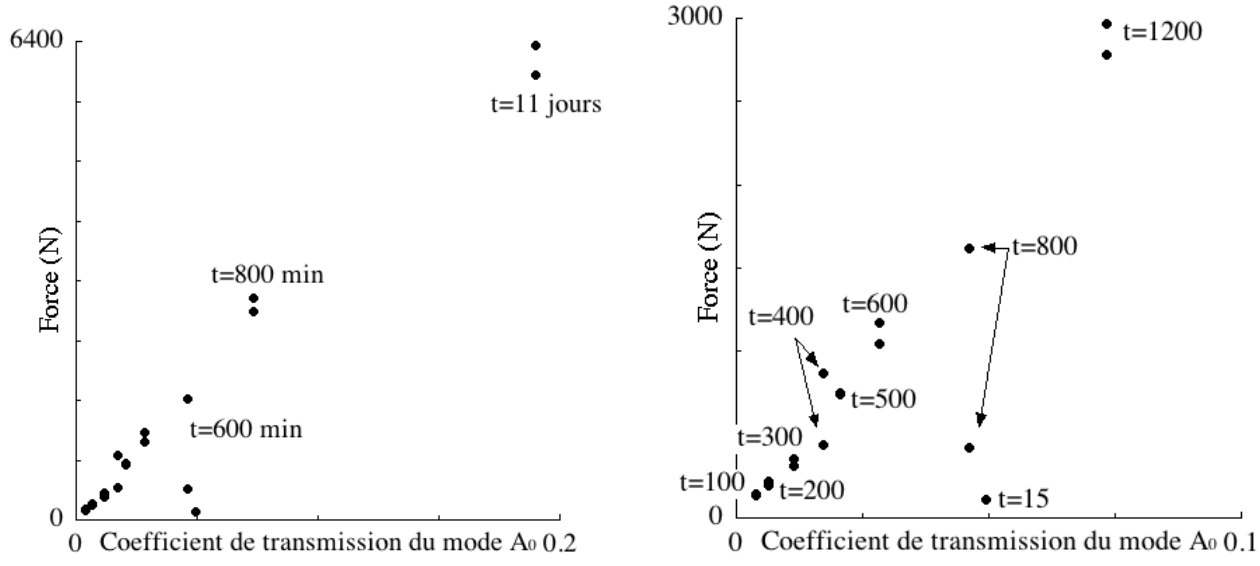
L'atténuation des modes guidés est une grandeur relativement difficile à mesurer expérimentalement. Une manière indirecte d'étudier son évolution a consisté à mesurer le coefficient de transmission d'un mode de Lamb A_0 ou S_0, qui, en se propageant le long de la plaque d'aluminium, donnent naissance, au niveau de la partie multicouche de l'assemblage, aux modes guidés M_1, M_2 et / ou M_3. Ce sont ces modes guidés du tricouche qui vont, d'une part, accumuler de l'information sur les propriétés cohésives de l'adhésif tout au long de leur propagation le long de l'assemblage collé, et d'autre part, y dissiper plus ou moins d'énergie en fonction de l'état cohésif du joint du colle, ce qui affecte la transmission du mode de Lamb se propageant le long de l'aluminium, après le patch. En se basant sur une étude de la distribution des champs de déplacements des modes guidés de l'assemblage collé (que le patch soit en plexiglas ou en composite) et des modes de Lamb se propageant le long d'une plaque d'aluminium de 3 mm, il a été montré qu'un mode A_0 incident permettait au mode M_1 d'être généré par conversion de mode en passant du substrat métallique à la partie tricouche de la structure. De la même manière, un mode S_0 incident permet de générer les modes M_2 et / ou M_3 au niveau de l'assemblage collé.

Des simulations numériques 2D de la propagation des modes A_0 et S_0 le long d'une plaque métallique sur laquelle est collé un patch de plexiglas ont été effectuées, par l'intermédiaire du logiciel COMSOL. Ce sont, respectivement, les amplitudes des modes A_0 ou S_0 incidents depuis l'aluminium et transmis après le patch qui ont été calculées par application d'une relation d'orthogonalité en deux sections droites de la plaque d'aluminium (de part et d'autre du patch). Elles ont permis de calculer les coefficients de transmission de ces modes, et ce pour différents temps de réticulation de la colle. Il a d'abord été montré qu'il était indispensable de considérer la viscoélasticité des matériaux dans les modèles pour pouvoir établir une stratégie d'évalua-



(a) (b)

FIGURE 3.28 – Forces d'arrachement obtenues lors d'essais de traction uni-axiale sur un assemblage aluminium / joint n°1 / composite / joint n°2 / aluminium, pour différents temps de réticulation du joint de colle n°2 des éprouvettes, (a) pour l'ensemble des temps de mesures et (b) pour les temps allant de 15 à 1200 *min*.



(a) (b)

FIGURE 3.29 – Corrélation des essais de traction uni-axiale et des mesures ultrasonores réalisés sur un assemblage aluminium / colle / composite, (a) pour l'ensemble des temps de mesures et (b) pour les temps allant de 15 à 1200 *min*.

tion non destructive des propriétés mécaniques du joint de colle. L'épaisseur moyenne du joint adhésif, ainsi que la présence de bourrelets de colle lorque ce sont les modes A_0 et M_1 qui sont considérés, se sont également avérés être des paramètres critiques pour réussir à estimer les modules d'élasticité de la colle par l'intermédiaire de la mesure du coefficient de transmission d'un mode de Lamb. Enfin les diverses simulations effectuées ont également mis en évidence une relation forte, mais pas exclusive, entre le mode A_0 (respectivement S_0) de l'aluminium et le C_{66} (respectivement C_{11}) de l'adhésif, ce qui a permis d'envisager une estimation des modules de rigidité de la colle par l'intermédiaire d'une mesure des coefficients de transmission des modes A_0 et S_0.

Des essais ultrasonores ont ensuite été réalisés pour différents assemblages. Tout d'abord les mesures effectuées sur un assemblage aluminium / colle / composite ont conduit à des résultats assez surprenants. Le coefficient de transmission du mode A_0 évolue de manière monotone sur une dizaine de jours et non pas sur une dizaine d'heures comme c'était le cas pour l'échantillon verre / colle / verre précédemment caractérisé au chapitre 1. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer ce ralentissement du processus de réticulation. Celle qui a été retenue stipule que, du fait de la porosité du patch composite, une partie de l'adhésif s'y diffuserait et qu'une réaction physico-chimique pourrait être à l'origine de ce ralentissement du processus de polymérisation. Pour leur part, les essais ultrasonores qui ont été menés sur un assemblage aluminium / colle / patch en plexiglas de 1 mm ont montré, comme pour l'échantillon verre / colle / verre, une réticulation complète au bout d'une dizaine d'heures. Les lois d'évolution des C_{11} et C_{66} établies au chapitre 1 ont ainsi pu être utilisées comme données d'entrée aux modèles de simulations numériques de la propagation d'un mode de Lamb le long d'un assemblage collé, et la résolution d'un problème inverse a pu être démarrée. Cette étape a consisté à ajuster, au sein de leurs intervalles de confiance initiaux, les lois d'évolution des modules C_{11} et C_{66} de la colle, pendant le processus de réticulation, ainsi que l'épaisseur du joint adhésif. Néanmoins ces résultats sont à relativiser. En effet, pour pouvoir estimer correctement les modules de rigidité de l'adhésif, il est nécessaire de connaître avec précision les propriétés mécaniques des substrats ainsi que les épaisseurs des différents matériaux.

En parallèle, une campagne d'essais mécaniques a permis de confronter les résultats de mesures ultrasonores du coefficient de transmission du mode A_0 à des forces d'arrachement en traction uni axiale. Les résultats obtenus pour l'assemblage aluminium / colle / plexiglas ont montré qu'il était difficile de se faire correspondre un coefficient de transmission et une unique force d'arrachement. En effet, pendant la première moitié du temps qu'a duré la réticulation, le coefficient a très fortement varié mais pas la charge de ruine, tandis que pendant la seconde moitié de ce temps de réticulation, la force d'arrachement est multipliée par trois alors que le coefficient de transmission n'augmente que de 10% approximativement. De manière beaucoup plus encourageante, la confrontation des essais de traction uni axiale et des mesures ultrasonores réalisés avec un assemblage aluminium / colle / composite a mis en évidence une évolution linéaire du coefficient de transmission en fonction de la force d'arrachement. Ce résultat permet donc d'envisager de remplacer, pour ce type d'assemblage, un essai de traction uni axiale par une mesure ultrasonore, puisqu'à une force d'arrachement correspond un unique coefficient de transmission.

Conclusions et perspectives

Ce travail de thèse s'est inscrit dans le contexte de la réparation de structures aéronautiques par collage de patchs composites. Ce type de réparation est une alternative avantageuse par rapport aux techniques plus conventionnelles de réparation par rivetage ou soudure de structures métalliques dans la mesure où le collage permet de réduire la transmission des efforts ainsi que d'éliminer les zones de concentration de contraintes dues, par exemple, aux rivets. Néanmoins la qualité de ce type de réparations est fortement liée aux procédures de réalisation du collage et les difficultés à prédire de manière fiable la durabilité à long terme ou à contrôler de manière non destructive la qualité des réparations collées freinent le développement de cette technique. Les industriels, et en particulier le CEAT, expriment donc un besoin pressant de mise au point de méthodes d'évaluation non destructive afin de pouvoir non seulement qualifier mais surtout quantifier les performances d'un joint de colle. Même si en pratique la géométrie ainsi que la séquence d'empilement du patch sont adaptées à la réparation, pour ce travail de thèse il a été convenu d'étudier un assemblage simplifié, constitué d'un substrat métallique (une plaque d'aluminium de 3 mm d'épais) sur lequel a été collé un patch rectangulaire de dimensions 100×200 mm^2. Toujours dans le cadre de cette étude, ce dernier était constitué, soit de carbone époxy $[0/90^\circ]_{2s}$, d'épaisseur 1,2 mm, soit de plexiglas, d'épaisseur 1 ou 3,46 mm. En ce qui concerne l'adhésif, il a été décidé de travailler avec une colle époxy à réticulation lente. En choisissant ce type de colle, effectuer des mesures tout au long du processus de réticulation a permis de passer de manière continue d'un collage aux propriétés cohésives et adhésives faibles à un collage aux propriétés cohésives et adhésives dites nominales. L'adhésif considéré ici est un bi-composant. Il est constitué d'une résine Araldite GY 784 BD de chez Hunstman en proportion double d'un durcisseur Aradur 125. Cette colle présente l'avantage de réticuler sur plusieurs heures à température ambiante, ce qui a laissé du temps pour procéder aux essais ultrasonores ou mécaniques.

La première étape de cette étude a été de caractériser les différents matériaux constituant l'assemblage collé. En effet, pour mettre au point une technique ultrasonore d'évaluation non destructive de la qualité d'un joint de colle, il faut sélectionner une onde qui ne soit pas plus sensible aux variations probables des propriétés de l'un ou l'autre des substrats qu'à une variation des propriétés viscoélastiques de l'adhésif. Pour procéder à une étude de sensibilité des ondes ultrasonores aux propriétés mécaniques des différents matériaux de l'assemblage, il a donc été nécessaire de simuler la propagation en faisant varier divers paramètres représentatifs des propriétés géométriques ou mécaniques des composants de l'assemblage. Il a fallu avoir des jeux de valeurs de ces paramètres, servant de données d'entrée aux logiciels de simulation. Chacun des matériaux constituant l'assemblage a donc été caractérisé au moyen de techniques ultrasonores. Cette campagne de mesures a permis de déterminer les épaisseurs, les densités et surtout les modules de viscoélasticité de chacun des matériaux de l'assemblage, y compris ceux de la

colle à différents instants au cours du processus de réticulation. Les résultats de mesures ont été obtenus avec une précision qui a défini, dans toute la suite de l'étude, le domaine de variabilité des propriétés de l'aluminium et du patch.

De part leurs propriétés, les ondes guidées accumulent de l'information sur la qualité du milieu tout au long de leur propagation. Elles peuvent être décomposées en deux grandes familles : les ondes de Lamb, qui sont polarisées dans le plan de propagation de l'onde, et les ondes guidées SH, dont le vecteur polarisation est orthogonal au plan de propagation de l'onde. Le chapitre 2 traite de l'étude de ces ondes guidées SH. Il a permis de mettre 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 entre une plaque d'aluminium de 3 mm et un patch composite de 1,2 mm. Dans un premier temps une étude de sensibilité des vitesses de phase des 4 premiers modes SH aux propriétés viscoélastiques d'un assemblage collé a permis d'identifier un domaine de fréquences ($[0{,}2 - 0{,}4]$ MHz) pour lequel il a été possible de mesurer expérimentalement les propriétés en cisaillement d'un adhésif, sans être perturbé par une variation des propriétés des substrats. Parallèlement, la distribution des champs de déplacements et de contraintes des modes SH a permis de comprendre la manière dont les propriétés viscoélastiques des matériaux influent sur ces ondes guidées. En traçant ces distributions pour différentes fréquences, il a ainsi été possible d'étayer les résultats concernant les domaines de sensibilité des ondes SH à la qualité d'un collage. Des mesures de vitesses de phase ont ensuite été réalisées puis confrontées aux résultats issus des simulations numériques. Un mode SH_0 incident depuis l'aluminium peut être converti en modes de type SH_0 et / ou SH_1 au niveau de la partie tricouche de la structure. Les résultats expérimentaux ont montré que, tant que l'adhésif réticule, seul le mode SH_1 est détecté en surface du multicouche, tandis que, une fois la polymérisation de la colle achevée, les modes de type SH_0 et SH_1 (dans une moindre mesure) sont tous les deux détectés à la surface du composite. Donc si seul le mode SH_1 est détecté, ce type de mesures peut permettre de révéler un assemblage pour lequel le collage s'est dégradé avec le temps. Finalement, un problème inverse a été résolu pour obtenir le module de cisaillement du joint de colle à différents stades de réticulation. Toutefois, même si les modes ou fréquences sélectionnés lors de cette procédure de caractérisation ont été choisis pour leur forte sensibilité au joint de colle plutôt qu'aux substrats, la précision des résultats obtenus pour le module de Coulomb évalué doit être relativisée. En effet, la bonne connaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques de l'aluminium et du patch, ainsi que de l'épaisseur du joint adhésif, reste indispensable pour garantir la fiabilité des valeurs estimées du module de cisaillement de la colle. Pour conclure cette étude il est encore nécessaire de confronter les résultats des essais ultrasonores à ceux d'essais mécaniques. De cette manière il sera possible (ou non) de relier le module de Coulomb estimé par l'intermédiaire des mesures de vitesse de phase à une valeur, si possible unique, de résistance à la rupture. Ceci permettrait de répondre à une question fondamentale posée par les industriels, à savoir si une mesure ultrasonore non destructive peut (ou pas) permettre d'évaluer une charge de ruine.

Le chapitre 3 a été consacré à l'étude de la propagation d'ondes de type Lamb le long d'une plaque en aluminium sur laquelle a été collé un patch. Deux matériaux ont été considérés pour le patch : du plexiglas d'épaisseur 1 mm ou 3,46 mm, puis du carbone époxy d'épaisseur 1,2 mm. De manière assez surprenante, des temps de réticulation très différents ont été observés, de l'ordre de dix heures avec le patch en plexiglas contre plusieurs jours avec le patch en carbone époxy, et cela malgré des procédures de collage identiques. Plusieurs hypothèses ont

été avancées pour expliquer ce changement. Celle retenue stipule que, du fait de la porosité du patch composite, une partie de l'adhésif y serait diffusée, produisant une réaction physico-chimique qui serait à l'origine du ralentissement du processus de réticulation. Cette supposition a été confortée par quelques tests ou essais mécaniques. Malgré tout, les deux types de patch ont été considérés pour les prédictions numériques de la sensibilité des ondes de Lamb aux caractéristiques des substrats ou du collage, ainsi que pour les essais expérimentaux. Dans un premier temps, les sensibilités des vitesses de phase des 7 ou 5 premiers modes de Lamb, respectivement selon que le patch soit en plexiglas ou en composite, aux densités, épaisseurs ou modules de (visco)élasticité des trois composants, ainsi qu'aux raideurs k_L et k_T de l'interface aluminium/colle, ont été prédites numériquement. Il a été montré que, même si ces vitesses sont sensibles aux propriétés cohésives d'un collage, cette sensibilité est moins prononcée que celle mise en évidence pour les ondes SH_0 et SH_1. Par contre, des calculs supplémentaires ont montré que les atténuations des trois premiers modes guidés dans la partie tricouche (appelés M_1, M_2 et M_3) étaient plus dépendantes des propriétés viscoélastiques de l'adhésif que de celles des substrats, entre 0,35 et 0,55 MHz. Cette quantité ultrasonore de ces trois modes a donc présenté un intérêt particulier pour notre problématique. Toutefois, compte tenu des difficultés expérimentales pour mesurer ces atténuations directement sur la zone de collage, une approche indirecte a été proposée. Elle consiste à mesurer le coefficient de transmission d'un mode de Lamb se propageant le long de la plaque d'aluminium, et traversant la zone sur laquelle a été collé le patch. En effet, ce mode guidé incident depuis la plaque d'aluminium se convertit au niveau de la partie multicouche de l'assemblage en modes guidés M_1, M_2 et/ou M_3 ayant des amplitudes variables, qui vont à leur tour se reconvertir en un mode de même nature que le mode incident, mais cette fois de l'autre coté du patch. Le coefficient de transmission de ce mode est le rapport entre ses amplitudes après et avant le patch. Il va dépendre de l'énergie qu'auront dissipée les modes M_1, M_2 et M_3 le long du tricouche, donc de leurs atténuations. Ce coefficient a été mesuré et/ou calculé pour les modes incidents A_0 puis S_0, pour des patchs en plexiglas ou en composite. Dans cette démarche, il a d'abord été mis en évidence la nécessité de considérer la viscoélasticité des matériaux dans les modèles pour pouvoir établir une stratégie d'évaluation non destructive des propriétés mécaniques du joint de colle. Ensuite, il a été montré que la géométrie du joint de colle pouvait avoir des effets variables : son épaisseur moyenne a un effet notable sur le coefficient de transmission (plus important dans le cas du mode S_0 que A_0), la non uniformité de cette épaisseur a des effets assez négligeables, et enfin la présence de bourrelets de colle autour de la zone tricouche a un effet négligeable sur le coefficient de transmission du mode S_0, et modéré sur celui du mode A_0. Les diverses simulations effectuées ont permis aussi de mettre en évidence une relation forte entre le mode A_0 (respectivement S_0) de l'aluminium et M_1 (respectivement M_2 et M_3) du tricouche. De même, un lien direct et prononcé (mais pas exclusif) a été établi entre ces modes A_0 et M_1 et le module C_{66} de l'adhésif, ainsi qu'entre les modes S_0, M_2 et M_3 et le module C_{11} de l'adhésif, ouvrant des perspectives claires sur une stratégie possible pour l'identification de ces modules. Ensuite, des mesures expérimentales de ces coefficients de transmission ont été effectuées et confrontées, tant que possible, aux coefficients calculés. Ces calculs n'ont pas été possibles dans le cas du patch composite, car ils s'appuient sur les lois d'évolution des modules C_{11} et C_{66} de la colle, qui ont été établies au chapitre 1, avec l'échantillon verre/colle/verre. En effet, cette caractérisation initiale de la colle a révélé une réticulation sur une dizaine d'heures, comme lors de l'étude des ondes de Lamb avec l'assemblage aluminium / colle / plexiglas, et non pas sur plusieurs jours comme constaté avec l'assemblage aluminium/colle/composite. Par conséquent, les lois

d'évolution des modules C_{11} et C_{66} de la colle, établies au chapitre 1, ont pu être utilisées comme données d'entrée pour simuler les coefficients de transmission des modes S_0 ou A_0, dans le cas du patch en plexiglas, mais pas pour celui en composite. Les résultats obtenus avec le patch en plexiglas de 1 mm ont révélé des tendances très similaires entre les coefficients de transmission mesurés et calculés, durant la réticulation. Les quelques différences observées ont pu être nettement réduites en ajustant les lois des modules C_{66} ou C_{11} de l'adhésif, ainsi que l'épaisseur de ce joint, dans les intervalles de confiance de leurs mesures initiales établies au chapitre 1. Les liens précédemment observés, respectivement entre les modes A_0 ou S_0 et les modules C_{66} ou C_{11} de l'adhésif, ont servi dans la démarche adoptée pour ajuster ces deux modules. C'est donc la résolution d'un problème inverse qui a été clairement amorcée, mais il faut toutefois rappeler que ces modules de la colle peuvent être ainsi évalués, à condition que les caractéristiques géométriques et mécaniques des substrats, ainsi que l'épaisseur de ce joint adhésif, soient très bien connues.

Les mesures des coefficients de transmission du mode A_0, dans le cas du patch en plexiglas de 3,46 mm ou du patch en composite, ont servi de base pour des confrontations avec des résultats d'essais de traction uni axiale, dans le but de faire se correspondre une force d'arrachement et une grandeur ultrasonore. La corrélation entre la charge de ruine et le coefficient de transmission d'une onde guidée A_0 s'est avérée moins bonne dans le cas du patch en plexiglas que dans celui du patch en composite. Dans le premier cas, le coefficient de transmission varie fortement durant la première moitié de la durée totale de réticulation, alors que la force d'arrachement reste toujours faible. Ensuite, ce coefficient change très peu alors que la force varie fortement. La relation très peu monotone ainsi observée n'a pas permis d'associer un niveau unique de résistance du joint à une mesure ultrasonore. Par contre, dans le cas du patch composite, la valeur du coefficient de transmission évolue de manière linéaire avec la force d'arrachement mesurée, tout au long de la réticulation, ce qui permet aisément d'envisager le remplacement d'un essai de traction uni axiale par une mesure non destructive pour estimer la charge de ruine en traction de ce type d'assemblage collé.

Finalement, que ce soit à l'aide des modes SH_0 ou SH_1, ou des modes de Lamb A_0 ou S_0, leurs vitesses de phase au niveau de la zone de collage, ou leur transmission par cette zone, ont montré clairement qu'elles transportaient suffisamment d'informations sur le collage pour permettre d'évaluer les modules de rigidité de l'adhésif. Toutefois, les campagnes de simulations numériques ont indiqué que ces modules étaient essentiellement représentatifs des propriétés cohésives, et aussi que les valeurs obtenues lors d'une inversion étaient dépendantes de la bonne connaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques des substrats, ainsi que de l'épaisseur du joint adhésif. De plus, il faut préciser que les modules ainsi mesurés sont des quantités réelles, représentatives de l'élasticité de la colle. Bien que, a priori, la rigidité de l'adhésif soit suffisante pour appréhender la tenue mécanique du joint, s'il était nécessaire de connaître aussi sa viscoélasticité, il faudrait alors pousser davantage les simulations numériques pour identifier des quantités ultrasonores adaptées. Par exemple, l'atténuation des modes SH, ou encore la combinaison entre la vitesse de phase de modes SH et la transmission de modes de Lamb, pourraient être des pistes menant aux parties imaginaires des modules C_{11} et C_{66} de la colle.

D'autre part, les résultats de mesures ultrasonores des vitesses de phase des modes SH_0 et SH_1, obtenus au chapitre 2, demandent encore à être confrontés à des résultats d'essais mécaniques. Grâce à cette étude, il a été possible d'évaluer le module de Coulomb d'un joint de colle situé entre une plaque d'aluminium et un patch composite. Il sera donc nécessaire

de choisir un essai destructif qui sollicite le joint de colle en cisaillement. Il est ainsi envisagé de confronter ces résultats de mesures ultrasonores à ceux que pourront fournir des essais de type « wedge test » [98]. Cet essai, qui correspond à la norme ASTM D3762-03 (« Standard Test Method for Adhesive-Bonded Surface Durability of Aluminium »), consiste à créer une amorce de fissure à l'une des extrémités du joint, à y insérer un coin, et à mesurer les variations de longueur de cette fissure. Cette donnée expérimentale permet ensuite de calculer l'énergie critique de fracture, G_c, en fonction de la vitesse, v, de propagation du front de fissure. C'est ce couple (v,G_c) qui permettra d'estimer soit la qualité de l'interface, si la fissure se propage à l'interface, soit celle du collage, si la fissure se propage au coeur de la colle.

Ensuite, l'analyse de courbes de dispersion a montré que les phénomènes de propagation d'ondes guidées étaient vraiment spécifiques à un assemblage, même lorsque les différences sont minimes (par exemple entre un patch en plexiglas de 1 mm, ou en carbone époxy de 1,2 mm). Pour répondre de manière plus précise aux exigences industrielles, il serait judicieux de vérifier dans quelle mesure le travail mené durant cette thèse est transposable à d'autres types d'assemblages collés (différents matériaux, différentes géométries ou colles). Il serait intéressant de commencer par travailler sur le même assemblage aluminium / colle / patch que celui qui a été étudié ici, mais en changeant de type de colle : par exemple un adhésif de type Redux (fréquemment employé en aéronautique), avec des niveaux de cohésions bien distincts, par exemple un collage réalisé dans des conditions optimales, un pour lequel la polymérisation de la colle est incomplète et un pour lequel le joint est saturé en eau. Le dispositif expérimental, utilisé pour mesurer les vitesses de phase des modes guidés, pourrait également être amélioré, particulièrement grâce à l'utilisation de transducteurs de type EMATs (« ElectroMagnetic Acoustic Transducer ») pour générer les modes SH dans l'aluminium [42].

Enfin, ce travail de thèse a mis en évidence les liens qui existent entre certaines ondes guidées (SH_0, SH_1, M_1, M_2 et M_3) et les propriétés mécaniques d'un joint de colle de 0,1 à 0,35 mm situé entre un substrat métallique épais de 3 mm et un patch (en composite ou en plexiglas) épais de 1 mm approximativement. Les travaux réalisés ici permettent ainsi d'envisager une stratégie d'évaluation non destructive pour vérifier la qualité d'un collage juste après sa réalisation ou pour détecter des joints de colle ayant vieilli (par exemple en milieu humide). Pourtant, en ce qui concerne les réparations de structures aéronautiques par collage de patch, le point le plus critique n'est pas le joint de colle en lui-même mais l'interface aluminium / colle. Or les études de sensibilité aux propriétés de l'assemblage collé, menées en considérant les premières ondes guidées de type Lamb (5 à 7 premiers modes) ou de type SH (3 premiers modes), n'ont pas révélé de domaines de fréquences, ou de grandeurs ultrasonores qui permettraient d'envisager une stratégie de caractérisation non destructive de cette interface. Même en considérant les ondes guidées (Lamb ou SH) d'ordre plus élevé lors d'une étude de sensibilité, il semble très peu probable qu'elles amènent des informations supplémentaires sur la qualité de l'interface aluminium / colle. En effet les superpositions des courbes de dispersion des assemblages collés avec celles des substrats seuls ont montré que plus le domaine de fréquences était haut, plus les caractéristiques des modes guidés de l'assemblage tendaient vers celles de l'un ou l'autre des substrats. Dans ces conditions il est vraisemblable que les modes guidés d'ordres élevés soient plus sensibles à une variation des propriétés mécaniques de l'un ou l'autre des substrats plutôt qu'à celle de l'interface en question.

Une autre piste pour caractériser les propriétés de l'interface substrat métallique / adhésif pourrait consister à exploiter la réponse non linéaire de cette interface lorsque cette dernière est soumise à une excitation ultrasonore de forte amplitude. Lorsqu'elles sont ainsi sollicitées, les

interfaces « respirent » (« clapping effect » en anglais) et génèrent une réponse non linéaire qui peut se manifester par l'apparition d'harmoniques (d'ordre plus élevé ou pas) de la fréquence d'excitation, ou se manifester par des phénomènes de modulation de fréquences [99–103]. Par exemple, Rokhlin et al. [99] combinent une méthode linéaire de spectroscopie avec une modulation acoustique pour caractériser la qualité d'un collage. Ils montrent que pour une interface de bonne qualité aucun phénomène non linéaire n'est mesurable, tandis que lorsque l'interface est dégradée une modulation de fréquences apparaît dans la réponse acoustique du système. Yan et al. [102] ont également recours à l'acoustique non linéaire pour détecter expérimentalement des « kissing bonds », ces défauts d'interfaces où l'adhésif et le substrat sont en contact mais sans adhérer l'un à l'autre convenablement. Ce type de mesures ultrasonores, c'est à dire la détection d'éventuelles harmoniques, pourrait être envisagé avec des ondes guidées de type Lamb ou SH qui présentent l'avantage de cumuler de l'information concernant les milieux de propagation, pour évaluer l'effet d'une pollution d'interface et/ou de différentes préparations de surface, telles que le sablage ou l'application d'un promoteur d'adhésion. Ainsi plus l'interface serait de mauvaise qualité (pas ou peu d'accroche entre la colle et les substrats) et plus les effets non linéaires devraient être marqués. Une mesure de l'amplitude des harmoniques pourrait alors permettre de différencier différents niveaux d'adhésion de l'interface métal / colle de l'assemblage considéré.

Annexe A

Profil des champs de déplacements et de contraintes du mode de type SH_0 se propageant le long d'un assemblage aluminium / colle / composite

C'est dans le domaine des basses fréquences, avant et autour de la fréquence de coupure du mode SH_1, que les vitesses de phase du mode SH_0 s'est avérée être suffisamment sensible aux propriétés mécaniques du joint de colle, et suffisamment peu sensible aux propriétés mécaniques et géométriques des substrats. Pour comprendre pourquoi cette forte sensibilité se situe dans les basses fréquences, les distributions des champs de déplacements et de contraintes de l'assemblage ont été investiguées à deux fréquences : 0,2 MHz et 0,5 MHz. Rappelons que ces deux fréquences sont représentatives, respectivement, d'un cas où la sensibilité de ce mode est davantage liée aux propriétés de la colle, et d'un second cas où elle est principalement liée aux propriétés des substrats. Les figures A.1 et A.2 sont construites exactement de la même manière que les figures 2.9 et 2.10 présentées pages 48 et 48, elles montrent le déplacement u_3 ainsi que les contraintes σ_{23} et σ_{13} créés par le mode SH_0, respectivement, à 0,2 et 0,5 MHz.

De la même manière que pour l'analyse menée pour le mode SH_1, réalisée au chapitre 2, la figure A.1 montre que la distribution des champs dans l'épaisseur du guide est plus affectée par une chute de 40%, ou plus, du module de cisaillement du joint de colle, que par une variation, au sein de leurs intervalles de confiance, de l'une ou l'autre des propriétés mécaniques, c'est à dire du C_{44} ou du C_{55}, de chacun des substrats. Ces différents profils justifient bien de la plus forte sensibilité du mode SH_0 aux modules de cisaillement de l'adhésif plutôt qu'aux propriétés des substrats.

La figure A.2 est construite à l'identique de la précédente mais à 0,5 MHz. A cette fréquence le mode SH_0 est tout aussi sensible aux modules de cisaillement des substrats qu'à celui de la colle. Comme pour le mode SH_1, même une réduction de 85% du C_{44} de la colle ne perturbe pas plus la distribution des champs dans l'épaisseur du mode SH_0 qu'une variation de $\pm 5\%$ (respectivement $\pm 10\%$) du module de cisaillement de l'aluminium (respectivement du patch composite). A noter que la remarque, faite au chapitre 2, sur la plus forte sensibilité de la contrainte σ_{23} au module de Coulomb de la colle qu'à ceux des substrats (cf. page 50) est tout à fait transposable à la contrainte σ_{23} crée par le mode SH_0.

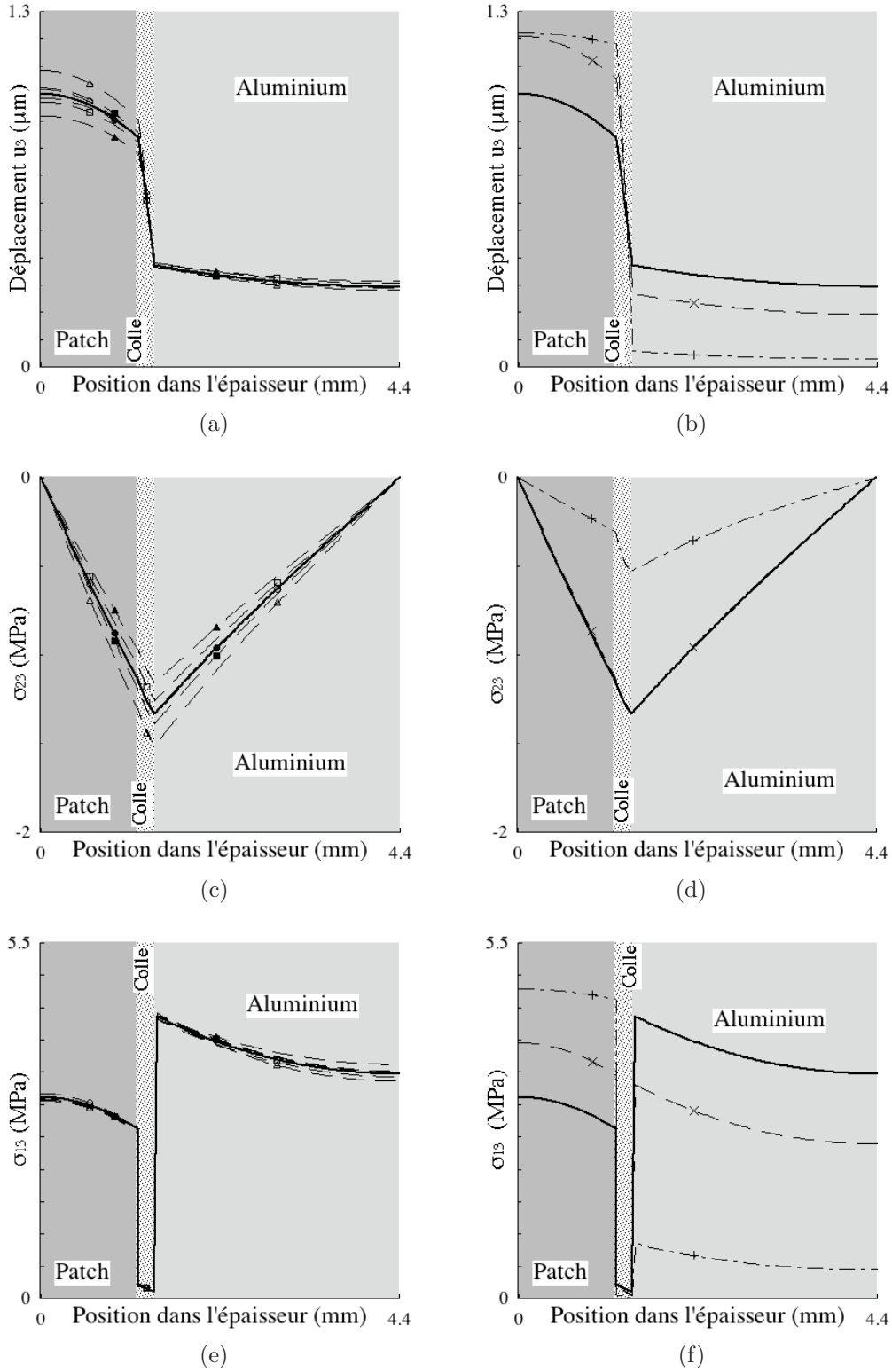


FIGURE A.1 – Prédictions numériques de la distribution dans l'épaisseur des déplacements (a) et (b), de la contrainte σ_{23} (b) et (d), et de la contrainte σ_{13} (e) et (f), normalisés en puissance. (—-) pour un assemblage de propriétés nominales ; colonne de gauche pour les variations de propriétés des substrats : +5% ($-\blacksquare-$) et −5% ($-\square-$) du C_{44} de l'aluminium, +10% ($-\blacktriangle-$) et −10% ($-\triangle-$) du C_{44} et +10% ($-\bullet-$) et −10% ($-\circ-$) du C_{55} du patch composite ; colonne de droite pour les variations de propriétés de la colle : −40% ($-\times-$) et −85% ($-+-$) du C_{44} de la colle. Mode SH_0 à 200 kHz.

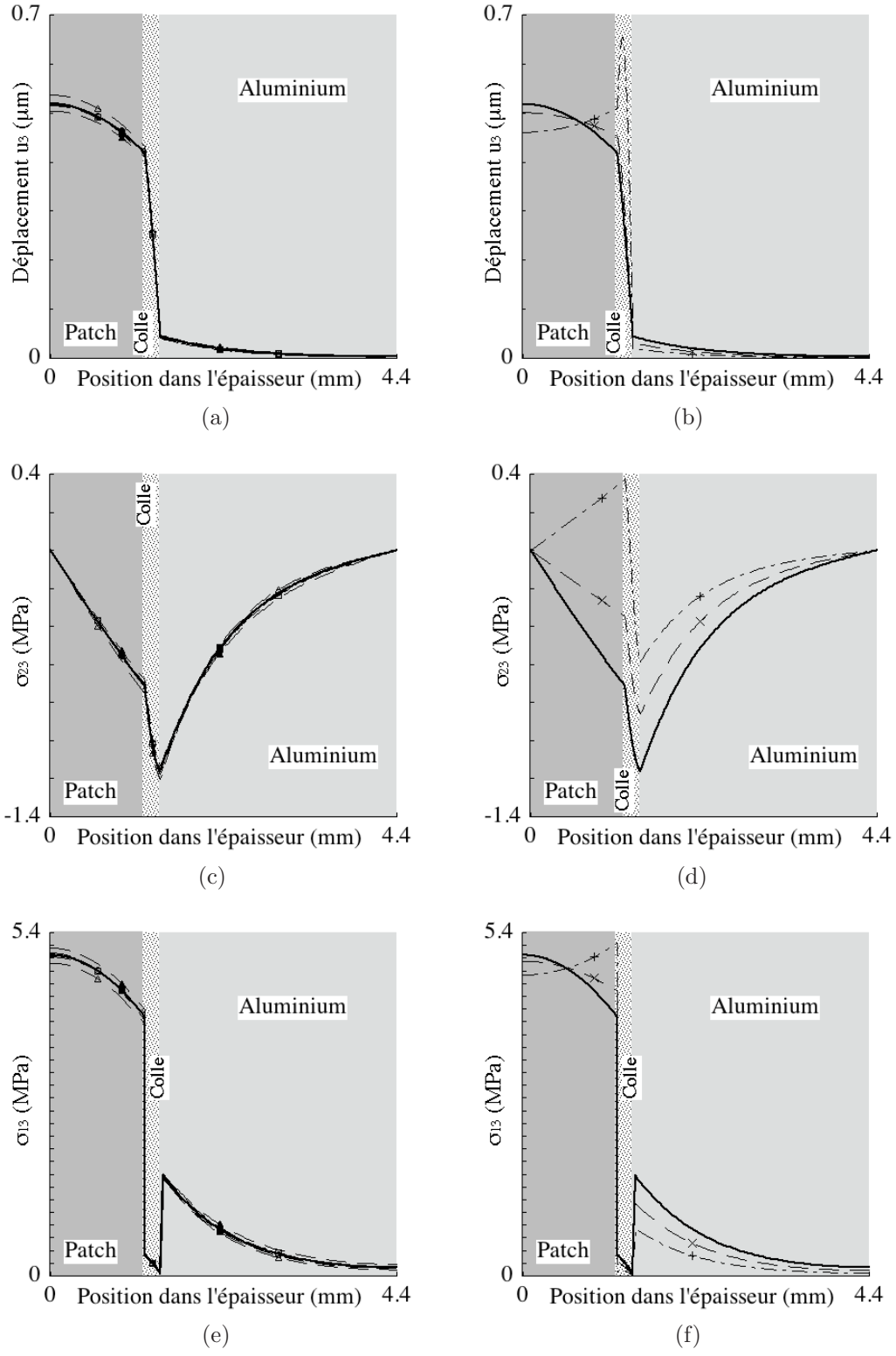


FIGURE A.2 – Prédictions numériques de la distribution dans l'épaisseur des déplacements (a) et (b), de la contrainte σ_{23} (b) et (d), et de la contrainte σ_{13} (e) et (f), normalisés en puissance. (—-) pour un assemblage de propriétés nominales ; colonne de gauche pour les variations de propriétés des substrats : +5% ($-\blacksquare-$) et −5% ($-\square-$) du C_{44} de l'aluminium, +10% ($-\blacktriangle-$) et −10% ($-\triangle-$) du C_{44} et +10% ($-\bullet-$) et −10% ($-\circ-$) du C_{55} du patch composite ; colonne de droite pour les variations de propriétés de la colle : −40% ($-\times-$) et −85% ($-+-$) du C_{44} de la colle. Mode SH_0 à 500 kHz.

Annexe B

Compléments à l'étude de sensibilité des ondes SH aux propriétés mécaniques des matériaux d'un assemblage aluminium / colle / composite

Cette annexe est un complément à l'étude de sensibilité des ondes SH_0 et SH_1 aux propriétés viscoélastiques d'un collage. La figure B.1 présente l'évolution de la vitesse d'énergie en fonction d'une variation des modules de (visco)élasticité de l'aluminium, du composite, ainsi que des propriétés de la colle et de l'interface.

Cette figure montre, d'une part que la vitesse d'énergie du mode SH_0 est peu sensible à une variation de $\pm 5\%$ des modules d'élasticité de l'aluminium pour tout le domaine de fréquences considéré et d'autre part que ce mode est sensible aux propriétés viscoélastiques du patch, puisqu'une variation de $\pm 10\%$ de ses C_{ij} entraîne une variation de $\pm 5\%$ de la vitesse d'énergie de ce mode. Néanmoins, cette variation est constante dans tout le domaine de fréquences considéré. La figure B.1(c) montre que la vitesse d'énergie de ce mode SH_0 est également sensible aux modules de viscoélasticité de la colle. Une mesure de la vitesse d'énergie, dans ce domaine de fréquences, permettrait vraisemblablement de distinguer des assemblages collés dont le joint de colle n'a pas fini de réticuler, grâce à une chute plus ou moins localisée de la vitesse d'énergie. Par exemple, un tricouche dont la colle n'a réticulée que pendant $4h10$ ($250\ min$) est fortement dispersif entre 0,35 et 0,5 MHz, tandis que le mode SH_0 se propageant le long d'un tricouche dont la colle a réticulé pendant $6h40$ ($400\ min$) est dispersif entre 0,6 et 0,8 MHz. Finalement, même si la valeur de la vitesse d'énergie du mode SH_0 de l'assemblage est affectée par une variation des modules de viscoélasticité du patch composite, comme cela n'affecte pas la dispersivité du mode, une mesure des propriétés du joint de colle reste envisageable.

Une analyse similaire peut être faite en ce qui concerne la vitesse d'énergie du mode SH_1 en fonction des propriétés des différents matériaux, mais pour un domaine de fréquences plus restreint : $[0{,}35 - 0{,}8]\ MHz$. En effet, l'influence d'une variation de $\pm 5\%$ ou $\pm 10\%$ des C_{ij} de l'aluminium ou du patch, est plus forte pour ce mode guidé. Il convient donc de se placer dans un domaine où, même si la vitesse d'énergie du mode SH_1 varie, ce mode reste néanmoins non

dispersif. Dans ce cas, certains états cohésifs de la colle peuvent être distingués de l'état nominal (propriétés de la colle réticulée) : ce sont les assemblages pour lesquels le C_{66} de l'adhésif varie entre 0,05 et 0,27 GPa.

Enfin la vitesse d'énergie de ces deux modes guidés ne présente pas de sensibilité suffisante aux propriétés de l'interface aluminium / colle pour pouvoir être utilisée lors d'une mesure des caractéristiques adhésives de l'assemblage considéré.

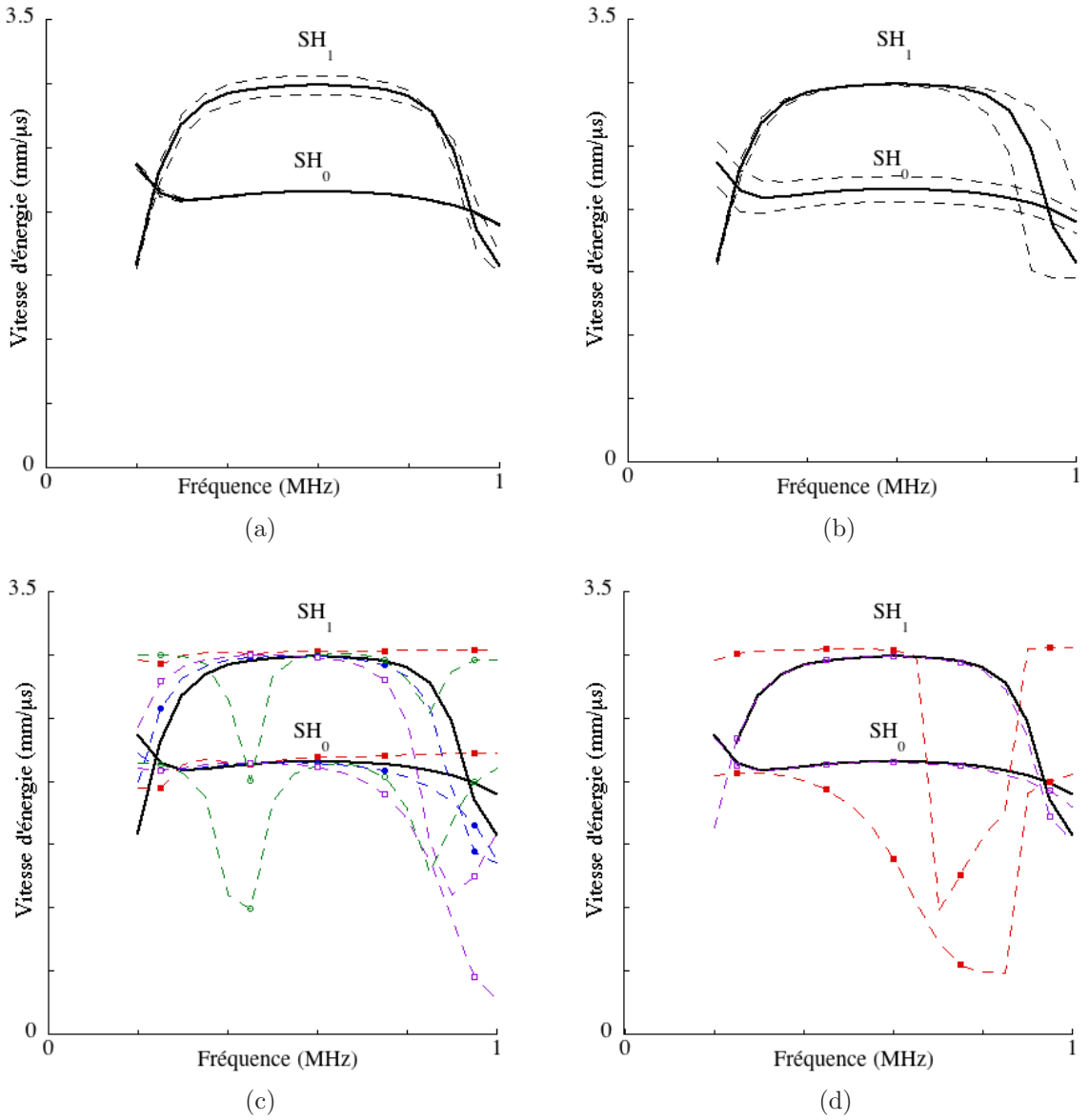


FIGURE B.1 – Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse d'énergie des modes SH_0 et SH_1 d'un assemblage collé (—-) (a) à une variation de ±5% du $C_{44} = C_{55}$ de l'aluminium (– –) ; (b) à une variation de ±10% des C_{44} et C_{55} du patch (– –) ; (c) à une chute de 27% (– ● –), 50% (–□–), 90% (– ○ –) et 99% (–■–) du $C_{44} = C_{55}$ de la colle et (d) à une chute de 50% (–□–) et 99% (–■–) du k_T de l'interface.

Annexe C

Implémentation sous COMSOL de la méthode SAFE 1D à trois variables

Principe

Plusieurs méthodes ont été développées dnas le littérature afin de calculer les solutions de l'équation de dispersion. Lorsque le guide est de type plaque ou cylindre, fait de matériaux homogènes ou multi-couches, isotropes ou anisotropes, les méthodes matricielles telles que la méthode des matrices de transfert ou la méthode des matrices d'impédance de surface permettent d'obtenir les courbes de dispersion, ainsi que la distribution des champs de déplacements, de contraintes et du flux de puissance des modes guidés [56,69,70]. Mais elles se révèlent inadéquates lorsque le guide est de section arbitraire. C'est principalement pour cette raison que la méthode SAFE (pour« Semi Analytical Finite Element method » en anglais) a été développée [71–75]. Cette technique permet de calculer les courbes de dispersion, les champs de déplacements et de contraintes ainsi que le flux de puissance dans l'épaisseur du guide considéré, que les matériaux soient isotropes ou anisotropes, élastiques ou viscoélastiques. Dans le cas où le guide d'ondes est de type plaque, les courbes de dispersion ainsi que les champs peuvent être calculer soit par l'intermédiaire de cette méthode, soit par l'intermédiaire d'une méthode matricielle. L'avantage majeur d'un modèle basé sur la méthode des éléments finis par rapport à une méthode matricielle est qu'il est possible de modéliser des variations spatiales, telles que des défauts localisés, des propriétés mécaniques des matériaux constituant le guide d'onde.

L'onde plane considérée se propage suivant la direction 1. Le déplacement $\mathbf{U}$ s'écrit de la manière suivante :

$$\mathbf{U} = u_i(x_2,x_3)e^{I(kx_1-\omega t)} \tag{C.1}$$

où $i = 1,2,3$.

Cette manière d'écrire le déplacement et tout particulièrement le terme de propagation permet de ne considérer que la section droite du guide, et donc de travailler avec un modèle à deux dimensions d'espace. Dans tout ce travail de thèse, les guides sont de type plaque, le problème est invariant par translation suivant l'axe $\boldsymbol{x_3}$ (cf. figure 3.4), un modèle 1D, suivant l'épaisseur du guide, est alors suffisant pour obtenir les courbes de dispersion de l'assemblage grâce à la méthode SAFE. Le principe consiste à résoudre l'équation du mouvement sous forme d'équation aux valeurs propres. Les solutions obtenues sont des couples (f,k) où f est la fréquence et k le nombre d'onde complexe du mode. Tous les modes propagatifs (nombre d'onde réel ou de partie imaginaire négligeable), fortements atténués (nombre d'onde complexe dont les parties

réelle et imaginaire sont du même ordre de grandeur) et évanescents (nombre d'onde imaginaire ou à partie réelle négligeable) existants à la fréquence f font partie de l'ensemble de solutions. Lorsque la géométrie et les propriétés mécaniques du guide sont symétriques par rapport au plan médian, l'ensemble de solutions regroupe généralement les ondes de Lamb et les ondes SH. Si l'assemblage n'est pas symétrique, l'ensemble de solutions regroupe ainsi des modes guidés polarisés dans le plan de propagation ou polarisés hors plan de propagation.

Pour des matériaux anisotropes, l'équation d'équilibre dynamique pour un problème aux valeurs propres peut être mise sous la forme suivante dans le domaine Ω [73] :

$$C_{ijkl}\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} + I(C_{i1kj} + C_{ijk1})\frac{\partial (ku_k)}{\partial x_j} - kC_{i1k1}(ku_k) + \rho\omega^2\delta_{ik}u_k = 0 \tag{C.2}$$

pour i = 1,2,3 avec une sommation sur les indices k = 1,2,3 et j,l = 2,3. δ_{ik} représente de symbole de Kronecker.

Sur les frontières $\partial\Omega$ du domaine, la contrainte $\mathbf{T} = \bar{\bar{\boldsymbol{\sigma}}} \cdot \mathbf{n}$ s'écrit :

$$T_i = C_{ijkl}\frac{\partial u_k}{\partial x_l}n_j + IC_{ijk1}(ku_k)n_j \tag{C.3}$$

Implémentation COMSOL

Le formalisme utilisé par le logiciel COMOL, pour résoudre un problème aux valeurs propres, est le suivant :

$$\begin{cases} \nabla \cdot (c\nabla u + \alpha u - \gamma) - au - \beta \cdot \nabla u + d_a\lambda u - e_a\lambda^2 u = 0 & \text{dans } \Omega \\ \mathbf{n} \cdot (c\nabla u + \alpha u - \gamma) + qu = g & \text{sur } \partial\Omega \\ hu = r & \text{sur } \partial\Omega \end{cases} \tag{C.4}$$

où c,α,a,β,d_a,e_a,q et g peuvent être des coefficients scalaires, vectoriels ou matriciels dont le sens physique dépend du problème considéré, où u représente le vecteur déplacement et λ la valeur propre recherchée. Si c,γ et α sont uniformes, alors le système C.4 s'écrit également de la manière suivante :

$$\begin{cases} c_{ijkl}\dfrac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l} + (\alpha_{ijk} - \beta_{ijk})\dfrac{\partial u_j}{\partial x_k} - a_{ij}u_j + \lambda d_{ij}u_j - \lambda^2 e_{ij}u_j = 0 & \text{dans } \Omega \\ c_{ijkl}\dfrac{\partial u_j}{\partial x_l}n_k + \alpha_{ijk}u_j n_k - \gamma_{ik}n_k + q_{ij}u_j = g_i & \text{sur } \partial\Omega \\ h_{ij}u_j = r_i & \text{sur } \partial\Omega \end{cases} \tag{C.5}$$

où i = 1,2,3 et avec la règle de sommation implicite.

En raison de l'expression du vecteur contrainte défini par la relation C.3, il est nécessaire de définir la variable u sous COMSOL comme le vecteur $(u_1,u_2,u_3,v_1,v_2,v_3)^T$ avec $v_i = ku_i$ pour i = 1,2,3.

De cette manière en identifiant les équations C.2 et C.3 au système C.5 il est finalement possible d'établir les expressions suivantes pour les différents coefficients :

$$c = \begin{pmatrix} C_{66} & C_{26} & C_{46} & 0 & 0 & 0 \\ C_{26} & C_{22} & C_{24} & 0 & 0 & 0 \\ C_{46} & C_{24} & C_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \mathrm{a} = \begin{pmatrix} -\rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\rho\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\rho\omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\rho\omega^2 \end{pmatrix}$$

$$d_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -C_{11} & -C_{16} & -C_{15} \\ 0 & 0 & 0 & -C_{16} & -C_{66} & -C_{56} \\ 0 & 0 & 0 & -C_{15} & -C_{56} & C_{55} \\ -\rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho\omega^2 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \mathrm{e_a} = \gamma = 0$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -IC_{16} & -IC_{66} & -IC_{56} \\ 0 & 0 & 0 & -IC_{12} & -IC_{26} & -IC_{25} \\ 0 & 0 & 0 & -IC_{14} & -IC_{46} & -IC_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \beta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & IC_{16} & IC_{12} & IC_{14} \\ 0 & 0 & 0 & IC_{66} & IC_{26} & IC_{46} \\ 0 & 0 & 0 & IC_{56} & IC_{25} & IC_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Les conditions aux limites sont modélisées par l'intermédiaire d'une condition de type Neumann (seconde équation du système C.5). Au niveau de l'interface patch / colle cette condition aux limites peut être écrite de manière à assurer la continuité des déplacements et des contraintes entre les deux milieux. Les surfaces extérieures de l'empilement sont libres de contraintes, les termes q et g de la seconde équation du système C.5 y sont égaux à zéro. Enfin la condition de Neumann définie au niveau de l'interface aluminium / colle peut être écrite de manière à ce que les contraintes soient continues et qu'un saut de déplacement soit autorisé :

$$T_1 = k_T \Delta u_1 \tag{C.6}$$
$$T_2 = k_L \Delta u_2 \tag{C.7}$$
$$T_3 = k_T \Delta u_3 \tag{C.8}$$

où k_L et k_T (N/m^3) représentent deux densités surfaciques de ressorts en traction/compression et en cisaillement, respectivement, uniformes sur l'interface considérée, et où $\Delta u_{1,2,3} = \pm|u_{1,2,3}^{\text{adhésif}} - u_{1,2,3}^{\text{aluminium}}|$ désigne le saut de déplacement autorisé, dont le signe dépend du milieu à partir du-

quel cette condition est écrite. Dans ce cas, q est nul et on a :

$$\begin{aligned} g_1 &= T_1 \\ g_2 &= T_2 \\ g_3 &= T_3 \\ g_4 &= 0 \\ g_5 &= 0 \\ g_6 &= 0 \end{aligned}$$

où T_1, T_2 et T_3 sont définis par les équations C.6, C.7 et C.8, respectivement. A noter les dimensions 1×6 ou 6×6 des vecteurs et matrices dues aux quatre variables u_1, u_2, u_3, v_1, v_2 et v_3 initialement définies.

Classement des modes

Une fois les calculs effectués, le logiciel fournit pour chaque fréquence f l'ensemble des nombres d'onde k des ondes existantes dans le guide, qu'elles soient propagatives, fortement atténuées ou encore évanescentes. Avant de pouvoir tracer les courbes de dispersion il est donc nécessaire de trier les couples solutions (f,k). Ce procédé est réalisé par l'intermédiaire du logiciel Matlab. L'objectif de cette routine de post-traitement est de regrouper entre eux les modes propagatifs, les modes fortement atténués et les modes évanescents. Ensuite au sein de chaque famille, les modes SH seront séparés des modes de Lamb et enfin les ondes de Lamb seront classées en modes antisymétriques et symétriques le cas échéant, c'est à dire lorsque le guide est symétrique par rapport à son plan médian.

Les différentes étapes de l'algorithme peuvent être synthétisées de la sorte :

1. *Importation des solutions calculées sous COMSOL.* Pour chaque fréquence cette liste regroupe les nombres d'onde dont la partie réelle est positive (propagation dans le sens des x_1 positifs) et négative (propagation dans le sens des x_1 négatifs). Pour éviter toute répétition seuls les k dont la partie réelle est positive sont retenus.
2. *Tri des modes propagatifs.* Ces modes sont ceux dont le nombre d'onde est réel ou à faible partie imaginaire.
   - Sélection des modes SH. Ce sont les seuls modes guidés dont la polarisation est hors plan de propagation. Ces modes sont donc séparés des autres grâce à leur déplacement non nul suivant la direction x_3.
   - Sélection des modes de Lamb. Ils regroupent tous les autres modes propagatifs. Lorsque le guide est symétrique par rapport au plan médian, il est possible de les séparer :
     - en modes antisymétriques, ceux pour lesquels le déplacement normal u_2 est identique aux surfaces inférieure et supérieure du guide.
     - en modes symétriques, tous les modes restants de la famille considérée.
3. *Tri des modes évanescents.* Ces modes sont ceux dont le nombre d'onde est à partie réelle négligeabble. L'algorithme procède de la même manière que précédemment pour séparer les modes SH des modes de Lamb.
4. *Tri des modes non propagatifs.* Ces modes sont ceux dont le nombre d'onde est un nombre complexe dont les parties réelle et imaginaires sont du même ordre de grandeur. Encore une fois le processus est le même pour trier les modes SH et les modes de Lamb.

Une fois cette classification effectuée il est possible de calculer, tracer ou exporter le nombre d'onde, l'atténuation, la vitesse de phase ou encore la vitesse d'énergie de chacun des modes dont l'étude fait l'objet.

Annexe D

Zoom de la figure 3.8(e)

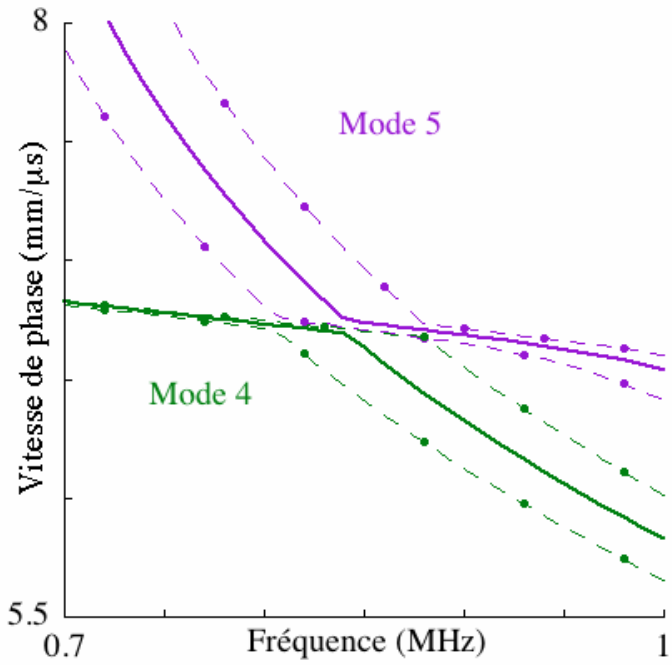


FIGURE D.1 – Zoom de la figure 3.8(e) présentée page 75.

Annexe E

Sensibilité des ondes de Lamb à un assemblage aluminium/colle/composite

Comme expliqué dans le chapitre 3 (cf. page 74), la sensibilité de l'atténuation ainsi que de la vitesse d'énergie des ondes de type Lamb, à l'épaisseur et à la densité des matériaux constituant un assemblage collé avec patch en composite est examinée. Les figures E.1 et E.2 représentent leurs évolutions respectives, en fonction d'une variation de $\pm p\%$ de l'épaisseur, où $p = 5$ pour les substrats et $p = 15$ pour la colle (colonne de gauche) et de $\pm 3\%$ de la densité (colonne de droite).

Imposer de telles variations aux propriétés du joint de colle n'influence ni l'atténuation ni la vitesse d'énergie des 5 premiers modes guidés se propageant le long de l'assemblage aluminium / interface / colle / composite. Les colonnes de droite de ces deux figures montrent également que les modes 1, 2, 3 ainsi que la fréquence de coupure du mode 4 ne sont pas sensibles à une variation de $\pm 3\%$ de la densité de l'un ou l'autre des substrats.

L'atténuation des modes guidés 3, 4 et 5 est quant à elle fortement influencée, de l'ordre de $\pm 10\%$ au delà de 0,6 MHz, par une variation de l'épaisseur de la plaque d'aluminium. Cette influence se traduit par un décalage en fréquences des courbes d'atténuation considérées. Une épaisseur plus ou moins épaisse de la couche de carbone époxy modifie également les courbes de dispersion en atténuation mais de manière plus faible : de l'ordre de 7% pour le mode 1 au delà de 0,6 MHz, de 6% pour la fréquence de coupure du mode 4 mais de plus de 30% pour les modes 2 et 3 aux fréquences comprises entre 0,4 et 0,6 MHz, où l'atténuation de ces modes varie fortement. L'atténuation reste donc un paramètre exploitable pour évaluer les propriétés cohésives et/ou adhésives du joint de colle à condition de ne considérer que le mode 1 ou la fréquence de coupure du mode 4.

En ce qui concerne les vitesses d'énergie, celles des modes 4 et 5 ainsi que celle du mode 3, aux fréquences supérieures à 0,5 MHz, sont fortement influencées (jusqu'à $\pm 20\%$) par une variation d'épaisseur des substrats. Cela ne permet donc pas d'envisager une évaluation non destructive des propriétés du joint de colle, par l'intermédiaire de la mesure d'une vitesse d'énergie de l'un de ces modes. En revanche, les vitesses d'énergie des modes 1, 2 et 3 aux fréquences inférieures à 0,4 MHz y sont suffisamment peu sensibles pour pouvoir faire l'objet d'études plus approfondies.

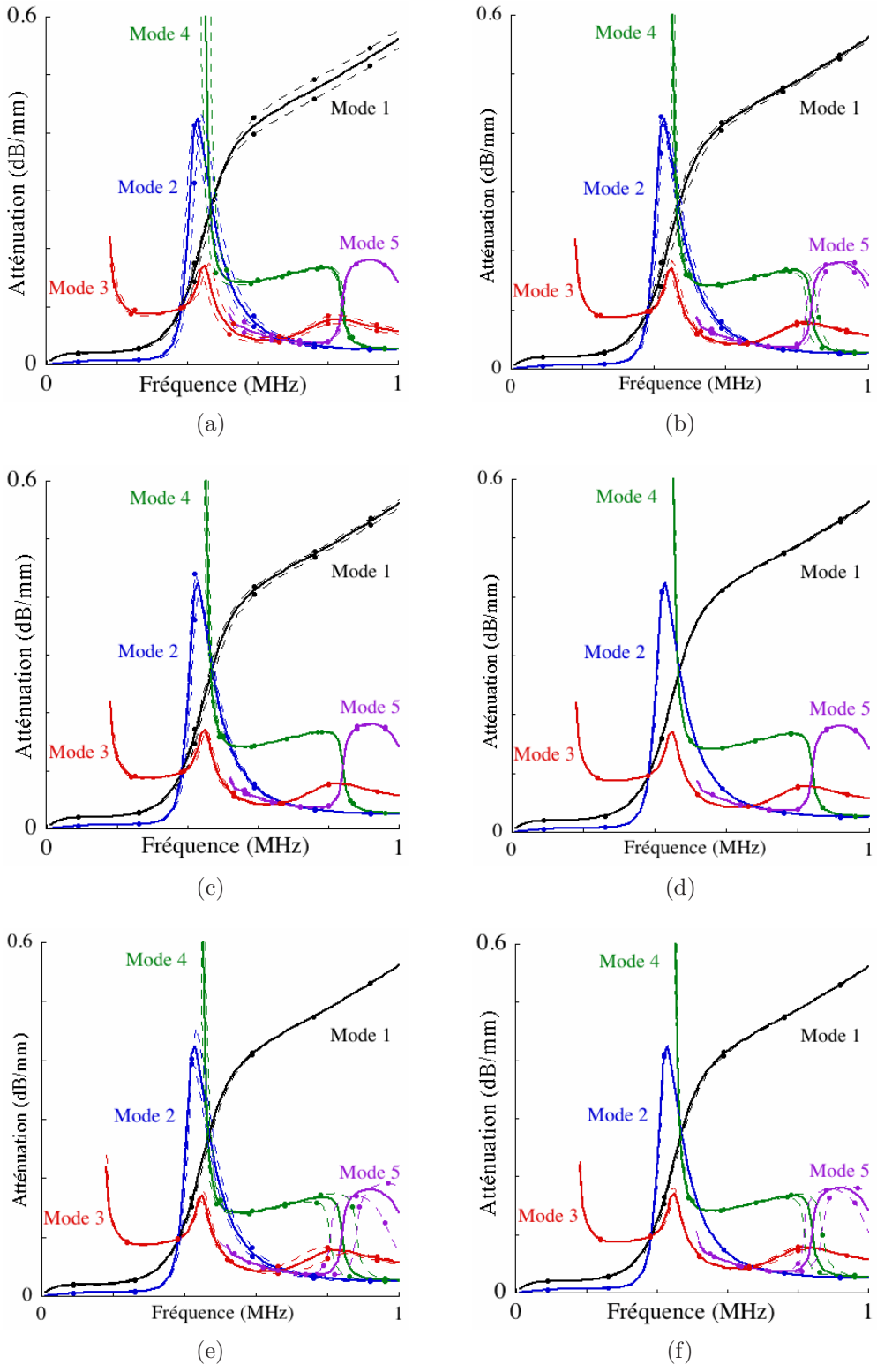


FIGURE E.1 – Prédictions numériques de la sensibilité de l'atténuation des 5 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage collé avec patch en composite à un changement de ±5% de l'épaisseur (colonne de gauche) et à ±3% de la densité (colonne de droite) du patch (a) et (b), de la colle (c) et (d) et de l'aluminium (e) et (f). Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (—-) et pour une propriété modifiée (– • –).

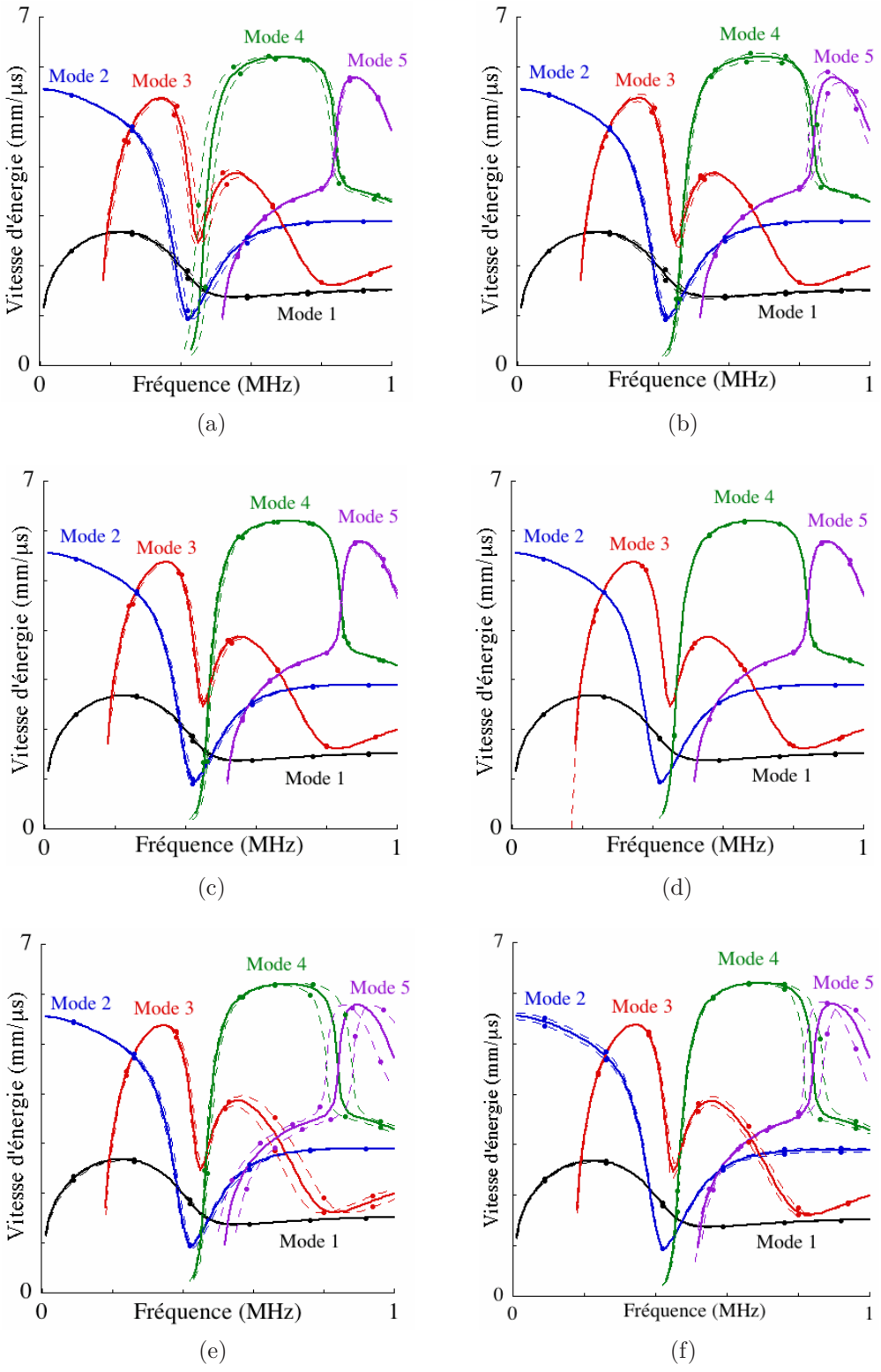


FIGURE E.2 – Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse d'énergie des 5 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage collé avec patch en composite à un changement de ±5% de l'épaisseur (colonne de gauche) et à ±3% de la densité (colonne de droite) du patch (a) et (b), de la colle (c) et (d) et de l'aluminium (e) et (f). Calculs pour des propriétés nominales de l'assemblage collé (—-) et pour une propriété modifiée (– • –).

Annexe F

Sensibilité des ondes de Lamb à un assemblage aluminium / colle / plexiglas

La figure F.1 présente l'influence d'une variation de l'ensemble des C_{ij} de chacune des couches constituant l'assemblage collé, sur l'évolution de la vitesse de phase des 7 premiers modes guidés qui peuvent s'y propager. Tout d'abord les sous-figures (a) et (b) montrent que la vitesse de phase des modes 5, 6 et 7 varie de $\pm 10\%$ lorsque les modules de viscoélasticité de l'aluminium et du plexiglas varient de $\pm 5\%$.

A contrario, pour les fréquences inférieures à 0,4 MHz, les vitesses de phase des modes M_1 et M_2, ou bien la fréquence de coupure du mode M_3, sont plus sensibles à une chute de 30%, ou plus, des modules de viscoélasticité du joint de colle, plutôt qu'à une variation de $\pm 5\%$ des C_{ij} de l'un ou l'autre des substrats. Mais, comme dans le cas de l'assemblage avec patch en composite, une mesure des vitesses de phase du mode M_2 ou M_3 ne permet pas d'évaluer le C'_{11} mais le C'_{66} du joint de colle.

La sensibilité de l'atténuation de ces trois premiers modes guidés aux modules de viscoélasticité des différents matériaux a donc été considérée. Les résultats sont présentés sur la figure F.2. Tout d'abord les figures F.2(a) et (b) montrent qu'une variation des C_{ij} des substrats, au sein de leurs intervalles de confiance, influence peu les atténuations de modes guidés de l'assemblage en deçà de 0,8 MHz. Ensuite, les atténuations de ces modes peuvent prendre des valeurs assez élevées, jusqu'à 14 dB/cm. Comme expliqué dans le chapitre 3, page 79, une onde dont l'atténuation est supérieure à 4 dB/cm ne sera que très difficilement détectée. Finalement, ce sont les atténuations des modes M_1, M_2 et M_3 entre 0,4 et 0,8 MHz qui semble être les meilleures candidates pour pouvoir quantifier la qualité de ce type de collage.

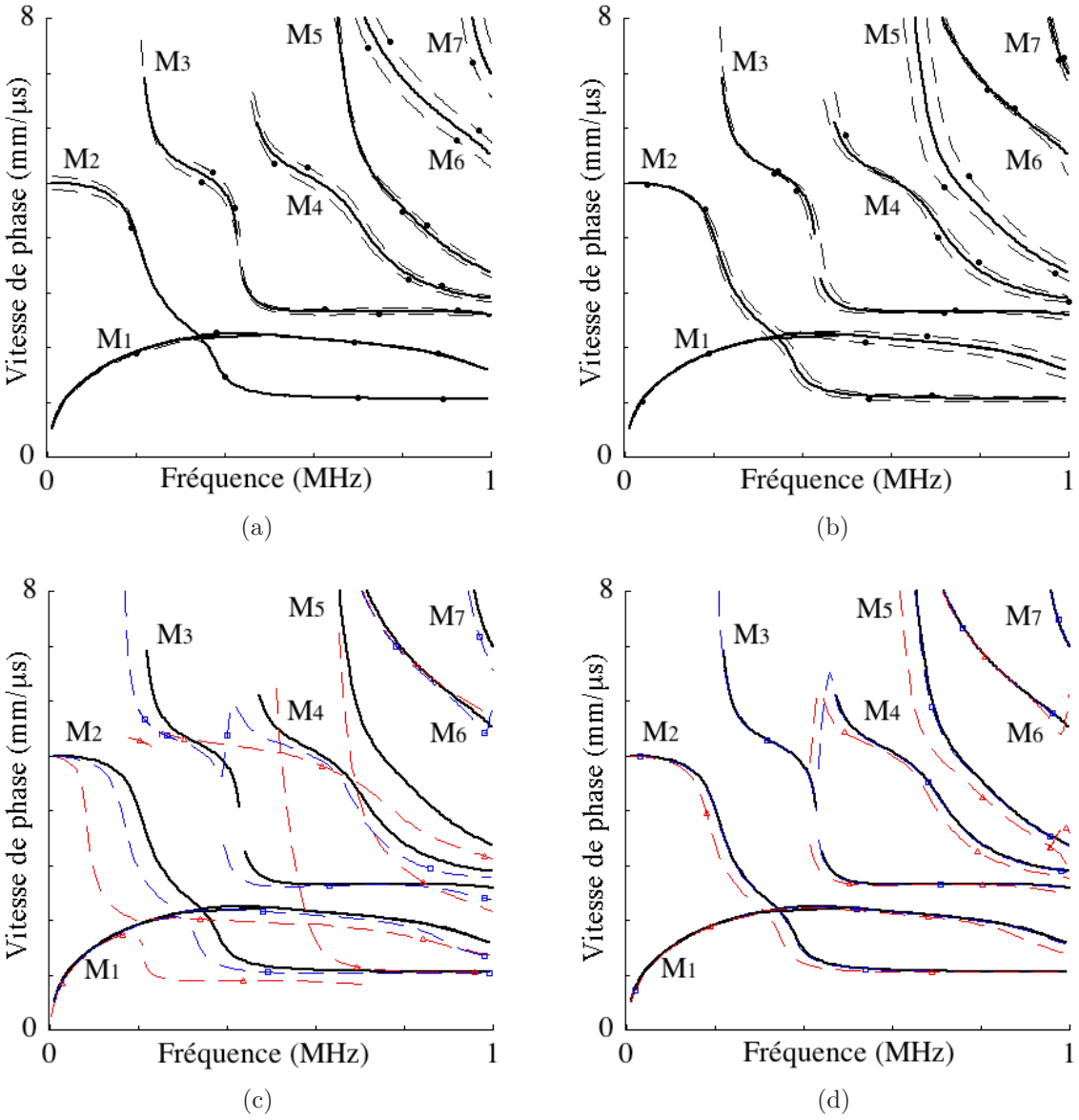


FIGURE F.1 – Prédictions numériques de la sensibilité de la vitesse de phase des 7 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage aluminium / interface / colle / plexiglas à une variation de (a) ±5% (− − −) des C_{ij} de l'aluminium ; (b) de ±5% (− − −) des C_{ij} du patch plexiglas ; (c) et (d) de −50% (−□−) et −90% (−△−) des C_{ij} de la couche de colle et des k_L et k_T de l'interface respectivement. (——) Vitesses de phase d'un assemblage aux propriétés nominales.

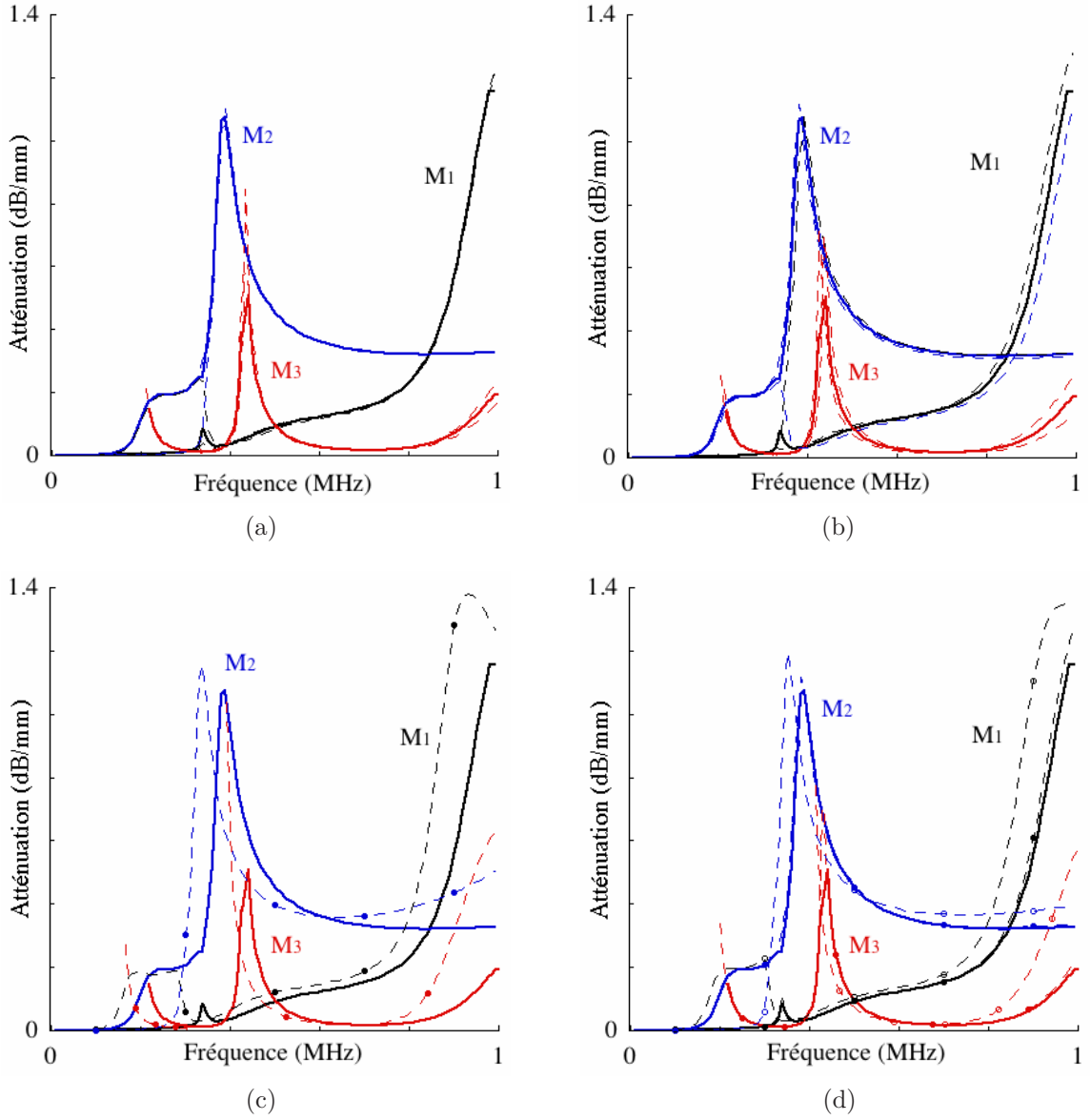


FIGURE F.2 – Prédictions numériques de la sensibilité de l'atténuation des 3 premiers modes guidés se propageant le long d'un assemblage aluminium / interface / colle / plexiglas à une variation de (a) ±5% (− − −) des C_{ij} de l'aluminium ; (b) de ±5% (− − −) des C_{ij} du patch plexiglas ; (c) de −50% (−•−) des C_{ij} de la couche de colle et (d) de −50% (−•−) et −90% (−◦−) des k_L et k_T de l'interface. (——) Vitesses de phase d'un assemblage aux propriétés nominales.

Bibliographie

[1] J.F. Begue, S. Juaneda, and P. Crassus. Mechanical aspects of bonded composite patch to repair metallic strucutres. Bonded Composite Patch Repair Seminar, CEAT, Toulouse, 12-13 Juin 2007.

[2] J. Cognard. *Science et technologie du collage ;*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausannes, 2004.

[3] M. Bourchak, I.R. Farrow, I.P. Bond, C.W. Rowland, and F. Menan. Acoustic emission energy as a fatigue damage parameter for CRFP composites. *Int. J. Fatigue*, 29 :457–470, 2007.

[4] C.C.H. Guyott, P. Cawley, and R.D. Adams. The non-destructive testing of adhesively bonded structure : a review. *J. Adhesion*, 20 :129–159, 1986.

[5] R.D. Adams and B.W. Drinkwater. Nondestructive testing of adhesively-bonded joints. *NDT&E International*, 30(2) :93–98, 1997.

[6] F.W.Y. Chan and T.W. Yeung. Non-destructive evaluation of adhesive bonding using reflective fringe pattern technique. *J. Nondestruct. Eval.*, 27 :105–114, 2008.

[7] H.A. Jama, E.M. Hussein, and P. Lee-Sullivan. Detection of debonding in composite-aluminium joints using gamma-ray compton scaterring. *NDT&E International*, 31(2) :99–103, 1998.

[8] P. Cawley. The sensitivity of the mechanical impedance method of NDT. *NDT Int.*, 20(4) :209–215, 1988.

[9] P. Cawley and R.D. Adams. Sensitivity of the coin-tap method of nondestructive testing. *Mater. Eval.*, 47 :558–563, 1989.

[10] D.J. Titman. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. *NDT&E International*, 34 :149–154, 2001.

[11] N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, and Z.P. Marioli Riga. The technology of composite patches and their strucutral reliability inspection using infrared thermography. *Prog. Aerospace Sci.*, 39 :317–328, 2003.

[12] D. Bates, G. Smith, D. Lu, and J. Hewitt. Rapide thermal non-destructive testing of aircraft components. *Compos. B : Engineering*, 31(3) :175–185, 2000.

[13] M. Genest, M. Martinez, N. Mrad, G. Renaud, and A. Fahr. Pulsed thermography for non-destructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repair. *Compos. Struct.*, 88 :112–120, 2009.

[14] L. Goglio and M. Rossetto. Ultrasonic testing of adhesive bonds of thin metal sheets. *NDT&E International*, 32 :323–331, 1999.

[15] A. Pilarski, J.L. Rose, K. Balasubramaniam, and D. Lecuru. Angular characteristics of reflectivity for layered structures with imperfections. In *Ultrasonics International 87*, pages 114–119, London, July 1987.

[16] C.C.H. Guyott and P. Cawley. Evaluation of the cohesive properties of adhesive joints using ultrasonic spectroscopy. *NDT&E International*, 21(4) :233–240, 1988.

[17] 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.*, 114(3) :1424–1434, 2003.

[18] V. Vlasie, S. de Barros, M. Rousseau, and L. Champanney. Ultrasonic rheological model of cohesive and adhesive zones in aluminium joints : validation by mechanical tests. *Archive of Appl. Mech.*, 75(4-5) :220–234, 2006.

[19] D. Cerniglia, N. Montinaro, and V. Nigreli. Detection of disbonds in multi-layer structures by laser-based ultrasonic technique. *J. Adhesion*, 84 :811–829, 2008.

[20] C.C.H. Guyott and P. Cawley. The ultrasonic vibration characteristics of adhesive joints. *J. Acoust. Soc. Am.*, 83(2) :632–640, 1988.

[21] S.E. Hanneman and V.K. Kinra. A new technique for ultrasonic nondestructive evaluation of adhesive joints : Part 1. theory. *Exp. Mech.*, 32(4) :323–331, 1992.

[22] S.E. Hanneman and V.K. Kinra. A new technique for ultrasonic nondestructive evaluation of adhesive joints : Part 2. experiments. *Exp. Mech.*, 32(4) :332–339, 1992.

[23] A. Pilarski and J.L. Rose. Ultrasonic oblique incidence for improved sensitivity in interface weakness determination. *NDT Int.*, 21(4) :241–246, 1988.

[24] S.I. Rokhlin and B. Marom. Study of adhesive bonds using low-frequency obliquely incident ultrasonic waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 80(2) :585–590, 1986.

[25] P.B. Nagy. Ultrasonic classification of imperfect interfaces. *Journal of NDE*, 11(3-4) :127–139, 1992.

[26] D.W. Schnidel, D.S. Forsyth, D.A. Hutchins, and A. Fahr. Air-coupled ultrasonic NDE of bonded aluminium lap joints. *Ultrasonics*, 35 :1–6, 1997.

[27] M. Castaings and B. Hosten. Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates. *NDT&E International*, 34(4) :249–258, 2001.

[28] M. Castaings and P. Cawley. The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100(5) :3070–3077, 1996.

[29] S.D. Holland, S.V. Teles, and D.E. Chimenti. Air-coupled, focused ultrasonic dispersion spectrum reconstruction in plates. *J. Acoust. Soc. Am.*, 115(6) :2866–2872, 2004.

[30] B.W. Drinkwater, R. Dwyer-Joyce, and P. Cawley. A study of the transmission of ultrasound across solid-rubber interfaces. *J. Acoust. Soc. Am.*, 101(2) :970–981, 1997.

[31] A.M. Robinson, B.W. Drinkwater, and J. Allin. Dry-coupled low-frequency ultrasonic wheel probes : application to adhesive bond inspection. *NDT&E International*, 36 :27–36, 2003.

[32] M.J. Santos, J. Perdigao, and P. Faia. Ultrasonic guided wave scattering effects from defects in adhesively bonded lap joints using pitch-catch and pulse-echo techniques. *J. Adhesion*, 84 :421–438, 2008.

[33] H. Duflo, B. Morvan, and J.L. Izbicki. Interaction of Lamb waves on bonded composite plates with defects. *Compos. Struct.*, 79 :229–233, 2007.

[34] M.J.S. Lowe and P. Cawley. The applicability of plate wave techniques for the ispection of adhesive and diffusion bonded joints. *J. Nondestruct. Eval.*, 13(4) :185–199, 1994.

[35] R. Seifired, L.J. Jacobs, and J. Qu. Propagation of guided waves in adhesive bonded components. *NDT&E International*, 35 :317–328, 2002.

[36] K. Heller, L.J. Jacobs, and J. Qu. Characterization of adhesive bond properties using Lamb waves. *NDT&E International*, 33 :555–563, 2000.

[37] M. Castaings, B. Hosten, and D. François. The sensitivity of surface guided modes to the bond quality between a concrete block and a composite plate. *Ultrasonics*, 42 :1067–1071, 2004.

[38] M. Castaings, B. Hosten, and D. François. Corrélation entre contrôle destructif et non destructif du collage entre une plaque composite et une strucutre béton. *Acta Acoustica united with Acoustica*, 90 :712–719, 2004.

[39] F. Lanza di Scalea, P. Rizzo, and A. Marzani. Propagation of ultrasonic giuded waves in lap-shear adhesive joints : Case of incident a_0 Lamb wave. *J. Acoust. Soc. Am.*, 115(1) :146–156, 2004.

[40] J. Koreck, C. Valle, J. Qu, and L.J. Jacobs. Computational characterization of adhesive layer properties using guided waves in bonded plates. *J. Nondestruct. Eval.*, 26 :97–105, 2007.

[41] S. Dixon, D. Jaques, and S.B. Palmer. The developpment of shear and compression elastic moduli in curing epoxy adhesives measured using non-contact ultrasonic transducers. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 36 :753–759, 2003.

[42] S. Dixon, D. Jaques, S.B. Palmer, and G. Rowlands. The measurement of shear and compression waves in curing epoxy adhesives using ultrasonic reflection and transmission techniques simultaneously. *Meas. Sci. Technol.*, 15 :939–947, 2004.

[43] R.E. Challis, M.E. Unwin, D.L. Chadwick, R.J. Freemantle, I.K. Partridge, and D.J. Dare. Following network formation in an epoxy/amine system by ultrasound, dielectric, and nuclear magnetic resonance measurements : A comparative study. *J. Appl. Polym. Sci.*, 88 :1665–1675, 2003.

[44] M. Schoenberg. Elastic wave behavior across linear slip interfaces. *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(5) :1516–1521, 1980.

[45] V. Vlasie. Modélisation mécanique et caractérisation ultrasonore de structures collées. Thèse n°6497, Université Paris 6, 2003.

[46] S. Biwa, S. Hiraiwa, and E. Matsumoto. Stiffness evaluation of contacting surfaces by bulk and interface waves. *Ultrasonics*, 47 :123–129, 2007.

[47] B.W. Drinkwater, M. Castaings, and B. Hosten. The measurement of A_0 and S_0 Lamb wave attenuation to determine the normal and shear stiffness of a compressively loaded interface. *J. Acoust. Soc. Am.*, 113(6) :3161–3170, 2003.

[48] V. Vlasie and M. Rousseau. Nondestructive tests of structural bonds by guided ultrasonic waves : effect of a surface pretreatment or a localized defect. *Am. J. Appl. Sci.*, 2(3) :739–745, 2005.

[49] B.A. Auld. *Acoustic fields and waves in solids*, volume I. Robert E. Krieger Publishing Company, Florida, second ed. edition, 1990.

[50] B. Hosten. Reflection and transmission of acoustic plane waves on an immersed orthotropic and viscoelastic solid layer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 89(6) :2745–2752, 1991.

[51] D. Royer and E. Dieulesaint. *Ondes élastiques dans les solides, Tome 1 : Propagation libre et guidée*. Masson, Paris, 1996.

[52] M. Castaings, B. Hosten, and T. Kundu. Inversion of ultrasonic, plane-wave transmission data in composite plates to infer viscoelastic material properties. *NDT&E International*, 33 :377–392, 2000.

[53] B. Hosten and M. Castaings. Transfer matrix of multilayered absorbing and anisotropic media. measurements and simulations of ultrasonic wave propagation through composite materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(3) :1488–1495, 1993.

[54] M. Castaings and B. Hosten. Delta operator technique to improve the Thomson Haskell method stability for propagation in multilayered anisotropic absorbing plates. *J. Acoust. Soc. Am.*, 95(4) :1931–1941, 1994.

[55] B. Hosten and M. Castaings. Surface impedance matrices to model the propagation in multilayered media. *Ultrasonics*, 41 :501–507, 2003.

[56] M. Bruneau and C. Potel, editors. *Propagation des ondes acoustiques 1.* Matériaux et acoustique 1. Hermès Lavoisier, Paris, 2006.

[57] M.R. Karim, A.K. Mal, and Y. Bar-Cohen. Inversion of leaky Lamb wave data by simplex algorithm. *J. Acoust. Soc. Am.*, 88(1) :482–491, 1990.

[58] B. Hosten, M. Castaings, and T. Kundu. Identification of viscoelastic moduli of composite materials from the plate transmission coefficient. Review of Progress in QNDE, Ed. Thompson D.O. and Chimenti D.E., Plenum Press, New York, vol. 17, p. 1117-1124, 1998.

[59] S. Baudouin and B. Hosten. Comparison between predicitons and measurement of viscoelastic moduli in composite materials versus temperature using ultrasonic immersion technique with oil. *J. Acoust. Soc. Am.*, 102(6) :3450–3457, 1997.

[60] S. Baste and M. Deschamps. Identification des constantes d'élasticité à partir des vitesses de propagation dans un plan principal de symétrie. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 309 :1521–1526, 1989.

[61] C. Aristégui and S. Baste. Optimal recovery of the elsticity tensor of general anisotropic materials from ultrasonic velocity data. *J. Acoust. Soc. Am.*, 101(2) :813–833, 1997.

[62] M. Castaings. Propagation ultrasonore dans les milieux stratifiés plans constitués de matériaux absorbants et orthotropes. Thèse n°1043, Université Bordeaux 1, 1993.

[63] B. Hosten, D.A. Hutchins, and D.W. Schnidel. Measurement of elastic constants in composite materials using air-coupled ultrasonic bulk waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 99(4) :2116–2123, 1996.

[64] B. Hosten. Stiffness matrix invariants to validate the characterization of composite materials with ultrasonic methodes. *Ultrasonics*, 30(6) :365–371, 1992.

[65] B. Hosten and M. Castaings. Comments on the ultrasonic estimation of the viscoelastic properties of anisotropic materials. *Composites : Part A*, 39 :1054–1058, 2008.

[66] M.Bruneau and C. Potel, editors. *Caractérisation des matériaux, contrôle non destructif et applications médicales.* Matériaux et acoustique 3. Hermès Lavoisier, Paris, 2006.

[67] B.A. Auld. *Acoustic fields and waves in solids*, volume II. Wiley-Interscience, USA, 1973.

[68] A. Bernard, M.J.S. Lowe, and M. Deschamps. Guided wave energy velocity in absorbing and non absorbing plates. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110(1) :186–196, 2001.

[69] W.T. Thomson. Transmission of elastic waves through a stratified medium. *J. Appl. Phys.*, 21 :89–93, 1950.

[70] N.A. Haskell. The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bull. Seismol.*, 43 :17–34, 1953.

[71] I. Bartoli, A. Marzani, F. Lanza di Scalea, and E. Viola. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section. *J. Sound Vib.*, 295 :685–707, 2006.

[72] D. Roy Mahapatra and S. Gopalakrishnan. A spectral finite element model for analysis of axial-flexural-shear coupled wave propagation in laminated composite beams. *Compos. Struct.*, 59(1) :67–88, 2003.

[73] M. V. Predoi, M. Castaings, B. Hosten, and C. Bacon. Wave propagation along transversely periodic structures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(4) :1935–1944, 2007.

[74] B.R. Mace, D. Duhamel, M.J. Brennan, and L. Hinke. Finite element prediction of wave motion in structural waveguides. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(5) :2835–2843, 2005.

[75] M. Castaings and M.J.S. Lowe. Finite element model for wave guided along solid system of arbitrary section coupled to infinite solid media. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(2) :696–708, 2008.

[76] B. Le Crom and M. Castaings. Shear Horizontal guided wave modes to infer the shear stiffness of adhesive bond layers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 127(4) :2220–2230, 2010.

[77] B. Le Crom and M. Castaings. Inferring shear stiffness of adhesive bonds using SH guided ultrasonic waves. Actes du 10ème Congrès Français d'Acoustique, $ISBN$: 978-2-9521105-7-0 (Lyon, avril 2010), 2010.

[78] R. Thomas, B.W. Drinkwater, and D. Liaptsis. The reflection of ultrasound from partially contacting rough surfaces. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(2) :638–645, 2005.

[79] B. Hosten and M. Castaings. Finite elements methods for modeling the guided waves propagation in structures with weak interfaces. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(3) :1108–1113, 2005.

[80] M. Drozdz. *Efficient Finite Element modelling of ultrasound waves in elastic media.* PhD thesis, Mechanical Engineering, Imperial College London, 2008.

[81] D. Alleyne and P. Cawley. A 2-dimensionnal fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *J. Acoust. Soc. Am.*, 89 :1159–1168, 1991.

[82] 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.*, 107(3) :1333–1345, 2000.

[83] H. Lamb. On the flexure of an elastic plate. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 21 :70–90, 1889.

[84] H. Lamb. On waves in an elastic plate. *Proc. Roy. Soc. of London, Series A*, 93(648) :114–128, 1917.

[85] K. Maslov and T. Kundu. Selection of Lamb modes for detecting internal defects in composite laminates. *Ultrasonics*, 35 :141–150, 1997.

[86] G.R. Liu and S.S. Quek Jerry. A non-reflecting boundary for analysing wave propagation using the finite element method. *Finite Elem. Anal. Design*, 39(5) :403–417, 2003.

[87] 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.*, 115 :1125–1133, 2004.

[88] M. Drozdz, M.J.S. Lowe, P. Cawley, L. Moreau, and M. Castaings. Efficient numerical modeling of absorbing regions for boundaries of guided wave problems. Review of Progress in QNDE, Ed. Thompson D.O. and Chimenti D.E., AIP Conf. Proc., New York, vol. 25, p. 126-133, 2006.

[89] L. Duquenne, E. Moulin, J. Assaad, and S. Grondel. Transient modeling of Lamb waves generated in viscoelastic materials by surface bonded piezoelectric transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 116 :133–141, 2004.

[90] M. Castaings, C. Bacon, and B. Hosten. Finite element predictions for the dynamic response of thermo-viscoelastic material structures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 115 :1125–1133, 2004.

[91] L. Moreau. Simulation de la diffraction d'ondes guidées ultrasonores par des défauts dans des plaques. Thèse n°3543, Université Bordeaux 1, 2007.

[92] M. Castaings. Contrôle et évaluation non destructifs de matériaux par ondes ultrasonores guidées. Habilitation à Diriger des Recherches, n°230, Université Bordeaux 1, 2002.

[93] P. Kirrmann. On the completness of Lamb waves. *Journal of Elasticity*, 37 :39–69, 1995.

[94] P.C. Xu and S.K. Datta. Guided waves in a bonded plate : A parametric study. *J. Appl. Phys.*, 67(11) :6779–6786, 1990.

[95] B. Hosten, C. Biateau, M. Castaings, and D. Rozière. Etude et caractérisation de transducteurs à couplage par air pour l'évaluation et le contrôle non destructifs des matériaux. *Instr. Mes. Metrol.*, 1 :169–189, 2001.

[96] H. Lourme. Etude des assemblages collés par ondes guidées ultrasonores. etude expérimentale et modélisation par éléments finis. Thèse n°3902, Université Bordeaux 1, 2010.

[97] M.E. Unwin and R.E. Challis. Epoxy thermosets : the detection of adverse stoichiometry using ultrasonic, dielectric and NMR techniques. Review of Progress in QNDE, Ed. Thompson D.O. and Chimenti D.E., AIP Conf. Proc., New York, vol. 23, p. 1129-1134, 2004.

[98] M. Budzik, J. Jumel, K. Imielin'ska, and M.E.R. Shanahan. Effect of adhesive compliance in the assessment of soft adhesives with the wedge test. *J. Adhes. Sci. Technol.*, (sous presse).

[99] S.I. Rokhlin, L. Wang, B. Xie, V.A. Yakovlev, and L. Adler. Modulated angle beam ultrasonic spectroscopy for evaluation of imperfect interfaces and adhesive bonds. *Ultrasonics*, 42 :1037–1047, 2004.

[100] C. Pecorari. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact. *J. Acoust. Soc. Am.*, 113 :3065–3072, 2003.

[101] J. Chen, D. Zhang, Y. Mao, and J. Cheng. Contact acoustic nonlinearity in a bonded solid-solid interface. *Ultrasonics*, 44 :e1355–e1358, 2006.

[102] D. Yan, B.W. Drinkwater, and S.A. Neild. Measurements of the ultrasonic nonlinearity of kissing bonds in adhesive joints. *NDT&E International*, 42 :459–466, 2009.

[103] C.J. Brotherhood, B.W. Drinkwater, and S. Dixon. The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques. *Ultrasonics*, 41 :521–529, 2003.